



HAL
open science

Valorisation des systèmes d'éclairage à LED en fin de cycle de vie

Arezki Lotfi Benmamas

► **To cite this version:**

Arezki Lotfi Benmamas. Valorisation des systèmes d'éclairage à LED en fin de cycle de vie. Ingénierie de l'environnement. Université de Technologie de Troyes, 2021. Français. NNT : 2021TROY0044 . tel-03810732

HAL Id: tel-03810732

<https://theses.hal.science/tel-03810732>

Submitted on 11 Oct 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse
de doctorat
de l'UTT

Arezki Lotfi BENMAMAS

Valorisation des systèmes d'éclairage à LED en fin de cycle de vie



Champ disciplinaire :
Sciences pour l'Ingénieur

2021TROY0044

Année 2021

THESE
pour l'obtention du grade de
DOCTEUR
de l'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE TROYES
en SCIENCES POUR L'INGENIEUR

Spécialité : MATERIAUX, MECANIQUE, OPTIQUE, NANOTECHNOLOGIE

présentée et soutenue par

Arezki Lotfi BENMAMAS

le 14 décembre 2021

Valorisation des systèmes d'éclairage à LED en fin de cycle de vie

JURY

M. Georges ZISSIS	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Président
M. Vincent CONSONNI	CHARGE DE RECHERCHE CNRS - HDR	Rapporteur
M. Didier PERRIN	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Rapporteur
Mme Lenka SVECOVA	MAITRE DE CONFERENCES	Examinatrice
M. Youcef BOUZIDI	PROFESSEUR ASSOCIE UTT	Directeur de thèse
M. Gilles LÉRONDEL	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Directeur de thèse

Personnalités invitées

M. Guy HOUSET	ASSISTANT INGENIEUR UTT
M. Junbeum KIM	PROFESSEUR ASSOCIE UTT
M. Philippe LECLERE	INGENIEUR ARTEMISE
M. Komla NOMENYO	CHARGE DE RECHERCHE CNRS

« Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme »

Antoine Laurent Lavoisier
(1743-1794)

Résumé

Si l'éclairage à LED permet une réduction conséquente de la consommation d'électricité, la problématique de leur recyclage reste posée à ce jour. Cette thèse, associée au projet RECYLED, a consisté à identifier puis à développer des méthodes de désassemblage, en fonction des typologies. L'objectif est d'aboutir à un taux de recyclage de 80%, par une approche globale incluant à la fois les aspects techniques, économiques et environnementaux.

Trois scénarii ont été identifiés, pour le recyclage des lampes et des tubes à LED en fin de vie :

I : La réutilisation des dispositifs fonctionnels ;

II : Le broyage classique adapté aux dispositifs puis la valorisation des matériaux constitutifs ;

III : Le désassemblage sélectif des lampes puis la réutilisation des composants électroniques ou l'extraction des métaux précieux.

Au préalable, une étude dynamique caractérisant les produits a été menée, permettant d'estimer leur durée d'usage et leur composition matières. Les résultats ont permis d'estimer le potentiel de valorisation globale, d'identifier et de tester les solutions technologiques offrant le meilleur rapport coût-bénéfice.

La technologie, répondant au désassemblage des lampes, est celle des puissances pulsées. Elle permet la fragmentation sélective, en séparant les composants à valoriser et/ou à réutiliser. En ce qui concerne les tubes, des solutions exclusivement mécaniques ont été retenues. Les méthodes proposées permettent d'obtenir des taux de recyclage supérieurs à l'objectif réglementaire. Ces résultats sont à corrélérer avec les prévisions estimées pour 2030, soit un gisement annuel maximal évalué à 2600 tonnes pour les lampes et à 1600 tonnes pour les tubes et dalles.

Mots-clés : Economie circulaire - Diodes électroluminescentes - Gisement - Puissances pulsées - Fragmentation sélective - Recyclage

Abstract

While LED lighting allows for a significant reduction in electricity consumption, the issue of the end-of-life of the LED-based devices remains to this day. This thesis associated with the RECYLED project consisted in identifying and then developing disassembly methods according to the typologies of the devices. The objective is to achieve a recycling rate of 80%, through an approach, including both technical, economic and environmental aspects.

Three scenarios have been identified for the recycling end-of-life LED lamps and tubes:

I: The reuse of undamaged devices;

II: The crushing adapted to the devices then the recovery of the constituent materials;

III: The selective disassembly of lamps and then the reuse of electronic components or extraction of precious metals.

Beforehand, a dynamic study characterizing the products was carried out in order to estimate their duration of use and their material composition. The results made it possible to estimate the potential for overall valuation, to identify and test the technological solutions offering the best cost-benefit ratio.

Regarding the disassembly identified as the blocking point, the technology of pulsed powers is proposed. It allows selective fragmentation by separating the components to be recovered and/or reused. With regard to the tubes, exclusively mechanical solutions have been retained. The proposed methods allow to obtain recycling rates above the regulatory objective. These results are linked with the forecasts estimated for 2030, which lead to a maximum annual deposit estimated at 2,600 tons for lamps and at 1,600 tons for tubes and panels.

Keywords: Circular economy - LED lighting diodes - Deposit - High voltage fragmentation technology - Selective fragmentation - Recycling

Remerciements

Ce projet de thèse CIFRE est le fruit d'une étroite collaboration entre la société ARTEMISE et les laboratoires Lumière, Nanomatériaux, Nanotechnologies (L2n) et Unité de recherche interdisciplinaire Société-Technologie-Environnement (InSyTE), de l'Université de Technologie de Troyes (UTT). Le projet a été financé par la région Grand EST et le FEDER (Fonds Européen de Développement Régional). Ce travail a été rendu possible grâce à la contribution de nombreuses personnes que je tiens à remercier ici.

J'adresse un grand merci tout d'abord à Jean-Marie Bailly, président de la société ARTEMISE, Laure Clerget, directrice de l'usine, Philippe Leclere, responsable production, Luc Blanquart, responsable environnement, Eric Gibier, responsable maintenance, ainsi que toute l'équipe. Je vous remercie de m'avoir accueilli dans votre entreprise durant ces trois dernières années et d'avoir permis la réalisation de cette thèse.

Je suis profondément reconnaissant, envers mes deux directeurs de thèse, Gilles Lérondel et Youcef Bouzidi, pour m'avoir transmis leurs connaissances, pour leur accompagnement tout au long de mes études, leur bienveillance à mon égard, leur encadrement, ainsi que leur disponibilité. Un grand merci à vous deux, pour votre implication, vos encouragements et vos précieux conseils, notamment dans la publication de l'article. Sans votre aide, je n'aurai pas pu accomplir ce travail. Merci infiniment pour la confiance que vous m'avez accordée. Veuillez trouver en ce travail ma gratitude et tous mes remerciements. Je remercie également Komla Nomenyo pour son implication, son expertise et sa disponibilité.

J'exprime ici toute ma gratitude aux membres du jury : Vincent Consonni et Didier Perrin pour avoir accepté d'évaluer mon travail et d'être rapporteurs de ma thèse, mais également Lenka Svecova, Junbeum Kim et Georges Zissis pour avoir accepté mon invitation à venir juger mon travail.

Tout au long de cette thèse, j'ai eu la chance de pouvoir compter sur l'aide d'un très grand nombre de personnes. C'est pourquoi, je remercie François Weil, Abdellah Oukkir, Thomas Vallon, Régis Déturche, Bruno Guelorget, Nacef Tazi et Jean-Philippe DANAU pour leur aide à chaque fois que je les ai sollicités. Plus particulièrement, un grand merci à Guy Housset pour nos échanges tout au long de ce travail, ainsi que pour tous les travaux expérimentaux que nous avons menés ensemble.

Je souhaite remercier Kathy Bru et Mickaël Beaulieu, ingénieurs du BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), pour m'avoir fait confiance et prêté gracieusement durant quatre semaines le réacteur laboratoire des puissances pulsées SELFRAG Lab. Merci pour leurs conseils et orientations durant mes études paramétriques de fragmentations sélectives.

Je remercie également Daniel Froëlich, professeur de l'institut de Chambéry Arts et Métiers ParisTech (ENSAM), pour avoir mis à ma disposition le dispositif de fluorescence X, afin d'analyser les matrices plastiques de mes échantillons.

Merci à l'ensemble du personnel de l'école doctorale, le directeur Khemais Saanouni, les gestionnaires Pascale Denis, Isabelle Leclercq et Thérèse Kazarian pour leur disponibilité, à chaque fois que j'ai eu besoin de leur aide.

Toute ma reconnaissance va également à ma famille et à mon épouse, pour leur soutien inconditionnel durant ma thèse. Je vous serai éternellement reconnaissant. Merci de m'avoir permis de faire ces longues études et d'avoir toujours cru en moi.

Merci à toutes et à tous encore une fois, de m'avoir fait confiance et donné cette belle opportunité.

TABLE DES MATIERES

Glossaire.....	12
Liste des abréviations et des acronymes.....	14
Introduction générale.....	18
CHAPITRE 1.....	24
Projets R&D de valorisation des LEDs	24
1.1. Introduction.....	25
1.2. La technologie LED	25
1.2.1. <i>Présentation générale</i>	25
1.2.2. <i>Les typologies de puces à LED</i>	27
1.2.3. <i>La composition matière des puces à LED</i>	31
1.3. Le projet RECYLED.....	32
1.3.1. <i>L'organisation du projet RECYLED</i>	32
1.3.2. <i>L'étude des différents scénarii de recyclage</i>	34
1.4. L'état de l'art du recyclage des LEDs.....	39
1.4.1. <i>L'état de l'art international</i>	39
1.4.1.1. <i>Modèles des analyses du cycle de vie établis</i>	40
1.4.1.2. <i>Etudes de cas et examen des ACVs</i>	41
1.4.1.3. <i>Discussions et recommandations</i>	44
1.4.2. <i>L'état de l'art national : projet REDLED</i>	45
1.4.2.1. <i>La Chaire Mines Urbaines</i>	46
A. <i>Extraction des métaux stratégiques des DEEE</i>	48
B. <i>Valorisation des matériaux polymères des DEEE</i>	49
C. <i>Economie circulaire : une problématique émergente</i>	50
1.4.2.2. <i>Les avancées du projet REDLED</i>	51
A. <i>Etude du gisement de lampes à LED</i>	51
B. <i>Etude de fragmentation des lampes à LED avec SELFRAG</i>	52
C. <i>Tri des matériaux plastiques des lampes à LED</i>	53
1.5. Développement de l'éclairage à LED	53
1.5.1. <i>Eclairage public français</i>	54
1.5.2. <i>Eclairage à l'université : exemple du campus de l'UTT</i>	57
1.5.3. <i>Eclairage privatif des logements français</i>	59
1.5.4. <i>Les domaines d'application de la technologie LED</i>	61
1.5.5. <i>Maison intelligente : la domotique</i>	63
1.6. Conclusion.....	65
Références bibliographiques	67
CHAPITRE 2.....	70
Etude du gisement	70
2.1. Introduction.....	71
2.2. Caractérisation des déchets actuels	71
2.2.1. <i>Caractérisations massique et typologique</i>	71

2.2.2. Caractérisation par fabricant.....	75
2.3. Caractérisation des déchets futurs.....	78
2.3.1. Caractérisation massique	78
2.3.1.1. Scénario 1 : taux de collecte constant à 42%.....	82
2.3.1.2. Scénario 2 : évolution du taux de collecte de 42% à 100%	85
2.3.2. Caractérisation typologique.....	87
2.4. Les bilans massiques	90
2.4.1. Déchets actuels de lampes à LED	90
2.4.2. Déchets actuels de tubes à LED.....	93
2.4.3. Lampes à LED (technologie 2020).....	95
2.4.4. Dalles à LED (technologie 2020)	97
2.5. Le potentiel de valorisation	100
2.5.1. Bilan matériaux et composants électroniques des lampes à LED	101
2.5.2. Bilan matériaux et composants électroniques des tubes et dalles à LED.....	103
2.5.3. Potentiel de valorisation global	106
2.6. Conclusion.....	110
Références bibliographiques	111

CHAPITRE 3.....114

Techniques de déconstruction des dispositifs LEDs	114
3.1. Introduction.....	115
3.2. Utilisations actuelles de la technologie de fragmentation par les hautes tensions.....	115
3.3. Principe de la technologie de fragmentation par les hautes tensions	117
3.3.1. Champs Electriques Pulsés (CEP).....	117
3.3.2. Décharge dans l'eau : streamer	117
3.3.2.1. Tension de claquage.....	119
3.3.2.2. Le mode de décharge subsonique	120
3.3.2.3. Le mode de décharge supersonique	121
3.3.3. Régime d'arcs électriques.....	122
3.3.3.1. Fragmentation électrodynamique (EDF)	124
3.3.3.2. Fragmentation électrohydraulique (EHF).....	127
3.4. Méthodologie des études de traitement des dispositifs à LED	129
3.5. Etude via le dispositif XCRUSHER	130
3.5.1. Contexte de l'étude	130
3.5.2. Tests sur les lampes à LED en matières plastiques	132
3.5.2.1. Lampes avec système optique en plastique PC.....	132
3.5.2.2. Lampes avec corps en plastique PBT	133
3.5.3. Tests sur les spots à LED en aluminium	134
3.5.4. Tests sur les tubes à LED en aluminium.....	136
3.5.5. Tests sur les tubes à LED en plastique	137
3.5.6. Tests sur les puces à LED et leur support.....	138
3.5.7. Proposition d'un dimensionnement industriel XCRUSHER	138
3.5.8. Bilan de l'étude XCRUSHER	140
3.6. Etude via le dispositif SELFRAG Lab.....	140
3.6.1. Caractéristiques du SELFRAG Lab.....	141
3.6.2. Protocole expérimental pour les dispositifs E27 en plastique.....	142
3.6.3. Résultats et caractérisation des essais de lampes E27 en plastique.....	145
3.6.3.1. Libération sélective des éléments constitutifs.....	150
3.6.3.2. Etat des corps et des composants électroniques	154
3.6.4. Protocole expérimental pour les dispositifs GU10 en plastique	158
3.6.5. Résultats et caractérisation des essais de spots GU10 en plastique.....	159
3.6.5.1. Libération sélective des éléments constitutifs.....	162
3.6.5.2. Etat des corps et des composants électroniques	166

3.7. Etude via le dispositif IMPULSTEC	169
3.7.1. Tests sans les dispositifs à LED en verre.....	170
3.7.2. Tests sans les dispositifs à LED en verre et corps métalliques	173
3.7.3. Tests sur les dispositifs à LED E27 en plastique.....	174
3.7.4. Estimation énergétique de l'outil IMPULSTEC	176
3.8. Adaptation mécanique pour le traitement des tubes à LED.....	177
3.8.1. Présentation de la machine ECM.....	177
3.8.2. Modifications de la machine ECM.....	178
3.8.3. Résultats des modifications	179
3.9. Conclusion.....	183
Références bibliographiques	184
CHAPITRE 4.....	188
Valorisation matière	188
4.1. Introduction.....	189
4.2. Caractérisation des plastiques des dispositifs LEDs	189
4.2.1. Les retardateurs de flamme bromés dans l'environnement	190
4.2.2. La réglementation des retardateurs de flamme bromés	191
4.2.3. Techniques de détection et de séparation des fractions de plastiques bromés	194
4.2.4. Caractérisation du brome dans les matrices plastiques	197
4.2.5. Solution de tri des plastiques	206
4.2.6. Sublimation des retardateurs de flamme bromés par pyrolyse	207
4.2.7. Les taux de valorisation matière et énergétique	208
4.3. Potentiel de valorisation des lampes E27 en plastique	211
4.3.1. Potentiel des composants électroniques des lampes E27 en plastique.....	211
4.3.2. Potentiel global des lampes E27 en plastique	215
4.3.3. Proposition d'une ligne de traitement à l'échelle industrielle.....	218
4.4. Analyse du flux de matières (AFM)	221
4.4.1. Contexte de l'étude	221
4.4.2. Les avancées actuelles.....	222
4.4.3. La méthodologie et les données considérées	226
4.4.4. Résultats et discussions.....	230
4.4.4.1. Modèle 1 : Business as Usual.....	232
4.4.4.2. Modèle 2 : Puissances pulsées.....	233
4.5. Conclusion.....	237
Références bibliographiques	239
Conclusion générale	244
Perspectives	248
Sommaire des annexes.....	252
Productions scientifiques.....	272

Glossaire

Anisotropie : *Propriété d'être dépendant de la direction. Un objet anisotrope présente différentes caractéristiques selon son orientation.*

Courants de Foucault¹ : *Courants électriques créés dans une masse conductrice (en surface), par la variation au cours du temps, soit d'un champ magnétique extérieur traversant le milieu (le flux du champ à travers le milieu), soit par un déplacement de cette masse dans un champ magnétique constant. Ils sont une conséquence de l'induction magnétique.*

Développement durable : *Selon l'ADEME : « Le développement durable se définit comme un mode de développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. C'est un principe d'organisation de la société humaine qui tient compte des ressources finies de la planète et agit sur trois dimensions interdépendantes :*

- *Environnementale : le développement des activités humaines doit se faire de façon à ne pas nuire à la capacité de renouvellement des ressources naturelles ou au bon fonctionnement des services écosystémiques ;*
- *Sociale : le développement harmonieux de la société humaine passe par la cohésion sociale garantissant à tous l'accès à des ressources et services de base (la santé, l'éducation, etc.) ;*
- *Economique : le développement économique doit permettre la diminution de l'extrême pauvreté et l'exercice par le plus grand nombre d'une activité économique dignement rémunérée.*

A long terme, il n'y aura pas de développement possible s'il n'est pas écologiquement tolérable, socialement équitable et économiquement efficace ». Le développement durable passe inévitablement par une phase de revalorisation et de recyclage des déchets.

Economie circulaire : *Selon le Ministère de la Transition Ecologique : « L'économie circulaire désigne un modèle économique dont l'objectif est de produire des biens et des services de manière durable, en limitant la consommation et les gaspillages des ressources (matières premières, eau, énergie) ainsi que la production des déchets. Il s'agit de rompre avec le modèle de l'économie linéaire (extraire, fabriquer, consommer et jeter) pour un modèle économique circulaire. C'est en ce sens que le gouvernement s'est engagé avec la feuille de route économie circulaire. »*

Installation Classée pour la Protection de l'Environnement (ICPE) : *Selon l'article 511-1 du Code de l'Environnement : « Installations classées ; telles que : les usines, les ateliers, les dépôts, les chantiers et d'une manière générale toutes les installations exploitées ou détenues par toute personne physique ou morale, publique ou privée, pouvant présenter des dangers ou des inconvénients pour la commodité, la santé, la sécurité, la salubrité publique, l'agriculture, l'environnement, la conservation des sites et des monuments, ainsi que des éléments du patrimoine archéologique. »*

Luminance : *C'est la seule grandeur photométrique perçue par l'œil humain. Ce concept décrit l'impression de luminosité que donne d'un côté une source d'éclairage et de l'autre une surface. Ce faisant, cette impression dépend fortement du facteur de réflexion (couleur et surface). L'unité de mesure est le cd/m².*

¹ Ce phénomène a été découvert par le physicien français Léon Foucault en 1851.

Matière première secondaire : *Matériaux issus du recyclage des déchets et pouvant être utilisés en substitution totale ou partielle de la matière première vierge. D'un point de vue industriel, la matière première secondaire est un déchet qui a été transformé en vue d'obtenir un produit utilisable dans les procédés de fabrication en remplacement de la matière première initiale. D'un point de vue législateur, cette notion est beaucoup plus complexe à aborder, car à partir de quelles opérations un déchet devient-il une matière première secondaire ? L'utilisation des matières premières secondaires est fortement dépendante des prix de la matière première vierge, ce qui fragilise la filière.*

PCB² : *Circuit imprimé permettant de maintenir et de relier électroniquement un ensemble de composants électroniques entre eux, dans le but de réaliser un circuit électronique complexe. Nous le désignons également par le terme de carte électronique ou driver.*

Perturbateur endocrinien : *Molécule qui mime, bloque ou modifie l'action d'une hormone et perturbe le fonctionnement normal de l'organisme. Elle mime l'action d'une hormone par sa structure moléculaire similaire à celle d'une hormone naturelle et bloque son action en saturant son récepteur, tels que les agents ignifugés bromés qui perturbent le fonctionnement des hormones thyroïdiennes. La définition des perturbateurs endocriniens fait encore l'objet aujourd'hui de débats au niveau international. Celle proposée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) est la plus communément admise : « Un perturbateur endocrinien (PE) désigne une substance ou un mélange qui altère les fonctions du système endocrinien et de ce fait induit des effets néfastes dans un organisme intact, chez sa progéniture ou au sein de (sous)-populations. »*

Recyclage : *Procédé de traitement des déchets et de réintroduction des matériaux qui en sont issus dans le cycle de production de produits équivalents ou différents. Les finalités sont de réduire les volumes de déchets et en conséquence leurs pollutions, de préserver les ressources naturelles et d'avoir accès à de la matière première secondaire bon marché en remplacement de la matière première vierge.*

Responsabilité Elargie du Producteur (REP) : *Selon l'ADEME : « Les fabricants, distributeurs pour les produits de leurs propres marques, importateurs qui mettent sur le marché des produits générant des déchets, doivent prendre en charge financièrement la gestion de ces déchets. Les metteurs de produits ont leur responsabilité élargie, pas seulement de la mise sur le marché, mais durant toutes les phases de leur cycle de vie, dont celle de la fin de vie. Bien que basée sur la responsabilité individuelle du producteur, la REP peut être assurée par les metteurs sur le marché de manière individuelle ou collective, au travers d'un éco-organisme ».*

Transition énergétique : *Modification des modes de production et de consommation de l'énergie résultant des évolutions techniques, des prix et de la disponibilité des ressources énergétiques mais également de la volonté des gouvernements, des entreprises et des populations de réduire les impacts sur l'environnement. L'objectif consiste à changer le système énergétique actuel (reposant sur l'utilisation de ressources non renouvelables) vers un système énergétique basé sur l'utilisation de ressources renouvelables. C'est une évolution des comportements permettant :*

- *De consommer mieux en économisant de l'énergie (moins de carburants fossiles, moins de transport, plus de confort thermique, plus d'efficacité dans l'industrie) ;*
- *De produire autrement en préservant l'environnement (plus de ressources locales, des énergies renouvelables, moins de déchets) ;*
- *De faire progresser la société grâce à des projets mobilisateurs (projets coopératifs de production d'énergie, services innovants) ;*
- *De créer de l'emploi dans de nouveaux métiers d'avenir.*

² Printed Circuit Board.

Liste des abréviations et des acronymes

A

ABS	Acrylonitrile Butadiène Styrène
AC/DC	Alternative Current/Direct Current (Courant alternatif/Courant continu)
ACV	Analyse du Cycle de Vie
ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AFM	Analyse du Flux de Matières
AFME	Analyse du Flux de Matières et d'Energie
ATR	Attenuated Total Reflectance (Réflectance Totale Atténuée)

B

BaU	Business as Usual
BDE	BromoDiphénylEther
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières

C

CaCl ₂	Chlorure de Calcium
CCV	Coûts du Cycle de Vie
CE	Commission Européenne
CENELEC	Comité Européen de Normalisation en Electronique et en Electrotechnique
CEP	Champs Electrique Pulsé
CFD	Computational Fluid Dynamics (Mécanique des fluides)
CFL	Compact Fluorescent Light
COB	Chip On Board
COG	Chip On Glass
COREPER	COmité des REprésentants PERmanents

D

DEEE	Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques
DEL	Diode Emettrice de Lumière
DFCI	Détecteur de Fumée à Chambre d'Ionisation
DIP	Dual In-line Package
DF	Dioxines et Furanes

E

ECHA	European CHEmicals Agency (Agence européenne des produits chimiques)
ECM	End Cut Machine
EDF	Fragmentation ElectroDynamique
EDX	Energy Dispersive X-ray spectroscopy
EEE	Equipements Electriques et Electroniques
EHF	Fragmentation ElectroHydraulique

EHPAD	Etablissement d'Hébergement pour Personnes Agées Dépendantes
EPI	Equipement de Protection Individuelle
EPC	Energy Performance Contracting (CPE : Contrat de Performance Energétique)

F

FEDER	Fonds Européen de DEveloppement Régional
FEDEREC	Fédération des entreprises du recyclage
FNADE	Fédération Nationale des Activités de la Dépollution et de l'Environnement
FTIR	Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier
FX	Fluorescence X

G

GEM F	Gros Equipements Ménagers Froid
GEM HF	Gros Equipements Ménagers Hors Froid

H

HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
HBCDD	HexaBromoCycloDoDécane
HID	High Intensity Discharge
HVFT	High Voltage Fragmentation Technology
H ₂ O ₂	Peroxyde d'hydrogène

I

ICPE	Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
INERIS	Institut National de l'Environnement industriel et des RISques
IR	Infra Rouge (InfraRed)

L

LED	Light Emitting Diode
LIBS	Laser Induced Breakdown Spectroscopy (Spectroscopie de Plasma Induit par Laser)

M

MIR	Spectroscopy Mid-InfraRed (Spectroscopie Moyen Infra Rouge)
-----	---

N

NIR	Spectroscopy Near-InfraRed (Spectroscopie proche Infra Rouge)
-----	---

O

OMS	Organisation Mondiale de la Santé
O ₃	Ozone (trioxygène)

P

PAM	Petits Appareils Ménagers
PBB	PolyBromoBiphényle
PBDE	PolyBromoDiphénylEther
PBT	PolyButylèneTéréphtalate
PC	PolyCarbonate
PCB	Printed Circuit Board
PE	Perturbateur Endocrinien
PET	PolyEthylèneTéréphtalate
POP	Polluant Organique Persistant
PP	PolyPropylène
ppm	Parties Par Million
PS	PolyStyrène
PTFE	PolyTétraFluoroEthylène
PWTS	Pre-Weakening Test Station

R

RECYLED	RECYclage des dispositifs d'éclairage à LED
REDLED	Recycling EnD-of-life LED
REP	Responsabilité Elargie du Producteur
RF	Retardateur de Flamme
RFB	Retardateur de Flamme Bromé
RoHS	Restrictions on the use of certain Hazardous Substances (Limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses)
RSE	Responsabilité Sociétale des Entreprises

S

SC.1	Scénario 1
SC.2	Scénario 2
SIG	Système d'Information Géographique
SMD	Surface Mounted Device
SO	Système Optique
SSS	Sliding Spark Spectroscopy (spectroscopie à étincelle glissante)

T

TBBPA	TétraBromoBisPhénol A
Tep	Tonne équivalent pétrole

U

UE	Union Européenne
UNEP	United Nations Environment Program (PNUÉ : Programme des Nations Unies pour l'Environnement)
UTC	Unintentional Trace Contaminant
UV	Ultraviolet

V

V_m Potentiel transmembranaire

X

XRT X-ray Transmission (Transmission des rayons X)

Introduction générale

Dans un contexte mondial de transition énergétique, l'association française de l'éclairage estime à 12% la production nationale électrique utilisée pour l'éclairage [1]. De nombreuses sources de lumières énergivores sont encore usitées. Nous devons agir pour réduire massivement cette consommation électrique. Il est estimé que l'éclairage compte 19% de la demande d'électricité à l'échelle mondiale [2]. La lampe à incandescence a été la principale source de l'industrie de l'éclairage, depuis plus d'un siècle. Cependant, cette technologie a un faible rendement, seulement 10% du spectre lumineux est émis dans le visible. Elle génère une chaleur importante, soit 90% de pertes par effet Joule. Par conséquent, pour promouvoir l'économie d'énergie, de nombreux pays ont déjà interdit ces sources d'éclairage inefficaces, en les remplaçant par d'autres technologies, qui sont les lampes fluo-compactes et celles à base de diodes électroluminescentes (LED³). Avec le progrès de la technologie des semi-conducteurs, les LEDs ont évolué en raison de leurs caractéristiques spécifiques ; telles que l'émission de la totalité du spectre lumineux dans le visible impliquant une efficacité lumineuse 70% plus élevée, une économie d'énergie comprise entre 70% et 90%, une durée d'utilisation plus importante, ainsi qu'une large gamme de températures de couleur permettant de répondre à des exigences esthétiques.

Les LEDs sont des composants électroniques connus depuis de nombreuses années, mais ce n'est qu'à partir des années 2000, qu'elles ont commencé à prendre leur place dans les systèmes d'éclairage modernes. Elles équipent, dans le secteur automobile les voyants des tableaux de bord, dans le secteur tertiaire les enseignes des grands magasins et plus largement dans les nouvelles technologies les dalles de rétro-éclairage des téléviseurs, des ordinateurs et des smartphones. Aujourd'hui, nous les trouvons dans l'éclairage routier, leur faisceau directif et intense leur permet une application privilégiée dans les éclairages aéroportuaires. Toutefois, ces équipements à LED blanche constituent une double rupture non seulement technologique, mais aussi environnementale et ont une durée de vie limitée, comme tout composant. Il faut dès à présent prévoir leur traitement en fin de cycle de vie.

En France, la société ARTEMISE (Aube Recyclage et Traitement d'Eléments Mercuriels Issus de Sources d'Eclairage), située à Vulaines, à une quarantaine de kilomètres de la ville de Troyes, est le leader français du recyclage des lampes à économie d'énergie. Elle porte depuis huit ans, les ambitions d'un développement innovant et diversifié. Sa capacité de traitement n'a cessé de croître, depuis 2016, avec une capacité annuelle pouvant atteindre 3000 tonnes (Figure A).

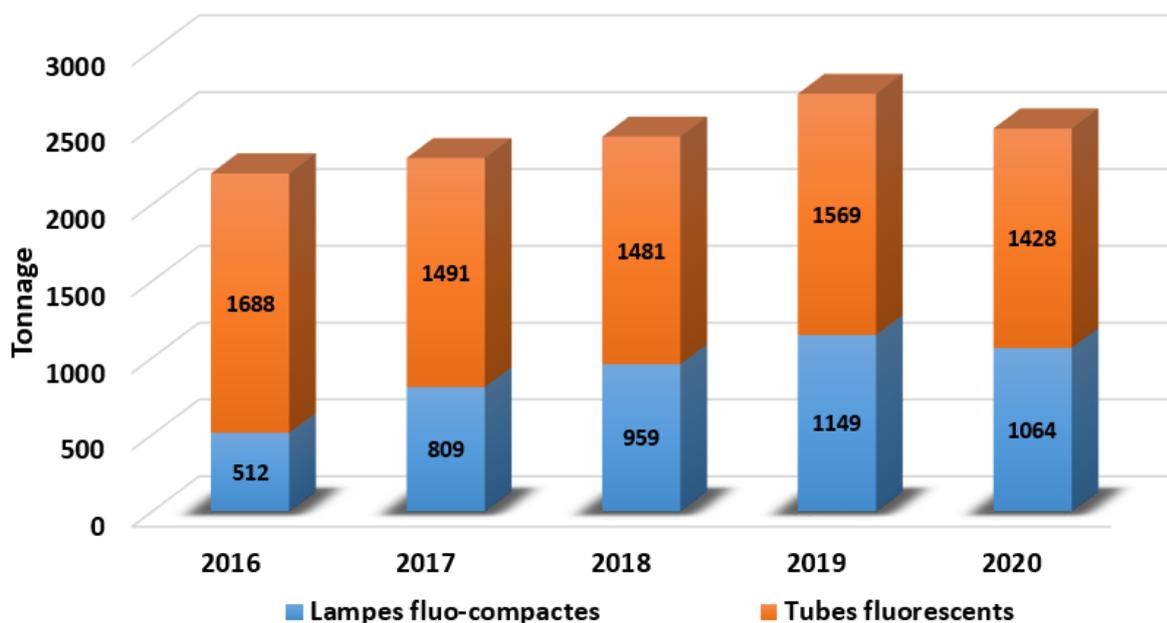


Figure A : Traitement annuel des sources lumineuses fluorescentes (ARTEMISE)

³ Light Emitting Diode.

ARTEMISE est une Installation Classée pour la Protection de l'Environnement (ICPE) qui est pleinement engagée en termes d'hygiène, de sécurité des personnes et d'environnement. Elle apporte continuellement des améliorations à son outil de production. L'entreprise assure le traitement de différents types de sources lumineuses : les tubes fluorescents, les lampes fluo-compactes (appelées communément CFL : Compact Fluorescent Light), les lampes HID (High Intensity Discharge), les lampes Sodium Basse Pression, les lampes halogènes, les lampes au xénon et les backlights, lampes dites de rétro-éclairage équipant les écrans de télévision. En parallèle à cette activité, ARTEMISE est agréée par l'Autorité de Sureté Nucléaire, pour la collecte et le démantèlement des détecteurs de fumée à chambre d'ionisation (DFCI), qui doivent être retirés des lignes de détection incendie des entreprises et des bâtiments publics, en fin d'année 2021.

Le marché va tendre, durant la décennie, vers la disparition des dispositifs d'éclairage dits traditionnels, pour laisser place aux systèmes d'éclairage à LED, qui de par leur évolution continue présentent des avantages indéniables :

- Durée de vie accrue ;
- Consommation moindre ;
- Meilleure efficacité lumineuse ;
- Eclairage intelligent ;
- Absence de composés mercuriels présents dans les dispositifs fluorescents.

ARTEMISE s'intéresse, par conséquent, à cette nouvelle technologie, afin d'anticiper ce nouveau marché de déchets pléthoriques et la baisse inéluctable de celui des dispositifs d'éclairage traditionnels, constituant le cœur de son activité, qui sont voués à disparaître. Par ailleurs, ARTEMISE est la vitrine française médiatique pour l'éco-organisme ECOSYSTEM [3], en tant qu'usine ultra-moderne de recyclage des lampes fluo-compactes et des tubes fluorescents. Cet éco-organisme, à but non lucratif, est agréé par les pouvoirs publics pour organiser la collecte et le recyclage des lampes usagées, des petits appareils extincteurs et des déchets d'équipements électriques et électroniques professionnels (DEEE Pro) du bâtiment, de l'industrie, de la recherche et du secteur médical. Il prévoit une disparition totale des dispositifs traditionnels, d'ici 2030 [3].

En outre, ECOSYSTEM estime que les lampes à LED représenteraient environ 1090 tonnes, en 2022. Une augmentation progressive du flux de lampes à LED atteindrait plus de 4000 tonnes en France, à partir de 2029. L'évolution prévisionnelle du flux de déchets des lampes à LED, entre 2019 et 2030, est présentée sur la Figure B. Cette projection a été réalisée par ECOSYSTEM (anciennement RECYLUM), en décembre 2017, lors de l'appel à projet du tri et du traitement des lampes à LED [3]. Indéniablement, ARTEMISE devrait se positionner sur ce futur marché, pour être en mesure de traiter 50% du gisement français, soit plus de 2000 tonnes, à partir de 2029. Des premières études ont déjà été réalisées sur l'analyse du cycle de vie des sources lumineuses [4]. Or à ce jour, il n'existe pas de procédé de recyclage dédié pour les dispositifs d'éclairage à LED. Le projet européen cycLED a permis de définir des pistes pour la séparation des matériaux terres rares des puces à LED, sans aboutir néanmoins à un procédé viable économiquement [5].

Aujourd'hui, l'objectif est simplement d'atteindre un taux de collecte imposé par les pouvoirs publics. Les systèmes d'éclairage à technologie LED suivent le même circuit de collecte que les lampes et tubes classiques et ne devrait pas être modifié, étant donné qu'il est déjà bien structuré. Par ailleurs, ECOSYSTEM mène une politique de communication, par le biais des bornes LUMIBOX et TUBIBOX dans les magasins de bricolage et dans les grandes surfaces, visant à sensibiliser les consommateurs aux problématiques environnementales. Cependant, faute de volumes de collecte suffisants et d'une technologie mature pour le traitement, à ce jour ceux-ci sont seulement stockés au sein de structures de traitement, telle que l'usine ARTEMISE [6]. Les quantités de lampes et de tubes à LED triées, puis stockées chez ARTEMISE, entre 2016 et 2020, sont représentées sur la Figure C. A terme, l'objectif est de trouver une solution technologique, viable économiquement, pour traiter ce nouveau gisement de déchets des dispositifs d'éclairage à technologie LED, en atteignant le taux réglementaire de recyclage fixé à 80%.

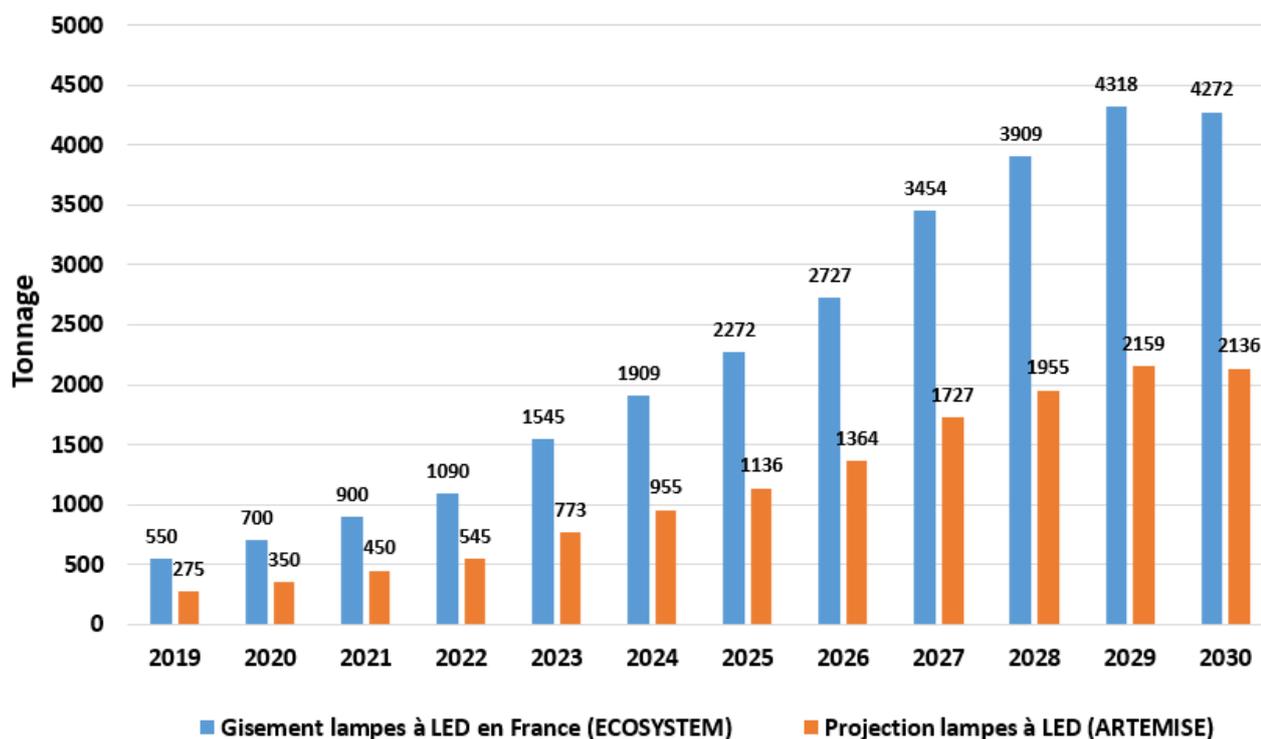


Figure B : Estimation de l'évolution du flux de déchets lampes à LED à horizon 2030 [3]

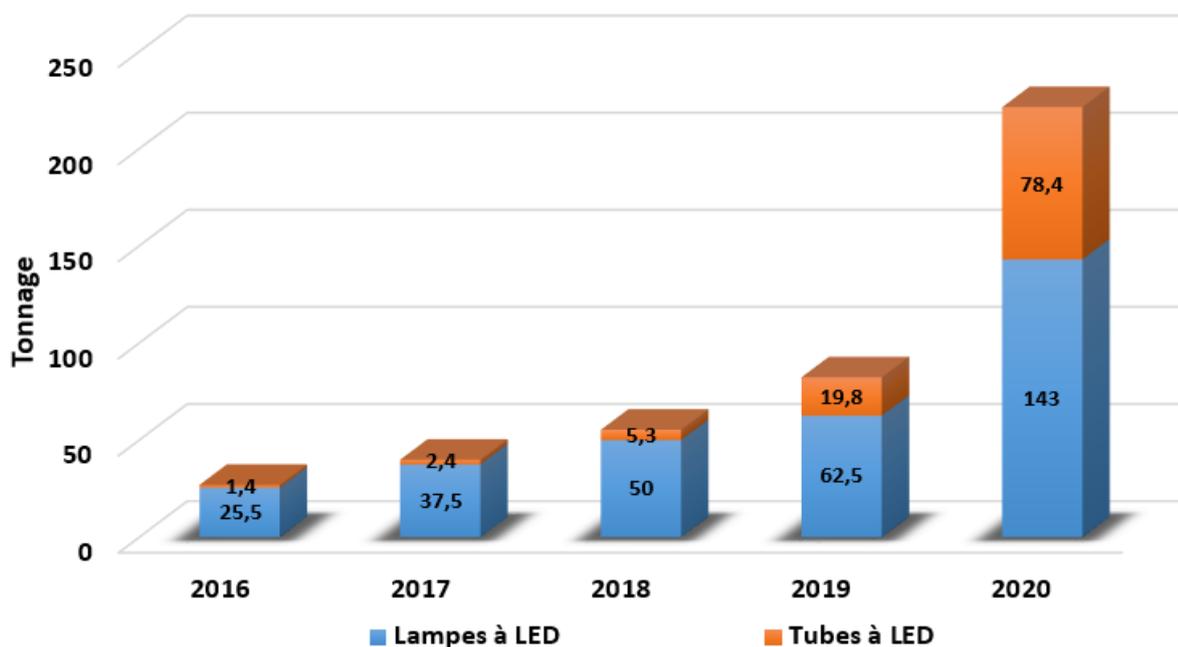


Figure C : Tonnages des systèmes d'éclairage à LED stockés chez ARTEMISE

En analysant la Figure C, nous constatons une croissance entre 2016 et 2020. D'une année N à une année N+1, les lampes augmentent de 47% à 129% et les tubes de 71% à 296%. Cette tendance ne pourrait que s'amplifier dans les années à venir, comme le prévoit l'éco-organisme. Dans la première moitié de la décennie, les dispositifs d'éclairage traditionnelles prédomineront, puis dans la seconde moitié les équipements à technologie LED seront majoritaires. A partir de 2022, selon ECOSYSTEM, plus de 1000 tonnes annuelles de lampes à LED seraient collectées dans l'hexagone et plus de 500 tonnes seraient potentiellement valorisées par ARTEMISE [3].

C'est dans ce contexte que la société ARTEMISE a recherché un partenaire académique en contactant, en 2016, l'institut Charles Delaunay de l'Université de Technologie de Troyes (UTT). L'objectif était de trouver un pôle d'expertise, par l'entremise du projet de recherche et développement régional RECYLED⁴, concernant les composants à technologie LED. Mon travail de thèse, associé à ce projet et financé par ARTEMISE dans le cadre d'une bourse CIFRE, s'inscrit dans le développement d'une filière de recyclage de ces dispositifs à LED, dans une démarche de circuit court. Il vise à déterminer, par une approche globale, une méthodologie pour valoriser la fin de vie de ces nouveaux dispositifs à LED, en prenant en compte les aspects environnementaux, technologiques et économiques. La problématique de la thèse sera d'identifier des technologies efficaces de séparation de ces dispositifs en sous-ensembles, afin de préserver l'intégrité physique de leurs composants électroniques et donc de majorer leur valeur commerciale, auprès des entreprises du recyclage. Pour répondre à cette problématique industrielle, nous proposons de décomposer ce manuscrit en quatre chapitres.

Le **chapitre 1** expose le contexte de cette étude, en commençant par une présentation de la technologie LED, plus particulièrement les différentes typologies de puces à LED et leur composition matière. Nous introduisons le projet RECYLED, puis notre attention se portera sur l'état de l'art du recyclage des équipements à LED, de manière à positionner la problématique. Nous concluons ce premier chapitre par le développement de l'éclairage à LED.

Le **chapitre 2** est consacré aux études du gisement des déchets actuels, de lampes et de tubes à LED, mais aussi des déchets futurs de lampes et de dalles à LED. Une partie du chapitre sera spécifiquement consacrée aux bilans massiques, afin d'estimer les quantités de fractions de matériaux et de composants électroniques disponibles. Dans le cadre de nos travaux, ces caractérisations permettront d'extrapoler le gisement, jusqu'à la fin de la décennie. Nous terminerons par le potentiel de valorisation, afin d'orienter l'outil industriel et l'expertise de l'entreprise, sur les fractions à haute valeur marchande en seconde vie et par conséquent d'améliorer et pérenniser sa gouvernance.

Le **chapitre 3** est dédié aux techniques de déconstruction des dispositifs à LED, par l'adaptation de solutions existantes. La technologie de fragmentation sélective, par les hautes tensions, est identifiée pour les lampes et spots. Après avoir détaillé les principes de fonctionnement des fragmentations électrodynamique et électrohydraulique, nous présenterons les études paramétriques de déconstruction des équipements à LED, par la technologie des puissances pulsées, avec les machines laboratoires XCRUSHER et SELFRAG Lab ainsi qu'avec l'outil pré-industriel IMPULSTEC. Nous observerons l'impact des paramètres de tension et du nombre de pulses, afin d'identifier expérimentalement les zones des fragmentations sélectives favorables. Une analyse spécifique sera apportée à la libération des éléments, à l'état des corps et des composants électroniques. Ces études permettront d'établir le potentiel et les limites de la technologie à désassembler les dispositifs à LED. Concernant les tubes à LED, nous adapterons une technologie purement mécanique et automatisée de découpe des dispositifs, en tronçons, puis de leur broyage.

Le **chapitre 4** a pour objectif de valider la pertinence de la technologie de fragmentation sélective, identifiée dans le chapitre 3, afin de déconstruire les dispositifs en sous-ensembles, tout en préservant à la fois leur intégrité physique et fonctionnelle, pour la fabrication de nouveaux systèmes d'éclairage. Nous présenterons tout d'abord la caractérisation des plastiques constitutifs des dispositifs, puis les taux de valorisation des différentes technologies à LED. La composition des puces LEDs, sur leur plateau, mérite de focaliser nos analyses sur l'extraction des métaux précieux, afin de créer une filière de traitement dédiée. Notre intérêt sera porté sur le potentiel de valorisation, avec l'exemple des lampes E27 en plastique. Enfin, nous concluons par la richesse du flux de matières de cette nouvelle catégorie de déchets d'équipements électriques et électroniques.

⁴ RECYclage des dispositifs d'éclairage à LED : projet de recherche et développement régional soutenu par la région Grand EST (Alsace, Champagne-Ardenne et Lorraine) et par le FEDER (Fonds Européen de Développement Régional) (D201509469).

CHAPITRE 1

Projets R&D de valorisation des LEDs

1.1. Introduction

Depuis l'apparition de l'espèce humaine, l'utilisation du feu ou des objets chauffés émettant de la lumière ont été usités à des fins d'éclairage : l'éclairage artificiel était né. Depuis la fin du XIX^{ème} siècle, celui-ci a fait l'objet d'une évolution continue et fascinante. Les ingénieurs et les scientifiques du monde entier ont créé et développé une large gamme de solutions d'éclairage, adaptée à tous les types d'application. Aujourd'hui, l'importance et l'application de ces technologies traditionnelles diminuent. Depuis les années 2010, l'éclairage basé sur les semi-conducteurs (LED, OLED et lasers à semi-conducteurs) défie les technologies conventionnelles. La LED en particulier, prédomine au détriment des technologies classiques. Par conséquent, à la fin de la décennie, l'ensemble de l'éclairage serait exclusivement basé sur les LEDs et OLEDs. Si cette révolution aboutissait à la conclusion prévue en remplaçant toutes les technologies existantes, cela induirait un changement majeur sur le marché de l'éclairage. Le marché de la lumière artificielle absorbe 19% de la production annuelle mondiale d'électricité. Conséquemment, l'axe de recherche principal du XX^{ème} siècle visait à améliorer l'efficacité énergétique. Depuis, les paradigmes ont été revus et l'industrie a inventé un nouveau terme « l'éclairage biodynamique centré sur l'humain », visant à respecter le rythme circadien et les besoins des utilisateurs.

Nous assistons désormais à une transition des technologies d'éclairage « analogiques » conventionnelles, vers l'éclairage « numérique ». C'est tout naturellement que des acteurs industriels mais aussi académiques se sont, en conséquence, intéressés à la fin de vie de cette nouvelle technologie des semi-conducteurs, en initiant des projets de recherche.

1.2. La technologie LED

Les lampes à LED ont commencé à être mises sur le marché, au début des années 2000. Elles présentent des avantages certains par rapport aux lampes fluo-compactes CFL, telles qu'une meilleure durée de vie (15000 à 20000 heures contre 6000), une consommation moindre (5 W contre 18 W) et une meilleure efficacité lumineuse. Par ailleurs, elles équipent des dispositifs d'éclairage intelligents et ne contiennent pas de substances polluantes mercurielles. L'émergence de cette nouvelle technologie des semi-conducteurs permet un gain remarquable, en consommation énergétique, évalué entre 70% à 90%, tout en assurant la même fonction d'usage [4] [6]. De par ces caractéristiques, les équipements à LED sont plus vertueux pour l'environnement.

1.2.1. Présentation générale

De nombreux dispositifs de lampes à LED sont mis sur le marché. La Figure 1-1 ci-dessous, illustre toute la complexité de l'une d'entre elles, représentant 38% du gisement (cf. chapitre 2). Ces produits à LED se caractérisent par la présence d'une carte électronique⁵ localisée à l'intérieur du corps et/ou du culot (qui pilote la ou les puces LEDs, appelée communément chips LEDs) et des LEDs ou pastilles de LEDs placées sur un circuit imprimé. Cependant, une seule LED n'est pas suffisante généralement pour émettre de la lumière, à l'instar des ampoules incandescentes, en raison de la nature spécifique de concentration lumineuse. C'est pourquoi, un système multi LEDs est nécessaire, où plusieurs LEDs sont connectées en série ou en parallèles, ou encore en série-parallèle, pour produire une lumière diffuse, comme dans les ampoules conventionnelles. Ces lampes existent en tension nominale de 220-240 V, mais également en basse tension de 12-24 V.

⁵ Driver ou PCB (Printed Circuit Board).

Les évolutions technologiques, de ces dernières années, ont permis une multitude d'application industrielle, tels que des luminaires, des spots encastrables, des dalles, des projecteurs ou encore des rubans de LEDs. Ces applications sont très vastes, allant de la simple décoration d'intérieure, d'une lumière tamisée par exemple, à un éclairage industriel de forte intensité lumineuse.



Figure 1-1 : Composition d'une lampe E27 à technologie LED [3]

La partie la plus intéressante à recycler économiquement est le plateau de puces à LED, qui représente la valeur marchande du produit [3]. Une des pistes de recherche dans le travail de thèse CIFRE, associée au projet RECYLED, consiste à identifier le ou les procédés adéquats pour la réutilisation et/ou le recyclage du composant à LED. Plus spécifiquement, il s'agit, au niveau expérimental, de mettre au point une technique d'analyse permettant d'évaluer le temps d'utilisation du composant à LED et en conséquence d'estimer sa durée de vie résiduelle. L'objectif est de mesurer la température de jonction, ainsi que le spectre d'émission de la LED. Ces deux grandeurs physiques permettront d'évaluer l'état du composant (effet de vieillissement), mais aussi sa capacité de réutilisation potentielle.

L'objectif est d'aboutir au démantèlement du composant et à la qualification de ses constituants élémentaires, à partir des big-bags de lampes et des caisses de tubes à LED, collectés par ECOSYSTEM puis triés et stockés dans l'usine ARTEMISE.

Le travail scientifique consiste à mettre en place un protocole expérimental, en réalisant les essais sur un échantillonnage représentatif des dispositifs à LED, puis en déduire un modèle analytique représentant le phénomène physique, pouvant prévoir l'évolution du système d'éclairage (puces à LED). A charge nominale, la température de jonction d'une LED influence son spectre d'émission. Plus la température est faible et plus le flux lumineux est élevé. Inversement, le flux lumineux décroît significativement en augmentant la température de jonction, comme schématisé sur la Figure 1-2. La température ambiante pourrait dès lors avoir une incidence sur le spectre lumineux. Le défi est double aujourd'hui :

- D'une part de mettre en place une industrialisation du recyclage des équipements d'éclairage à LED, en atteignant un taux de valorisation matière de 80%, objectif réglementaire imposé par les pouvoirs publics, représentés par l'éco-organisme ECOSYSTEM ;

- Et d'autre part d'extraire les métaux stratégiques et les terres rares présents dans les composants électroniques, à partir des cartes électroniques et des plateaux de puces à LED.

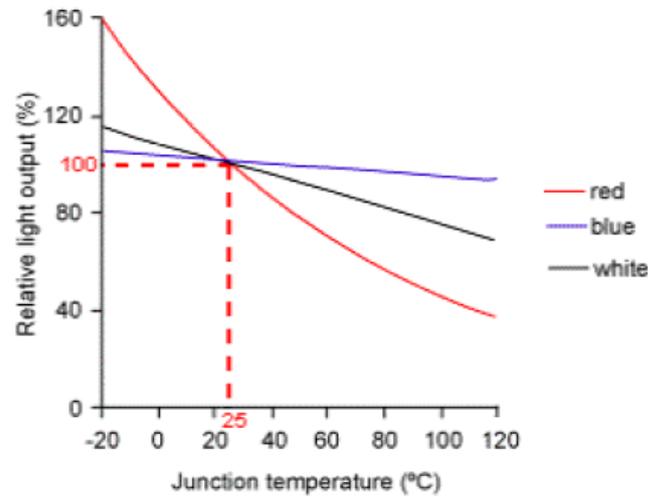


Figure 1-2 : Représentation schématique de la température de jonction en fonction du spectre d'émission, d'une puce à LED [7]

1.2.2. Les typologies de puces à LED

Il existe une grande diversité de typologies de puces à LED avec des puissances variées, de par l'évolution permanente de la technologie des semi-conducteurs et l'explosion du marché des dispositifs à LED, depuis une dizaine d'années. Différentes technologies de LEDs ont été mises au point, avec des caractéristiques différentes en fonction de leurs coûts, de leurs puissances et de leurs tailles [3]. La Figure 1-3 schématise le principe d'une puce à LED.

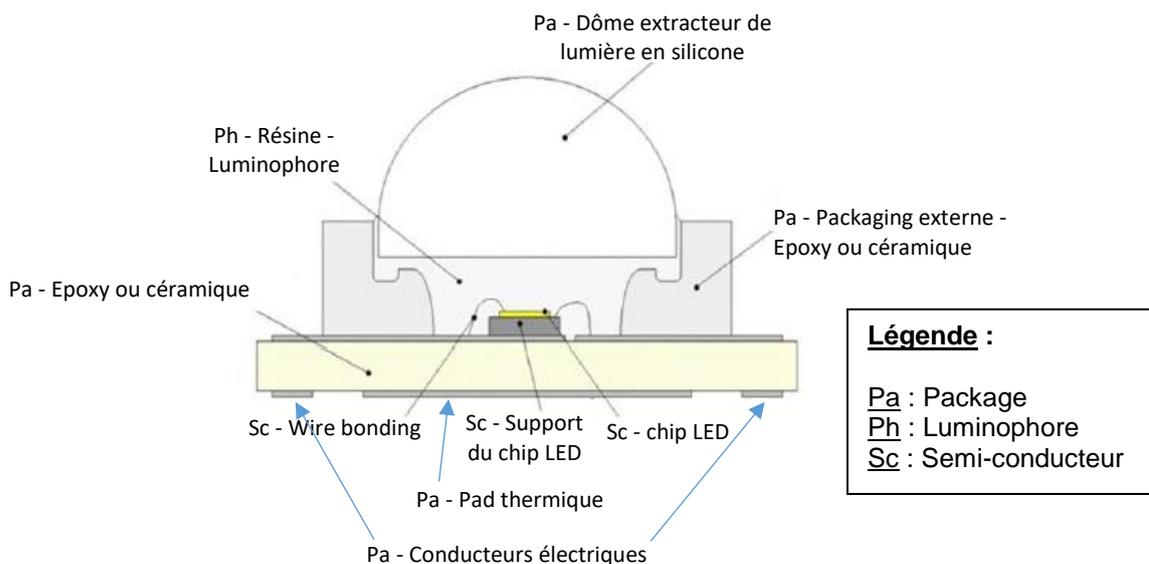


Figure 1-3 : Représentation schématique d'une puce à LED (adaptée d'après [3])

La puce LED est composée :

- Du dôme extracteur de lumière en silicone (package) ;
- De la résine luminescente ;
- Du matériau semi-conducteur.

Les caractéristiques et les matériaux constitutifs sont répertoriés dans le Tableau 1-1 ci-dessous :

Elément	Composition et caractéristiques	Matériaux constitutifs
Package	- Dôme extracteur de lumière en silicone : boîtier transparent ou coloré qui permet de diriger la lumière ; - Packaging externe ; - Conducteurs électriques ; - Pad thermique qui permet de dissiper la chaleur.	Cuivre, Titane, Cadmium, Vanadium, Plomb, Rhodium, Germanium, Tungstène
Résine luminescente	- Elle permet la conversion de la lumière bleue en lumière blanche ; - La constitution des luminophores est confidentielle d'un point de vue fabrication (brevets associés). Toutefois, leur constitution n'est pas inconnue, elle est fonction du fabricant et de la qualité de la lumière émise souhaitée. Elle varie également, lorsqu'il s'agit de réaliser des composants à très bas coûts.	Yttrium, Strontium, Lutécium, Europium, Gadolinium, Terbium, Cerium
Semi-conducteur	- Chip LED (émettrice de lumière) : empilement de couches semi-conductrices sur un substrat en saphir ou en carbure de silicium (SiC) ; - Support chip LED ; - Wire bonding (fil de raccordement électrique).	Or, Nickel, Gallium, Argent, Palladium, Arsenic, Indium, Platine, Sélénium

Tableau 1-1 : Composition des puces à LED [3]

Nous distinguons plusieurs classifications de puces à LED mises sur le marché, aujourd'hui :

- **Puces à LED DIP**



Figure 1-4 : Puces à LED DIP [8]

Les puces à LED DIP (Dual In-line Package) sont des LEDs de basse puissance (environ 0,06 W) développées en 1962, par Nick HOLONYAK. Elles ont une forme arrondie et deux longues pattes qui sont soudées sur un circuit PCB. Elles sont présentées sur la Figure 1-4. En théorie, la durée de vie des DIP est de 50 000 heures, mais en réalité elle est estimée entre 10 000 et 15 000 heures [8] [9].

Ces puces à LED se trouvent dans des dispositifs d'éclairage de faibles puissances, ayant un angle de diffusion réduit. Ce type de puces n'est donc pas adapté pour l'éclairage principal d'une pièce à vivre en plafonnier, mais plutôt aux éclairages tamisés ou directionnels pour la mise en valeur des objets de décoration, par exemple [8] [9].

▪ **Puces à LED SMD**

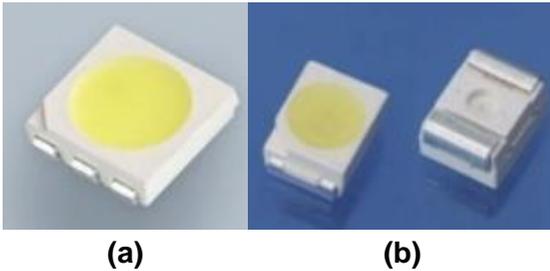


Figure 1-5 : Puces à LED SMD 5050 (a) et 3028 (b) [8]

Les puces à LED SMD (Surface Mounted Device) sont les plus répandues. Le composant est désigné sous la forme SMD 5050 ou SMD 3028 (cf. Figure 1-5). Les références correspondent aux dimensions du composant électronique. SMD 5050 signifie que la puce a une taille de 5,0 mm x 5,0 mm et une puissance de 0,5 W. Et SMD 3028 signifie que la puce a une taille de 3,0 mm x 2,8 mm et une puissance de 0,2 W [8] [9].

Leur durée de vie est supérieure à 50 000 heures (plus longue que celles des puces DIP). Elles trouvent de multiples applications dans les éclairages domestiques : plafonnier, applique, éclairage ornemental, etc. Elles utilisent des composants très fins (moins de 1 mm d'épaisseur), montés en surface de circuits imprimés. Grâce à leur capacité à pouvoir choisir la couleur émise, en ajustant la sortie des trois diodes individuelles, les puces SMD ont joué un rôle clé dans le développement de la technologie LED. Elles offrent le meilleur rapport puissance d'éclairage-prix, avec un rendement lumineux proche de 80 lm/W [8] [9].

▪ **Puces à LED à Haute Puissance**



Figure 1-6 : Puces à LED de forte puissance [8]

Les puces à LED à Haute Puissance (High Power) ont une luminosité très élevée (cf. Figure 1-6). Cependant, elles sont moins utilisées en raison de leur prix élevé. Elles sont conçues pour produire plus de lumière que la puce LED SMD ou DIP, afin de réaliser des équipements puissants et plus petits. La haute puissance est définie au-delà de 0,65 W. Les puces à LED de forte puissance les plus usitées sont de 1 W, 2 W et 3 W [8] [9].

Les puces à LED de type High Power utilisent la technologie SMD, à laquelle s'ajoutent des lentilles optiques, afin de renforcer l'intensité lumineuse émise par la LED. Les systèmes utilisant ce type de puces à LED offrent, dès lors, une lumière de forte intensité, avec un très bon rendement lumineux. L'inconvénient de cette technologie est l'angle d'éclairage très réduit. Ces puces sont donc privilégiées dans les spots à éclairage directionnels. Leur durée de vie est estimée à 50 000 heures et elles ont de nombreux domaines d'application, tels que les éclairages domestiques, professionnel et public [8] [9].

▪ **Puces à LED COB**



Figure 1-7 : Puce à LED COB [8]

Les puces à LED COB (Chip On Board) ont été développées récemment. Cette technologie de LED se distingue de la LED traditionnelle (puces à LED SMD individuelles soudées sur une carte de circuit imprimé et montées sur un dissipateur), par des plaques découpées, dans une centaine de petites puces d'épaisseur 250 pm. Ces cristaux semi-conducteurs sont directement liés à un substrat d'aluminium, pour garantir une diffusion optimale de la chaleur et une fabrication sans soudure [8] [9]. Une puce à LED COB est présentée sur la Figure 1-7.

Cette technologie permet de positionner soixante-dix puces par cm^2 . Cela garantit un fort rendement lumineux, dans une petite zone. La Figure 1-7 représente une puce LEDs COB d'une puissance de 30 W. Au début de l'invention de la LED, les scientifiques s'étaient questionnés sur la capacité des LEDs à remplacer l'éclairage traditionnel de forte puissance, 500 W ou plus. Cette technologie rend désormais possible la substitution de l'éclairage standard à forte puissance, par des puces à LED de 10 W, 20 W, 50 W et même 100 W, dans des systèmes de petites tailles. Les LEDs de type COB sont les plus performantes. Il y a un unique point d'émission de lumière très puissant et particulièrement performant dans les spots. Selon la forme du dispositif, l'angle d'éclairage est très différent d'un système à un autre, ce qui confère à cette technologie de multiples applications, tant en intérieur qu'en extérieur. Le prix, quant à lui très élevé, devient peu à peu abordable pour les consommateurs [8] [9].

▪ Puces à LED COG



Figure 1-8 : Puces à LED à filaments [3]

Les puces à LED COG (Chip On Glass) ou à filaments sont fabriquées depuis 2014. Contrairement aux premières générations de puces à LED, qui sont déposées sur un substrat, ces puces à LED COG sont encapsulées autour d'une colonne de verre ou de saphir, puis recouvertes de résine luminescente. Elles sont reliées grâce à des fils d'or et un film conducteur anisotropique. La puce à LED COG réduit significativement la surface nécessaire pour assembler le dispositif. Elle offre des densités de composants sur une petite surface des plus élevées. La fabrication de cette technologie est plus simple et par conséquent moins coûteuse. La puissance de ces puces est en moyenne de 7 W équivalent à 40 W, d'un système d'éclairage traditionnel [10].

Les dispositifs d'éclairage reposant sur cette technologie sont les lampes à LED à filaments. La Figure 1-8 illustre cette typologie de lampe. Les puces mesurent environ 35 mm et imitent les ampoules à incandescence. La disposition des filaments est très esthétique et surannée. Elle rappelle les ampoules d'antan pour une décoration vintage. Leur avantage premier est un angle d'éclairage à 300° pour un meilleur confort [10]. De nombreux autres avantages peuvent être recensés pour cette nouvelle technologie de puce COG :

- Design compact avec des densités extrêmement élevées des composants ;
- Capacité à traiter des signaux à hautes vitesses et hautes fréquences ;
- Une grande fiabilité en raison du peu de joints de soudure ;
- Meilleure dissipation de la chaleur, grâce au substrat en verre ;
- Procédés d'industrialisation simples et peu coûteux ;
- Constante évolution grâce à l'utilisation de motifs de plus en plus fins, de hauteurs différentes et de formes ornementales.

La puce à LED est un système d'éclairage complexe, utilisé dans de nombreux appareils et domaines d'application, avec des technologies toujours plus performantes, des durées de vie accrues, une intensité lumineuse toujours plus importante et une réduction de la taille des composants [10]. Nous pouvons désormais nous poser la question quant à la composition matière de ces puces à LED.

1.2.3. La composition matière des puces à LED

Au regard de la diversité et donc de la richesse des puces à LED, ECOSYSTEM s'est intéressé à leur composition. Il a mandaté une étude prospective (confidentielle), en décembre 2017, afin d'évaluer les volumes des matériaux et des composés chimiques, entrant dans la composition de ces puces à LED. Le périmètre de cette étude concernait les lampes, spots et tubes à LED rétrofits. Les luminaires, tels que les dalles à LED, les projecteurs à forte intensité, etc. n'ont pas été considérés. L'estimation de l'évolution de la composition des lampes à LED, entre 2020 et 2027, est répertoriée dans le Tableau 1-2. Notons qu'aucune information nous a été communiquée, sur les hypothèses prises en compte dans cette étude, concernant l'évolution de la technologie des puces à LED. Nous constatons que l'évolution des quantités de métaux précieux, or et argent, est appréciée respectivement à 218% et 213%. Etant donné le cours des matériaux, 51 451,00 € le kg d'or et 593,18 € le kg d'argent (source Magazine RECYCLAGE RECUPERATION N°38 du 16 novembre 2020 [11]), des filières de traitement des puces à LED seront créées, en cours de la décennie. La valorisation de ce potentiel de richesse est considérée sur les plans environnementaux, technologiques et économiques.

Matériau	2020	2027 Croissance (%)
Or (kg)	33	105 +218%
Argent (kg)	31	97 +213%
Cuivre (kg)	4 250	13 400 +215%
Indium et Gallium (kg)	4,3	14 +226%
Terre Rares (kg)	70	226 +223%
Autres (kg)	26	82 +215%

Tableau 1-2 : Evolution des matériaux stratégiques des puces LEDs à recycler, entre 2020 et 2027 [3]

Ces données ont été évaluées pour 100% du gisement collecté dont la composition est inégale selon les matériaux [3] :

- Précieux (or et argent)
- Cuivreux (cuivre)
- Terre rares et matériaux utilisés à l'état de traces ou de dopants

La répartition de l'Indium et du Gallium est :

- 97,5% Gallium
- 2,5% Indium

La répartition des matériaux constitutifs des luminophores est :

- 50,7% Yttrium
- 31,4% Strontium
- 13,2% Lutecium
- 1,9% Europium
- 0,6% Gadolinium
- 1,6% Terbium
- 0,6% Cérium

La répartition des autres matériaux est :

- 71,2% Titane
- 4% Vanadium
- 0,1% Tungstène
- 24,4% Nickel
- 0,03% Platine
- 0,2% Sélénium

En analysant cette étude d'ECOSYSTEM, les quantités des matériaux à recycler augmenteraient de façon considérable, à partir de 2022-2023 [3]. A partir des données du Tableau 1-2, nous constatons qu'entre 2020 et 2027, les quantités vont croître d'un facteur 3 et celles des déchets de lampes à LED d'un facteur 5 (700 tonnes en 2020 et 3454 tonnes en 2027, cf. Figure B). L'effet volumétrique ou de massification permettrait d'envisager des opportunités de recyclage des matériaux constitutifs des puces à LED. Aujourd'hui, la filière de traitement est inexistante. Cependant durant la prochaine décennie, le gisement des métaux précieux (or et argent) et stratégiques, disponible va créer ce nouveau marché, afin de recycler ces éléments, pour la fabrication de nouvelles puces à LED ou pour d'autres produits industriels. Le potentiel de ce marché émergent va susciter des convoitises de la part des industriels. Ils vont essayer de mettre en place des lignes de traitement rentables, pour valoriser ce nouveau type de gisement et extraire les métaux stratégiques des puces à LED. Intéressons-nous, dès lors, à ces projets de recherche et développement.

1.3. Le projet RECYLED

La thèse, associée au projet RECYLED, consiste à identifier une méthode et un procédé de traitement des dispositifs d'éclairage à LED (lampes, tubes et luminaires). La méthodologie repose sur une approche globale. Nous considérons des critères environnementaux, technologiques et économiques, en fonction des typologies, en vue d'une valorisation des composants électroniques, en particulier leur réutilisation. Ces composants sont les puces à LED (responsables de l'émission lumineuse) et les cartes électroniques (responsables de l'alimentation électrique). L'objectif réglementaire, imposé par l'éco-organisme ECOSYSTEM, est d'atteindre un taux de recyclage de 80% dans le cadre de la Directive européenne 2012/19/EU du 4 juillet 2012 relative aux DEEE. De ce fait, la société ARTEMISE, prestataire d'ECOSYSTEM, s'est rapprochée de deux entités de l'Institut Charles Delaunay, de l'Université de Technologie de Troyes, pour initier un projet doctoral :

- Le L2n : Lumière, Nanomatériaux, Nanotechnologies (ex LNIO)
- Le InSyTE : Unité de recherche interdisciplinaire Société-Technologie-Environnement (ex CREIDD)

1.3.1. L'organisation du projet RECYLED

Ce projet de thèse CIFRE est stratégique pour l'entreprise, puisqu'il lui permet à la fois de diversifier, mais aussi de pérenniser son activité à plus long terme. Par ailleurs, l'enjeu environnemental est primordial, puisqu'il s'agit de proposer des voies de valorisation et de recyclage pour des déchets entrant dans la catégorie des DEEE (Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques). Actuellement, ces déchets LEDs n'ont pas de solution de traitement adaptée ou économiquement viable. Le succès du projet doctoral devrait permettre d'une part de maintenir et d'autre part de développer l'emploi au sein de la société ARTEMISE, par le biais de la mise en place d'une activité à plus forte valeur ajoutée que le recyclage seul. Le potentiel de réutilisation des composants électroniques (chips à LED et drivers) nous permet de retenir ce scénario développé dans le cadre du projet RECYLED [6].

Le projet RECYLED est structuré en trois phases, dont le synoptique est présenté ci-dessous :

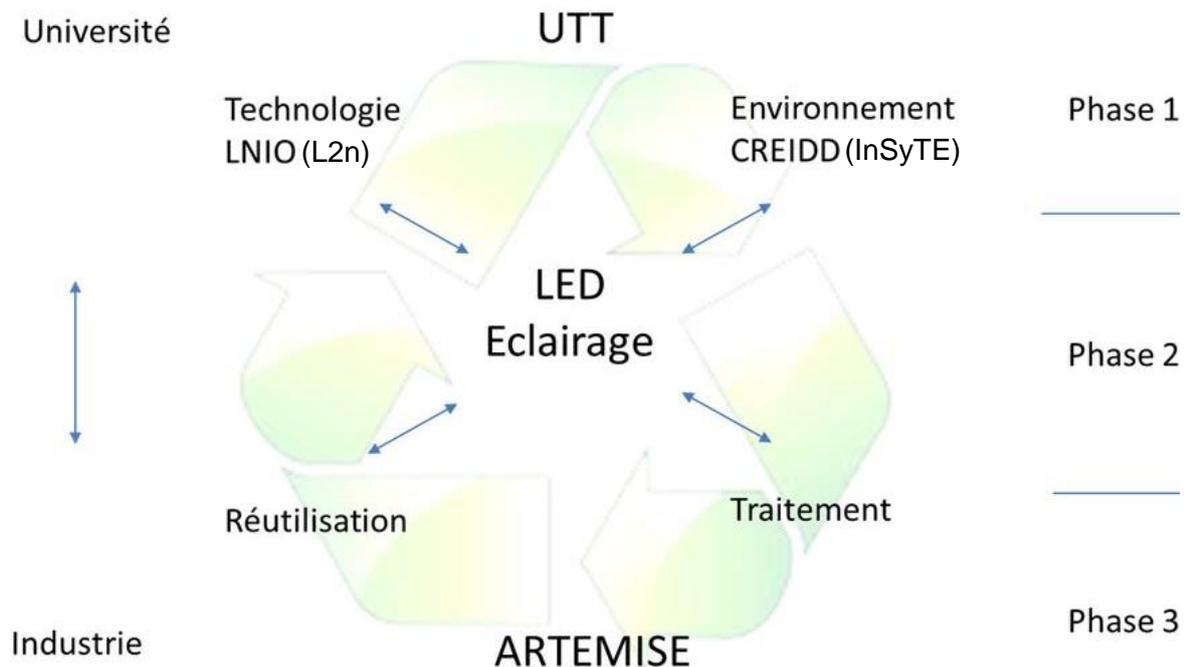


Figure 1-9 : Synoptique du projet RECYLED (projet R&D régional) [12]

La Figure 1-9 présente la structuration du projet RECYLED, avec un fort partenariat universitaire et industriel. Les trois phases du projet sont décomposées de la manière suivante [13] :

Phase 1 : Etudes préliminaires

- Tâche 1 - Etat de l'art sur le recyclage des LEDs
- Tâche 2 - Base de données des constructeurs et technologies actuelles, des dispositifs d'éclairage à LED
- Tâche 3 - Analyse fine des constituants du composant électronique
- Tâche 4 - Etat de l'art sur la technologie LED et les évolutions attendues
- Tâche 5 - Cartographies des acteurs du recyclage des composants

Phase 2 : Etudes des différents scénarii de recyclage et des modèles économiques associés

- Tâche 1 - Faisabilité de la réutilisation du composant LED
- Tâche 2 - Faisabilité du démantèlement du composant LED en constituants élémentaires
- Tâche 3 - Voies de valorisation des autres constituants du dispositif d'éclairage
- Tâche 4 - Modèles économiques

Phase 3 : Mise en œuvre de la chaîne de traitement/recyclage

- Tâche 1 - Elaboration du cahier des charges
- Tâche 2 - Réalisation des briques technologiques permettant de démontrer la faisabilité des procédés de traitement à l'échelle industrielle
- Tâche 3 - Mise en place et tests des prototypes, avant réalisation de l'outil industriel
- Tâche 4 - Réalisation d'un produit démonstrateur

Durant le projet, des collaborations ont été mises en place avec les Arts et Métiers ParisTech - Institut ENSAM de Chambéry, pour le traitement des flux de matières, avec l'entreprise IMPULSTEC et le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), pour des études paramétriques sur la déconstruction des équipements à LED par la technologie des puissances pulsées et avec l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Paris, pour l'extraction des métaux précieux (Or, argent, étain, cuivre, etc.).

L'objectif de la thèse visait à développer un procédé industriel de traitement des lampes et des tubes à LED permettant :

- La réutilisation des lampes à LED encore fonctionnelles (définir une limite inférieure de lumens/watt, au-delà de laquelle le composant ne peut pas être réutilisé) ;
- La fragmentation sélective des dispositifs à LED en sous-ensembles, en préservant leur intégrité physique et/ou fonctionnelle ;
- La réutilisation des composants électroniques potentiellement fonctionnels (les puces à LED et les drivers) ;
- La valorisation des matériaux constitutifs des systèmes optiques et des corps.

Le projet RECYLED lancé en mai 2016, prévoyait initialement deux thèses, une première UTT-L2n orientée matériaux et une seconde UTT-InSyTE orientée environnement [6]. Malheureusement, l'aide de la région Grand EST n'a pas permis la mise en place de ces deux thèses. De ce fait, seule une thèse tripartite ARTEMISE-L2n-InSyTE a été retenue, dont l'intitulé est le suivant : « **Valorisation des systèmes d'éclairage à LED en fin de vie** ».

A l'issue du projet RECYLED, l'objectif est une valorisation industrielle par la mise en place d'une unité de démantèlement de lampes et de luminaires à LED, au sein de l'entreprise ARTEMISE. L'outil de traitement sera réalisé avec la collaboration de partenaires industriels : SELFRAG ou IMPULSTEC, TOMRA, PELLENC ST, LEDVANCE, ABSCISSE INGENIERIE, ALFYMA, BEN-SA, GRILLET, LENOIR, etc. Des lignes industrielles sont présentées dans le chapitre 4.

1.3.2. L'étude des différents scénarii de recyclage

La thèse consiste à comprendre puis à identifier une méthode et un procédé de traitement des équipements d'éclairage à technologie LED (lampes, tubes, etc.), en fonction de leur typologie, dans l'objectif d'une valorisation et d'une réutilisation de certains composants élémentaires. Plusieurs possibilités technologiques et scientifiques ont été identifiées, illustrées sur la Figure 1-10 [6]. Les pistes de valorisation sont multiples :

- La réutilisation de l'équipement dans sa totalité, sans traitement ;
- La récupération du composant, avec une technologie permettant un désassemblage sans endommager celui-ci ;
- La garantie de l'intégrité du composant, effet de vieillissement, etc. ;
- La récupération des matériaux constitutifs du composant, lorsque celui-ci est endommagé.

Ces pistes de valorisation reposent sur des aspects à la fois économiques, environnementaux et technologiques. Nous souhaitons accentuer l'approche de l'économie circulaire, en intégrant une double démarche de réutilisation. L'objectif est non seulement la réutilisation intégrale des équipements à LED arrivant en déchets dont une fraction est encore fonctionnelle, mais aussi celle de leurs composants électroniques récupérés après le traitement de désassemblage. En intégrant ce nouveau paradigme, les durées de vie de ces dispositifs et de leurs composants sont allongées, ce qui diminue leurs empreintes écologiques.

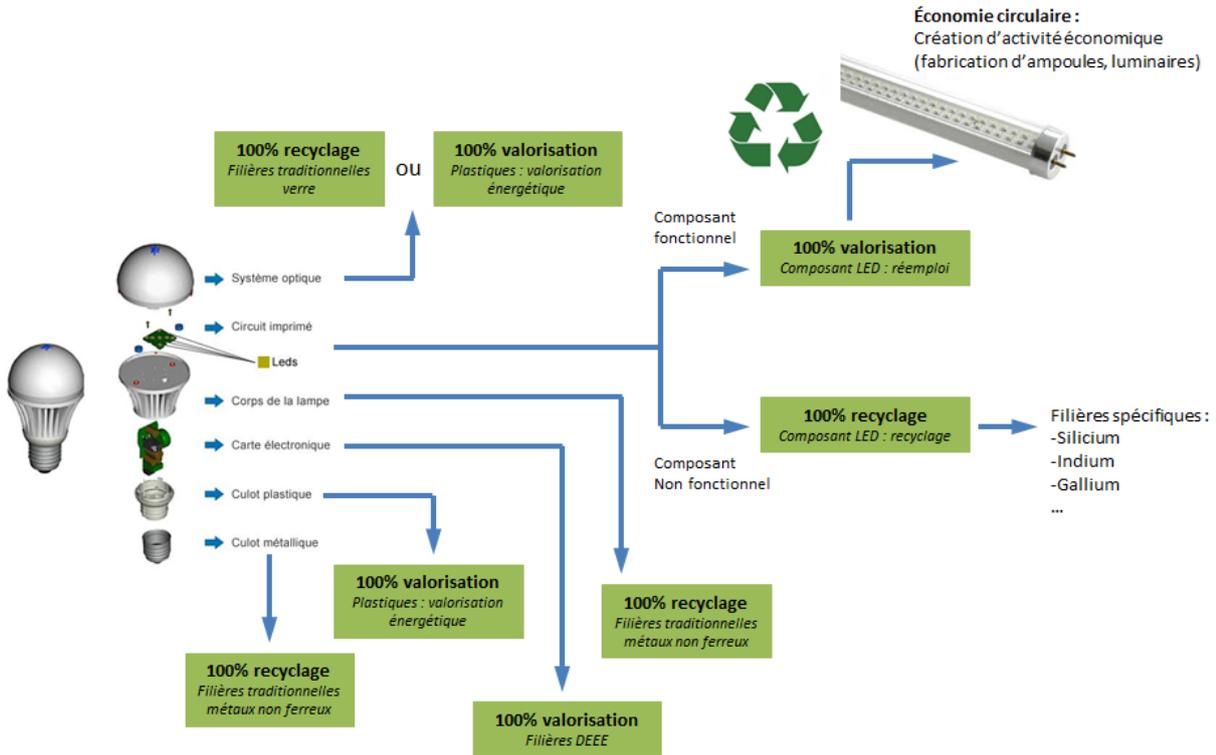
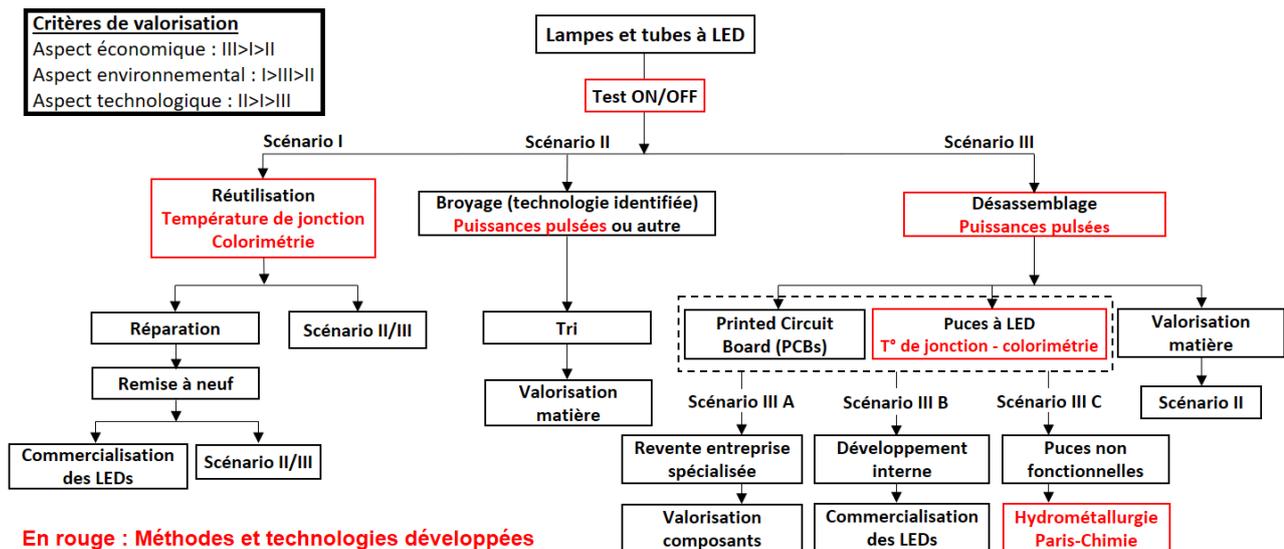


Figure 1-10 : Schéma des pistes de valorisation envisagées [6]

Par conséquent, trois scénarii ont été déterminés pour la valorisation des lampes et des tubes à LED. La Figure 1-11 schématise les scénarii étudiés dans le cadre du projet RECYLED :

- Scénario I : La réutilisation des lampes et des tubes à LED non endommagés ;
- Scénario II : Le déchetage/broyage des lampes et des tubes à LED, en vue de la valorisation des matériaux constitutifs ;
- Scénario III : Le désassemblage des lampes et des tubes à LED, pour la réutilisation des composants électroniques, notamment des puces à LED.



En rouge : Méthodes et technologies développées

Figure 1-11 : Différents scénarii envisagés et procédés associés pour le recyclage des lampes à LED [13]

Le **scénario I** semble très intéressant, d'un point de vue économique et environnemental, puisqu'il s'agit de remettre sur le marché des lampes et des tubes à LED ayant déjà été utilisés auparavant et ainsi leur donner une seconde vie. Des essais préliminaires, menés début 2015 par les laboratoires L2n et InSyTE de l'UTT et réalisés sur un banc de tests simplifié, ont permis de mettre en exergue que certains composants à LED des dispositifs d'éclairages, mis au rebut, étaient toujours fonctionnels. Par conséquent, la panne n'est pas nécessairement liée aux composants électroniques, mais peut avoir d'autres causes (connectiques, cartes électroniques de commande, etc.) [6] [13] [14].

En 2016, une étude collaborative a été menée entre l'UTT et ARTEMISE, dans le cadre d'un stage universitaire. Elle consistait, dans un premier temps, à réaliser un inventaire des lampes à LED collectées, puis dans un second temps, à mettre en place un banc de tests ON/OFF. Ci-dessous l'étude statistique qui en résulte [13] :

Pourcentage des lampes à LED fonctionnelles sur 4476 triées :

- Rebut de fabrication (lampes neuves) : 100% fonctionnelles ;
- LEDs à filaments (flux domestique) : 80% fonctionnelles ;
- LEDs GU10 / GU5.3 : 85% fonctionnelles.

En 2018, Mizanur Rahman S.M. a également réalisé une étude statistique, sur 273 lampes LED. Il a conclu que 49% du gisement est potentiellement fonctionnel. Les résultats sont présentés dans le Tableau 1-3 [14].

Echantillon	Dispositifs LEDs		Total	Pourcentage fonctionnel
	Fonctionnels	Non fonctionnels		
1	54	61	115	47%
2	44	36	80	55%
3	9	42	51	18%
4	27	0	27	100%
Total	134	139	273	49%

Tableau 1-3 : Résultats des tests ON-OFF de lampes à LED [14]

Afin de corroborer les deux études réalisées, nous avons effectué une pré-étude en utilisant notre propre banc de tests ON/OFF. L'échantillon de lampes prélevé, en septembre 2020 dans un big-bag chez ARTEMISE, était constitué de 1152 unités (850 E27 petits bulbes en plastique, 142 E27 gros bulbes en plastique, 120 E27 petits bulbes en verre et 40 E14). L'objectif était de caractériser les dispositifs fonctionnels dans le cadre du scénario I. Le Tableau 1-4 et la Figure 1-12 indiquent les résultats de notre étude : 5% de lampes incomplètes (cassées), 9% de lampes écartées (oxydées, présence de poussières, etc.), 38% de lampes fonctionnelles et 48% non fonctionnelles. Ces études démontrent que de nombreux dispositifs d'éclairage à LED collectés et destinés au recyclage, n'ont pas atteint véritablement leur fin de vie et sont éventuellement encore réutilisables.

Typologie	Lampes incomplètes (cassées)	Lampes écartées (oxydation, poussières)	Lampes testées		Total
			ON	OFF	
E27 petits plastique	55	95	263	437	850
E27 gros plastique	3	9	43	87	142
E27 petits verre	0	0	120	0	120
E14	0	0	10	30	40
Total	58	104	436	554	1152

Tableau 1-4 : Résultats des tests ON/OFF des lampes E27 et E14

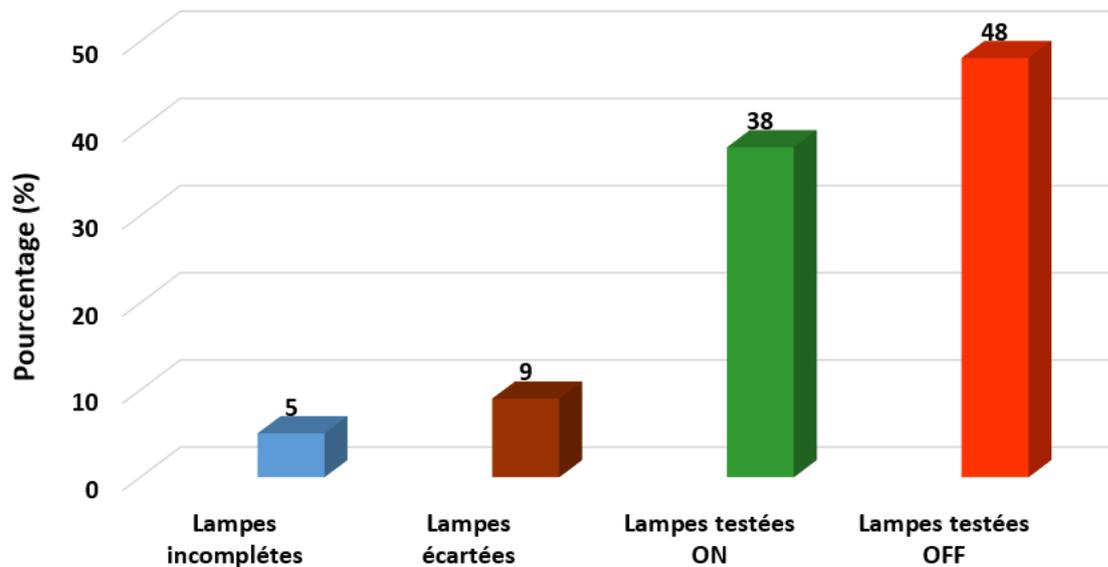


Figure 1-12 : Pourcentage des lampes incomplètes, écartées, fonctionnelles et non fonctionnelles

La réutilisation des lampes à LED collectées en fin de vie est potentiellement envisageable. Toutefois, il reste la partie réglementaire à étudier, à l'égard des pouvoirs publics. Quels sont les tests à effectuer, afin de certifier les lampes de seconde vie par le marquage « CE » ? Qui sera considéré responsable en cas d'incendie ? Plusieurs voies de réutilisation sont envisageables :

- La réutilisation directe des lampes à LED ;
- La réutilisation indirecte par les composants des lampes à LED ;
- La réparation avec la remise sur le marché ;
- La fabrication de nouvelles lampes à LED, à partir des composants récupérés.

Le programme de réemploi des dispositifs à LED (seconde vie) est un scénario très vertueux. In fine, aucun traitement n'est apporté aux produits d'éclairage à LED et leur durée d'utilisation est prolongée. Cependant, d'un point de vue sécuritaire, les fabricants autoriseront-ils une autre entité à remettre sur le marché les lampes et les tubes à LED arrivant en déchets ? En cas de litiges, leur responsabilité serait potentiellement engagée. En 2020, ECOSYSTEM assimilait le scénario de réutilisation à de la contrefaçon [3].

Le **scénario II** consiste à récupérer puis à valoriser les matériaux constitutifs, des lampes et des tubes à LED (métaux, plastiques et verre), à l'issue d'un traitement conventionnel par broyage mécanique. Ce scénario ne valorise nullement les composants électroniques élémentaires⁶ des systèmes d'éclairage à LED, notamment les puces à LED, qui constituent leur valeur ajoutée. Par ailleurs, il faut adapter la séparation des matériaux, en fonction du besoin industriel. Le niveau de séparation des matériaux constitutifs dépend des filières avalées pour la valorisation des fractions.

En 2018, Mizanur Rahman S.M. (dans le cadre d'un contrat postdoctoral du projet RECYLED) a réalisé des essais de broyage et de tri sur des échantillons de lampes à LED, avec deux entreprises A et B, en utilisant un broyeur dont le débit est à 460 kg/h. Les fractions ont ensuite été triées en trois catégories : plastiques en mélange, métaux ferreux et métaux non ferreux. Pour le broyeur de l'entreprise A, les fractions sont 70% de matériaux plastiques, 4% de métaux ferreux et 26% de métaux non ferreux. Et pour le broyeur de l'entreprise B, les fractions sont 60% de matériaux plastiques, 10% de métaux ferreux et 30% de métaux non ferreux. Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 1-5. Au total, les plastiques représentent 63%, les métaux ferreux 8% et les métaux non ferreux 29% [14].

⁶ Qui sont encore potentiellement fonctionnels.

Fraction	Entreprise A		Entreprise B		Entreprises A + B	
	Masse (kg)	%	Masse (kg)	%	Masse totale (kg)	%
Plastiques en mélange	8	70	14,2	60	22,2	63
Métaux ferreux	0,5	4	2,4	10	2,9	8
Métaux non ferreux	3	26	7	30	10	29
Total	11,5	100	23,6	100	35,1	100

Tableau 1-5 : Résultats de broyage et de tri des lampes à LED en fin de vie [14]

Entre 2017 et 2020, plusieurs dizaines de tonnes de lampes à LED sont passées dans la ligne de traitement actuelle, de l'entreprise ARTEMISE. Les dispositifs broyés sont des lampes E27 en verre et en plastique, avec des systèmes optiques de diamètre standard (40 mm). La Figure 1-13 présente ces quantités.

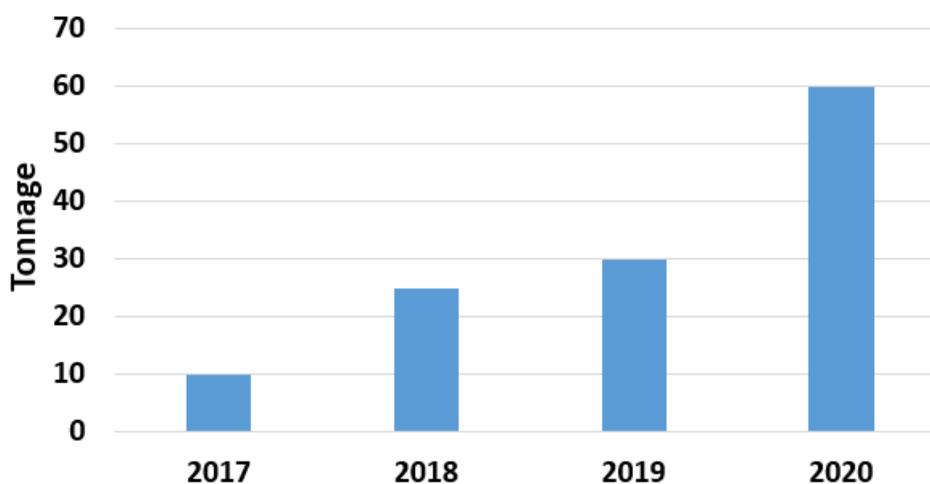


Figure 1-13 : Tonnages de lampes à LED broyées chez ARTEMISE

Le **scénario III** semble plus pertinent que le scénario II, étant donné qu'il s'agit de récupérer puis de valoriser les composants électroniques intègres, telles que les puces LEDs et les cartes électroniques. Deux procédés de démontage sont possibles, à savoir un manuel ou un automatisé. Pour ce dernier, la technologie de comminution, dérivée des techniques d'extractions géologiques, a été identifiée. Cette méthode, de fragmentation électrodynamique et/ou électrohydraulique par les puissances pulsées, consiste à créer un arc électrique puis une onde de choc électrique dans l'eau. L'onde de choc, ainsi créée, va fragmenter sélectivement les systèmes optiques, les corps et les culots des dispositifs d'éclairage à LED, sans détériorer leurs composants électroniques. Ces aspects seront abordés dans les études de déconstruction paramétriques du chapitre 3. Ceci permet leur réutilisation éventuelle et/ou leur revente auprès des entreprises spécialisées pour une valorisation matière spécifique.

La réutilisation du composant constitue une originalité particulière du projet RECYLED. Les autres études et projets, développés actuellement, s'intéressent plutôt à la valorisation des matériaux constitutifs. La réutilisation du composant électronique implique la récupération du composant, par un procédé susceptible de conserver son intégrité physique, afin que celui-ci puisse en conséquence être fonctionnel. A ce titre, trois options pourraient alors être envisagées :

- Revente du composant à des entreprises fabricants de luminaires et de dispositifs d'éclairage à LED : ce qui implique de pouvoir déterminer la provenance d'origine du

composant (à partir de sa composition et de sa structure) et d'en garantir le bon état de fonctionnement ;

- Revente du composant à une structure (locale par exemple) capable de fabriquer ou de remettre en état des dispositifs d'éclairage, à l'image des structures de l'Economie Sociale et Solidaire, par exemple le réseau ENVIE ;
- Revente du composant à des filières spécialisées qui valorisent les cartes électroniques, pour permettre une optimisation du modèle économique, par une exploitation matière spécifique, puisque le composant est relativement encore en bon état.

A l'issue du projet RECYLED, les préconisations en termes de cahier des charges et des briques technologiques développées, avec les partenaires et/ou les sous-traitants, permettront la réalisation de la machine de traitement à une échelle industrielle.

Il s'agira d'une voie de diversification, pour la société ARTEMISE, permettant d'anticiper la baisse inéluctable des volumes de lampes et de tubes traditionnels à recycler. Ses ambitions sont non seulement d'être une société pionnière, mais aussi de devenir le leader européen, voire mondial sur cette activité, avec la possibilité de déposer un brevet, pour la ligne complète de démantèlement des dispositifs à LED. Ce projet d'envergure internationale, permettrait à l'entreprise d'être la première structure en capacité à traiter industriellement les futurs flux de lampes et de tubes à LED usagés. Elle proposerait à la fois une valorisation des matériaux et une réutilisation des composants encore fonctionnels.

Le projet pourrait permettre la création d'une nouvelle activité, liée à la réutilisation du composant à LED. Cette activité d'économie circulaire peut être génératrice d'emplois, dans la région Grand EST, par la création d'entreprises traditionnelles et/ou d'une économie sociale et solidaire. La stratégie de l'entreprise est de créer un outil de traitement industriel innovant, capable de recycler les équipements à LED et d'obtenir une position de leader sur ce marché. Ainsi, elle commercialiserait des lignes complètes de valorisation de ces dispositifs à travers le monde [6].

1.4. L'état de l'art du recyclage des LEDs

Plusieurs projets de recherche et développement ont été initiés, pour le recyclage des dispositifs d'éclairage à technologie LED. Nous allons nous intéresser, par voie de conséquence, aux projets initiés jusqu'à ce jour, d'un point de vue international mais également national, avec une dimension européenne.

1.4.1. L'état de l'art international

D'importants changements sont effectués à travers les mesures prises par les pouvoirs publics dans le domaine de l'éclairage, gros consommateur mondial d'électricité (19% de la demande d'énergie électrique mondiale [2] [15]). De ce fait, les sources lumineuses conventionnelles, telles que les lampes à incandescence et à mercure haute pression, ont été interdites à la vente au sein de l'Union Européenne. Ainsi, un besoin d'évaluation des performances environnementales des sources lumineuses a été nécessaire en lien avec les changements environnementaux, sociétaux et politiques. Les Analyses du Cycle de Vie (ACVs), d'un produit ou d'un service, sont normalisées à un niveau général par les normes : ISO 14040 [16] et ISO 14044 [17]. Mais à ce jour, il n'existe pas de règles établies pour les sources de lumière, pour réaliser une ACV détaillée.

Conséquemment, il nous est impossible de comparer directement les résultats provenant d'ACVs différentes. Le nombre de sources lumineuses est en perpétuelle augmentation sur le marché mondial, en particulier celui des systèmes d'éclairage à technologie LED, en remplacement des dispositifs d'éclairage conventionnels. A la fin de la décennie, la technologie aura totalement remplacé l'éclairage traditionnel [3], en considérant les enjeux écologiques liés au type de production de lumière qui impacte à la fois les ressources naturelles et l'environnement. La pollution lumineuse qui perturbe chaque nuit, un peu plus, la biodiversité est désormais étudiée et prise en compte dès la phase de conception des nouveaux luminaires. Le recyclage de ces nouvelles sources lumineuses, après plusieurs milliers d'heures de fonctionnement, est également considéré pour atténuer leur impact environnemental [2].

1.4.1.1. Modèles des analyses du cycle de vie établis

En 2013, une thèse soutenue par Leena Tähkämö, à l'Université Finlandaise d'Aalto dont le sujet est l'« Analyse du cycle de vie de sources lumineuses - Etudes de cas et examen des analyses » [4]. L'auteur a évalué les sources lumineuses de façon comparable, avec un double objectif. D'une part, elle présente deux modèles, un simple et un autre étendu, afin de réaliser des ACVs des sources lumineuses, en toute transparence. Et d'autre part, elle les analyse, pour accroître la connaissance sur les aspects environnementaux des sources lumineuses. Le Tableau 1-6 présente les deux modèles précités, afin que tous les impacts environnementaux soient pris en compte.

Paramètre	Modèle simple	Modèle étendu
Unité fonctionnelle	Lumen-heure (par exemple llmh)	Spécifique pour le cas , relié à la fonction des sources lumineuses dans une application particulière Applications en intérieur : éclairage à une distance sur une surface par heure Applications en extérieur : en rapport avec des critères pour l'éclairage
Étapes du cycle de vie	Fabrication Utilisation	Acquisition des matières premières Utilisation Fin de vie
Impacts environnementaux	Nombre limité de catégories d'impacts, (seulement l'énergie primaire ou réchauffement climatique)	Plusieurs catégories d'impacts divers
Source d'énergie de la phase d'utilisation	Energie primaire	Moyen de production d'électricité actuel, et l'électricité à faible et haut taux d'émission

Tableau 1-6 : Modèles simple et étendu pour la méthode de l'ACV des sources lumineuses [4]

Les modèles présentés dans le Tableau 1-6, reposent sur des paramètres clés de l'ACV :

- Une unité fonctionnelle ;
- Les étapes du cycle de vie ;
- Les impacts environnementaux ;
- La source d'énergie en phase d'utilisation.

Le modèle simple peut être utilisé quand les ressources sont limitées et quand il est nécessaire de produire des résultats très rapidement. Le modèle étendu est destiné à une évaluation plus détaillée, mais il reste également une simplification de l'ACV très détaillée. La thèse recommande que l'unité fonctionnelle soit en lumen-heure dans le modèle simple. Les lumens-heure dépendent du flux lumineux et du temps de fonctionnement de la source lumineuse. Le lumen-heure obéit au critère de l'unité fonctionnelle établi dans la norme ISO 14044 [17]. Dans le modèle étendu, l'unité fonctionnelle devra prendre en compte l'application de l'éclairage. Par exemple, les applications en intérieur peuvent utiliser l'unité fonctionnelle de l'éclairage direct à une distance et sur une surface par heure. La distance et la largeur de la surface devront être spécifiées, en accord avec l'application particulière. Dans les applications extérieures, il est recommandé d'utiliser l'unité fonctionnelle qui prend en compte le critère pour l'éclairage, destiné à obéir à des critères. Il est pourtant recommandé d'utiliser l'unité fonctionnelle spécifique dans les ACVs comparatives. Les ACVs non-comparatives, quant à elles, peuvent utiliser les lumens-heure comme unité fonctionnelle, pour que les résultats soient comparables aux autres ACVs des sources lumineuses. Cependant, il est fortement recommandé d'indiquer le flux lumineux et la durée de vie de la source lumineuse dans une ACV de tous types, qu'elle soit comparative ou non-comparative [4].

1.4.1.2. Etudes de cas et examen des ACVs

Quatre études de cas, d'analyses environnementales et/ou économiques des sources lumineuses, ont été menées : deux analyses du cycle de vie d'un luminaire à lampe CFL (25 W) et d'un luminaire encastré à technologie LED (19 W - 1140 lm), une analyse des Coûts du Cycle de Vie (CCV) des luminaires d'éclairage public (luminaire à lampe sodium haute pression, luminaire à lampe à induction et luminaire à LED) et une analyse combinant une ACV et une CCV de différentes lampes utilisées par les ménages : à incandescence (60 W - 750 lm), CFL (13 W et de trois formes : spirale, tubulaire et enveloppée) et à LED (13 W - 800 lm). Quatre unités fonctionnelles ont été utilisées (en excluant le luminaire, afin de simplifier l'étude) :

1. Une lampe
2. Un mégalumen/heure
3. Une heure
4. Un éclairage lumineux direct à une distance d'un mètre sur une surface de 1 m² par heure

Les impacts environnementaux du luminaire encastré à LED (19 W - 1140 lm) et du luminaire à lampe CFL (25 W) sont répartis entre la fabrication (7%) et l'utilisation (93%), dans le cas d'une production d'électricité européenne. Dans le cas de figure d'une production d'électricité française ; la fabrication représente environ 23% et l'utilisation 76% des impacts environnementaux totaux moyens. Les autres étapes du cycle de vie (extraction des matières premières, transport et fin de vie) totalisent moins de 1% en moyenne. Les impacts environnementaux de la fabrication du luminaire encastré à LED sont causés par le driver (40%), le plateau des puces à LED (28%), les pièces en aluminium (échangeur thermique et réflecteur : 24%) et le joint thermique en silicone (2% à 6%). Les impacts de la fabrication de la lampe CFL (25 W) sont distribués de la façon suivante : luminaire (46%), ballast (43%) et lampe (11%). En analysant ces différentes lampes, les données montrent que la lampe à LED (13 W - 800 lm) cause les coûts et la consommation d'énergie les plus importants, notamment à cause de sa longue durée de vie (cf. Figure 1-14-a). En addendum, le prix d'achat et la consommation d'énergie, lors de la phase de fabrication de la lampe à LED, sont élevés. Comparativement sur une heure d'utilisation, la lampe à incandescence cause clairement les coûts et la consommation d'énergie les plus élevés (cf. Figure 1-14-c). Il semble que les résultats de la comparaison basée sur le lumen-heure (cf. Figure 1-14-b) soient similaires aux résultats obtenus pour des comparaisons basées sur une heure d'éclairage lumineux, sur une surface de 1 m² (cf. Figure 1-14-d). L'ensemble des résultats est présenté sur la Figure 1-14 [4].

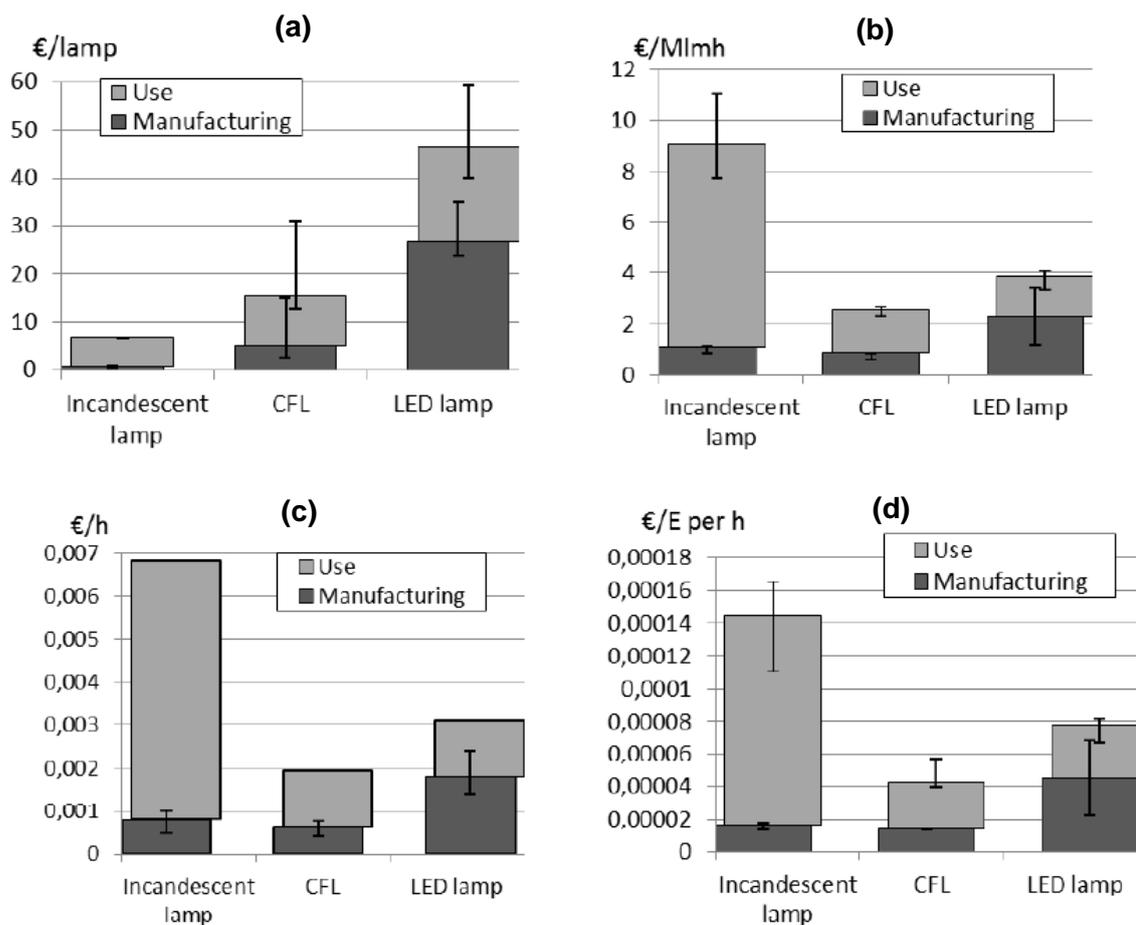


Figure 1-14 : Coûts du cycle de vie des lampes à incandescence, CFL et à LED, utilisant quatre unités fonctionnelles : une lampe (a), un mégalumen/heure (b), une heure (c) et un éclairage lumineux direct à une distance de 1 m² par heure (d). Le cycle de vie comprend les étapes de fabrication et d'utilisation [4]

Il en résulte que la consommation d'énergie, pendant la phase d'utilisation, prédomine et est responsable des impacts environnementaux, en raison du besoin d'éclairage. Par ailleurs, Leena Tähkämö a constaté que les impacts environnementaux, lors de l'étape d'utilisation, sont corrélés à la durée de vie des sources lumineuses, ainsi qu'à leur efficacité lumineuse. De ce fait, les sources à LED, à cause de leur durée de vie importante, présentent des consommations d'énergie élevées et donc d'importants impacts environnementaux durant leur phase d'utilisation. Dans le cas d'une faible efficacité lumineuse, cas des lampes à incandescence, la phase d'utilisation présente le plus d'impacts mais sur une faible durée de vie. L'efficacité lumineuse du système d'éclairage détermine donc la performance environnementale. De ce fait, l'auteur a observé que les lampes et luminaires à hautes efficacités lumineuses, telles que les lampes CFL et les lampes à LED, sont les plus favorables et qu'ils ne causent qu'une part insignifiante des impacts environnementaux du cycle de vie total [4]. La phase de fabrication est la deuxième cause la plus importante des impacts environnementaux. L'importance de cette phase devrait avoir plus d'impacts, par une analyse plus détaillée des procédés et matériaux de fabrication, ceci afin de minimiser son impact. L'étape de fabrication est davantage impactante pour une durée de vie du produit plus courte que prévue, dans le cas où il faudrait fabriquer plusieurs sources lumineuses sur une même période déterminée. Les autres étapes du cycle de vie (l'extraction des matières premières, le transport et la fin de vie) sont pratiquement négligeables [4] [17].

L'analyse des coûts du cycle de vie des luminaires d'éclairage public compare les coûts d'investissement (prix du luminaire), d'exploitation (coûts d'électricité et les remplacements des luminaires) et la valeur résiduelle (coûts ou profits d'investissement, après le temps de

fonctionnement). Dans le cas de l'éclairage public, la durée de fonctionnement des équipements étant fixé à 30 ans, leur valeur résiduelle reste donc faible. L'unité fonctionnelle étant un kilomètre d'une route illuminée, les coûts d'investissement dans le cas de la technologie LED (23 170 - 34 630 €/km) étaient similaires à ceux des lampes à induction (25 710 €/km) et nettement plus élevés que ceux des lampes à sodium haute pression (7 380 - 9 160 €/km) [4].

Les ACVs des sources lumineuses prennent en compte les impacts de la lumière sur la faune et la flore. L'éclairage artificiel affecte les organismes vivants directement et indirectement de façons multiples. Par exemple, les oiseaux souffrent de désorientation, les insectes sont attirés par la lumière artificielle, ce qui les rend plus vulnérables vis-à-vis des prédateurs. La croissance et la floraison des plantes sont affectées par les rayonnements lumineux (couleur, quantité et la durée d'exposition) [1]. L'analyse du cycle de vie est un outil indispensable pour évaluer les impacts potentiels sur l'environnement d'un système (produit et/ou service) durant sa durée de vie. L'ACV évalue le cycle de vie dans sa globalité, depuis l'acquisition des matières premières jusqu'à la fin de vie, communément « du berceau à la tombe ». Une ACV peut aussi évaluer une partie du cycle de vie, en fonction du périmètre souhaité. Cette méthode compile les entrants et les sortants, ainsi que les impacts potentiels sur l'environnement du système analysé. C'est un outil d'aide à la prise de décision des hommes politiques, pour l'élaboration des lois, des consommateurs conscients et protecteurs de l'environnement. La Figure 1-15 illustre l'ACV générique utilisée et adaptée aux équipements d'éclairage à LED dans la thèse de Leena Tähkämö.

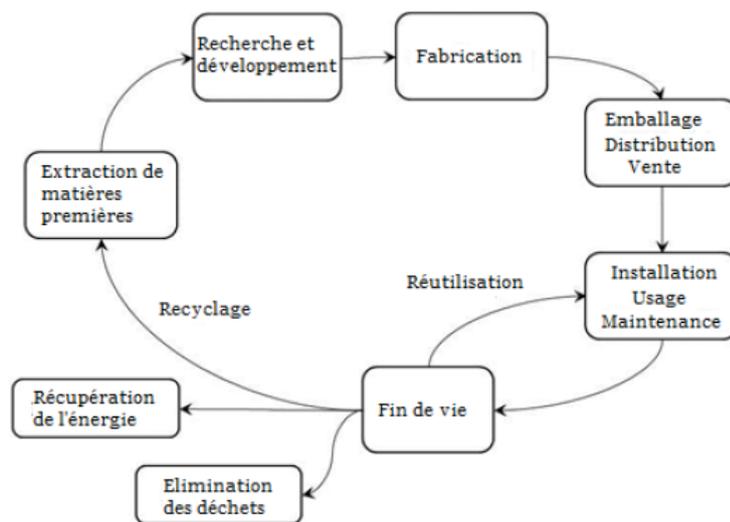


Figure 1-15 : Exemple d'une analyse de cycle de vie générique adaptée aux dispositifs d'éclairage à LED [4]

Il n'existe pas de règles absolues qui dictent quelles étapes du cycle de vie doivent être considérées pour une ACV. Cela dépend du produit analysé et de l'objectif de l'étude. Toutefois, l'ACV conventionnelle comporte quatre phases :

- Définition des objectifs et du champ de l'étude ;
- Analyse de l'inventaire ;
- Evaluation de l'impact ;
- Interprétation.

Plusieurs ACVs de lampes et de luminaires ont été réalisées, depuis les années 1990. Elles ont été réalisées en comparant les sources lumineuses à incandescence, CFL et à LED [18] [19] [20] [21] [22]. Tout d'abord, il s'est avéré impossible de créer un modèle uniforme de consommation d'énergie, pour la phase de fabrication, de part des données variées des sources lumineuses. Ensuite, un modèle uniforme pour le contenu matériel n'a pas pu être trouvé à ce jour. Enfin, les ACVs utilisaient des unités fonctionnelles différentes. En conséquence, les impacts

environnementaux varient, ce qui rend les analyses comparatives difficiles, alors qu'il y a un nombre de catégories d'impacts environnementaux potentiels à choisir.

1.4.1.3. Discussions et recommandations

La problématique de la thèse de Leena Tähkämö est l'absence de règles établies pour la conduite d'une ACV des sources lumineuses. Il est donc difficile d'évaluer systématiquement la performance environnementale des sources lumineuses. L'objectif de la thèse a donc été d'établir deux modèles, pour effectuer une ACV, non seulement des sources lumineuses traditionnelles, mais aussi des sources de lumière à technologie LED, sur la base des ACVs réalisées dans la thèse et l'examen des ACVs antérieurs. Quatre analyses d'ACV et/ou CCV de lampes et luminaires ont été réalisées. Malgré des différences relevées dans les méthodes d'ACV (unité fonctionnelle, étapes du cycle de vie, etc.), de nombreuses conclusions ont pu être tirées [4].

Premièrement, dans toutes les ACVs des sources lumineuses étudiées, l'étape d'utilisation prédomine et cause la majorité des impacts environnementaux. Conséquemment, les dispositifs de haute efficacité énergétique, telles que la lampe CFL et la lampe à LED, sont responsables des plus faibles impacts sur le cycle de vie, contrairement aux dispositifs conventionnels, telle que la lampe à incandescence. Cependant, dans l'ACV des luminaires de lampes à LED, la durée de vie de ces équipements est basée sur des extrapolations de mesures, d'une partie de leur durée d'utilisation. Leur durée de vie étant très longue, il n'est pas commode de la mesurer en totalité. Cela entraîne des incertitudes dans la durée de vie des sources lumineuses à LED et donc dans leurs ACVs.

Deuxièmement, la fabrication est la deuxième étape, du cycle de vie, qui impacte les ressources naturelles. Dans le cas d'un luminaire à lampe CFL, les impacts environnementaux moyens sont causés par le luminaire (réflecteur) et le ballast. Quant au luminaire encastré à LED, les impacts liés à la fabrication sont générés majoritairement par le driver, le plateau des puces à LED, l'échangeur thermique et le réflecteur en aluminium. Cela indique que le driver ou le ballast ne peut pas être ignoré dans une ACV de luminaire. Aussi, il est fort probable que son impact augmente, étant donné que le domaine de l'éclairage évolue vers des sources lumineuses encore plus efficaces énergétiquement. En 2013, la technologie LED était en perpétuelle évolution, pour atteindre un niveau de maturité, à la fin de la décennie. En effet, les dispositifs d'éclairage connaissent des changements en raison des mesures gouvernementales qui ont été prises. Les systèmes conventionnels ont été, sont et seront supplantés par les systèmes d'éclairage à technologie LED, présentant de nombreux avantages (meilleure durée de vie, consommation moindre, meilleure efficacité lumineuse, système intelligent et absence de composé polluant mercuriel) [3].

Troisièmement, les autres étapes du cycle de vie, telles que l'extraction des matières premières, le transport et la fin de vie, sont pratiquement négligeables, dans le cadre du cycle de vie complet. Notons, cependant, que la fin de vie peut causer un impact notable, comme celui lié à la présence de déchets dangereux. Par ailleurs, ce projet doctoral Finlandais [4] n'avait pas intégré la dimension industrielle du traitement de la fin de vie de ces dispositifs à LED. Il s'était exclusivement focalisé sur les impacts environnementaux que pouvaient générer les sources lumineuses durant leur fabrication et utilisation. Ceci peut être justifié car nous étions au début de la généralisation des dispositifs à LED. Aujourd'hui, nous sommes arrivés à « l'ère du tout LED », il est désormais essentiel, voire péremptoire, de nous intéresser à la fin du cycle de vie des dispositifs d'éclairage à technologie LED.

Le monde académique français s'intéresse également à la fin de vie des équipements d'éclairage à LED, pour optimiser leur valorisation et leur traitement. Intéressons-nous désormais à ces projets universitaires, à finalité industrielle.

1.4.2. L'état de l'art national : projet REDLED

En 2018, l'éco-organisme français ECOSYSTEM a initié un ambitieux projet de recherche et développement, à dimension européenne, pour la période janvier 2019 à décembre 2021 : projet REDLED (Recycling EnD-of-life LED). Afin d'adapter l'outil « Blubox », pour traiter en un seul et même procédé les écrans plats des télévisions, les lampes de basse consommation CFL et les systèmes d'éclairage à LED, en intégrant plusieurs partenaires industriels et académiques [23] :

- Université de Bordeaux ;
- Université de Catholique Louvain : UCLouvain (Belgique) ;
- Chimie ParisTech - Les Arts et Métiers - Les Mines ParisTech ;
- Institut Wuppertal (Allemagne) ;
- BRGM ;
- MTB ;
- COOLREC (Pays-Bas).

Ce projet français, avec des ambitions européennes, est financé par la KIC EIT Raw Materials (commission européenne qui finance les projets de R&D) [24]. Il porte une attention particulière à la composition des sources lumineuses à LED, qui est très variable d'un fabricant à un autre, sur deux points en particulier :

- La présence de substances dangereuses, tels que les retardateurs de flamme bromés (RFBs), qui limite le recyclage des matrices en matières plastiques et donc l'atteinte du taux réglementaire de recyclage de 80% ;
- Les différents types de dispositifs d'éclairage à LED (puces à filaments et systèmes optiques en verre par exemple) qui pourraient nécessiter des traitements spécifiques.

Le partenaire MTB Recycling Manufacturing Engineering [25], créé il y a 30 ans, est un acteur mondial de référence dans la gestion optimale des déchets industriels. Il concentre son activité autour de trois pôles majeurs :

- Le recyclage, la valorisation des métaux non ferreux et des déchets complexes ;
- La conception et la fabrication de machines de recyclage ;
- La conception et l'installation d'usines clés en main.

MTB est le premier recycleur de câbles électriques en France, il valorise plus de 40 000 tonnes de déchets industriels par an, soit 40% du marché français, en se mettant au service des plus grands groupes. Exploitant mais également fabricant, MTB conçoit, fabrique, commercialise et installe aussi bien des machines que des lignes de traitement entières, et ce, à travers le monde entier. Par ailleurs, l'entreprise COOLREC, le second partenaire industriel, est spécialisée dans le recyclage des DEEE et en conséquence dans la production de matières premières secondaires, de grande qualité, tels que le fer, l'aluminium, le cuivre, les métaux nobles et les matrices plastiques. La société sépare et broie, sur les sites de Waalwijk et Emmen aux Pays-Bas, les matériaux issus des réfrigérateurs, des téléviseurs, des ordinateurs, des machines à café et tous équipements DEEE. Elle les transforme en copeaux et en granules, en respectant le cahier des charges des fabricants. Cette matière est réutilisée pour la fabrication des pièces et/ou de nouveaux produits EEE [26].

En outre, grâce au soutien exclusif de l'éco-organisme, le projet REDLED aurait entrepris une étroite coopération avec les fabricants des sources lumineuses, tels que LEDVANCE et Philips Lighting, pour obtenir les quantités des dispositifs à LED vendus, ainsi que l'évolution de leur composition. Ces données sont des enjeux majeurs de R&D, pour construire les procédés de

traitement de demain. Cette collaboration est effectuée dans le cadre de la Chaire Mines Urbaines. Les travaux de l'université Chimie ParisTech obtiennent de très bons résultats en laboratoire, sur des procédés chimiques d'extraction des métaux précieux et stratégiques, contenus dans les puces à LED des lampes, des luminaires et des téléviseurs [27].

1.4.2.1. La Chaire Mines Urbaines

Les Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE) contiennent de nombreuses matières recyclables, sources de matériaux stratégiques, en voie de raréfaction mondiale, variées et continuellement renouvelées. Les DEEE sont de véritables « mines urbaines⁷ » innovantes, disponibles et répandues dans notre société actuelle. Par conséquent, la Chaire Mines Urbaines est dédiée à l'exploitation de ces mines de DEEE. Dans le contexte actuel d'épuisement des ressources naturelles, la valorisation de ces mines DEEE riches en matériaux plastiques et en métaux rares, est essentielle au développement d'une économie circulaire vertueuse et respectueuse de l'environnement. L'économie circulaire doit permettre le développement d'une croissance durable et innovante, la création des emplois relocalisés et la sécurisation les approvisionnements des matières premières.

La Chaire Mines Urbaines prône une approche d'économie circulaire, par une gestion sobre et efficace des ressources de la planète, encouragée par les politiques nationale et européenne. Désireux de développer de nouvelles filières de recyclage issues des mines urbaines de DEEE, l'éco-organisme ECOSYSTEM a créé la chaire de recherche et d'enseignement Mines Urbaines, en partenariat avec trois grandes écoles d'ingénieurs, constituant le comité de pilotage : Chimie ParisTech⁸, Arts et Métiers⁹ et Mines ParisTech¹⁰. Elle est financée dans le cadre d'un mécénat, avec l'appui de la Fondation ParisTech [27] [28]. Son objectif est de contribuer à la mise en œuvre d'un modèle d'économie circulaire, respectueux des principes du développement durable et profitable aux citoyens, fabricants, acteurs du recyclage et territoires. Ses missions sont :

- Développer de nouvelles matières premières secondaires de qualité ;
- Définir de nouveaux modèles économiques pour le recyclage ;
- Former les acteurs de demain.

La Fondation ParisTech, créée par décret publié le 10 avril 2010 au Journal Officiel, a pour dessein de contribuer au développement de l'enseignement supérieur, de la recherche scientifique et technologique, tant à l'échelon français qu'europpéen. Fondation reconnue d'utilité publique, elle est née de l'initiative de Chimie ParisTech, avec l'appui de grands groupes industriels : Exane BNP Paribas, Renault et Total, partenaires de longue date de l'enseignement supérieur et de la recherche [28]. La Fondation ParisTech a, par ailleurs, pour objectifs de :

- Favoriser le développement des formations innovantes, en particulier à caractère international, renforçant ainsi l'attractivité des établissements d'enseignement supérieur français, auprès des étudiants et des enseignants de haut niveau ;
- Promouvoir des recherches collaboratives et pluridisciplinaires, répondant aux enjeux sociétaux et contribuant aux évolutions technologiques de demain ;
- Encourager la diversification des talents en soutenant, notamment, les politiques de diversité ;

⁷ Gisement de matériaux contenus dans nos déchets, disponibles et répandus dans notre tissu urbain [27].

⁸ Docteur Vincent SEMETÉY (responsable de la Chaire).

⁹ Docteur Carole CHARBUILLET (co-porteur de la Chaire).

¹⁰ Docteur Franck AGGERI (co-porteur de la Chaire).

- Accroître le rayonnement, les moyens d'action de l'enseignement supérieur et de la recherche, à une échelle française et européenne.

La Chaire Mines Urbaines soutient trois axes de recherche prioritaires :

- Optimisation de la filière de recyclage des métaux stratégiques :
 - Vérification de la compatibilité des flux de collecte de DEEE avec les procédés de traitement ;
 - Anticipation des évolutions à venir des DEEE et de leur compatibilité avec les filières actuelles ;
 - Développement de procédés d'extraction des métaux présents en faibles concentrations dans les DEEE.
- Tri, compatibilité et valorisation du recyclage des matériaux plastiques :
 - Optimisation des méthodes de tri massif des plastiques issus de broyats de DEEE.
 - Etude de la compatibilité des polymères et des composites en mélange ;
 - Amélioration des connaissances et des mécanismes de dégradation des polymères durant leur recyclage.
- Développement de nouveaux modèles pour l'économie circulaire :
 - Définition des critères incitatifs et des freins à l'utilisation des matériaux recyclés ;
 - Développement des nouveaux modèles incluant des nouvelles filières de recyclage en boucle fermée ;
 - Intégration de la valeur des ressources naturelles et des pertes d'opportunité à les mettre en décharge.

La problématique des ressources naturelles minérales et fossiles est devenue une véritable épine dorsale de développement durable. Elle affecte autant les pays développés que les pays émergents. L'épuisement de ces ressources, corrélé à une augmentation de leur utilisation mondiale, conduit à l'exploration de nouveaux gisements plus coûteux à exploiter et plus impactant, du point de vue environnemental mais aussi social. Sur le plan économique, l'un des principaux enjeux est la disponibilité de ces ressources, car l'instabilité des prix et le risque de rupture des approvisionnements fragilisent les entreprises consommatrices de matières premières [29].

Les travaux de recherche de la Chaire Mines Urbaines visent à développer de nouvelles filières destinées à produire des matières premières secondaires, à partir du recyclage des DEEE et à des fins de substitution de la matière vierge. Les matières ciblées sont les métaux stratégiques et les matériaux polymères.

Les deux principaux enjeux de ces travaux sont :

1. Développer des matières premières recyclées répondant aux attentes des fabricants, notamment en termes de prix, de qualité et de respect de l'environnement ;
2. Définir les critères économiques et les incitations financières à mettre en œuvre, pour favoriser l'émergence et le maintien de ces filières.

Les travaux de recherche portent, sur le développement de procédés en rupture, sur l'optimisation de technologies existantes et sur le développement de nouveaux modèles. Les thématiques de recherche de la chaire sont les suivantes :

- Les métaux stratégiques ;
- Les polymères ;
- L'économie circulaire.

A. Extraction des métaux stratégiques des DEEE

Le développement des nouvelles technologies à haute valeur ajoutée a considérablement accéléré et diversifié la consommation mondiale des ressources minérales métalliques, au cours des dernières décennies. Ainsi, le nombre de métaux utilisés dans l'industrie a doublé, depuis le début du vingtième siècle. Une vingtaine de nouveaux éléments est devenue aujourd'hui indispensable à de nombreuses applications industrielles dont la production d'énergie décarbonée, le stockage d'énergie, l'informatique, les télécommunications, l'automobile et l'aéronautique [27].

L'Europe, dépendante pour ses approvisionnements en matières premières métalliques, est devenue aujourd'hui vulnérable, vis-à-vis de la volatilité des prix et des risques de pénurie. A ce titre, la commission européenne a publié et met régulièrement à jour, une liste de métaux dits « stratégiques », dont certains sont présents dans les DEEE. C'est dans cette optique que la Chaire Mines Urbaines souhaite contribuer à l'optimisation du recyclage des métaux stratégiques, contenus dans les DEEE. Ces métaux constituent un gisement riche, complexe, dispersé et hétérogène, dont la quantité et la qualité évoluent en fonction des avancées technologiques [27].

Les travaux menés par la Chaire, portant sur le recyclage des métaux stratégiques, s'articulent autour de quatre thèmes :

- Vérification de la compatibilité des flux de collecte de DEEE avec les procédés de traitement ;
- Anticipation des évolutions à venir des DEEE et de leur compatibilité avec les filières actuelles ;
- Développement de procédés d'extraction des métaux présents en faibles concentrations dans les DEEE ;
- Développement de méthodologies analytiques miniaturisées, pour la caractérisation des produits et le suivi des procédés avant et après recyclage.

Les trois équipes impliquées dans ces travaux sont :

- Matériaux, Interfaces et Matière Molle - Institut de Recherche de Chimie Paris ;
- Métallurgie Structurale - Institut de Recherche de Chimie Paris ;
- Synthèse, Electrochimie, Imagerie et Systèmes Analytiques pour le Diagnostic - Institut de chimie pour les sciences de la vie et de la santé.

L'expertise déployée repose sur des équipes constituant une association pluridisciplinaire, entre des spécialistes de la physico-chimie des procédés, des chimistes des matériaux et des spécialistes des sciences analytiques. Ils mettent en commun leurs compétences à l'interface des matériaux et des procédés. Cette expertise pourrait proposer des solutions innovantes, susceptibles de lever les verrous technologiques rencontrés par les industriels, dans le domaine des matières premières et de l'énergie [27].

Les équipements mis en œuvre dans ces travaux sont [27] :

- Equipement d'extraction liquide-liquide, colonnes chromatographiques ;
- Torche plasma de puissance pour l'extraction sélective des éléments stratégiques contenus dans les déchets électriques-électroniques ;
- Four à arc ;
- Technique d'analyse LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy);
- Microscopie électronique à balayage (SEM-FEG) ;
- Analyse Dispersive en Energie (EDX) ;
- Laboratoire sur puces (Lab-on-a-chip).

B. Valorisation des matériaux polymères des DEEE

L'utilisation des matériaux plastiques ou polymères, a connu une très forte progression depuis les années 1950. Ces matériaux performants ont, peu à peu, remplacé les matériaux traditionnels, tels que les métaux, le verre ou le bois, pour de nombreuses applications à l'instar des équipements électriques et électroniques. Cependant, l'une de leurs qualités, la résistance au vieillissement, s'est progressivement transformée en problématique environnementale, lors de la fin de vie des produits. ECOSYSTEM, en tant que représentant des producteurs des EEE et porteur de leur responsabilité sur la fin de vie des produits, se doit de contrôler la stricte application de la réglementation sur le transport et la valorisation des fractions plastiques issues du traitement des DEEE, notamment ceux présentant des substances dangereuses, tels que les retardateurs de flamme bromés (RFBs). L'éco-organisme souhaite donc jouer un rôle dans le développement des technologies de recyclage des plastiques issus des DEEE.

Les DEEE ménagers contiennent en moyenne 18% de matériaux plastiques, ce qui représente un gisement de plus de 78 000 tonnes de plastiques en France en 2014, dont près de 8 000 tonnes contiennent des RFBs. Dans ce contexte, l'objectif de la Chaire Mines Urbaines est d'optimiser le recyclage des plastiques issus de DEEE et de créer de nouvelles filières de matériaux plastiques secondaires de qualité par [27] :

- La maîtrise du devenir de la fraction plastique, en favorisant le développement d'unités de tri et de valorisation de proximité ;
- Le développement d'une économie circulaire, en bénéficiant d'un accès au gisement, afin de faciliter particulièrement le recyclage des plastiques en boucle fermée.

Aussi, en terme de consommation des ressources, la production d'une tonne de plastique nécessite au minimum 2 tep¹¹, contre 0,4 tep pour celle des plastiques recyclés. Dans le contexte actuel de raréfaction des ressources pétrolières, cette donnée n'est pas négligeable [27].

Les travaux menés par la Chaire, portant sur le tri et le recyclage des matériaux plastiques, s'articulent autour de trois thèmes :

- Optimisation des méthodes de tri massif des plastiques issus de broyats de DEEE ;
- Etude de la compatibilité des polymères et des composites en mélange ;
- Amélioration des connaissances sur les mécanismes de dégradation des polymères durant leur recyclage.

Les équipes impliquées dans ces travaux sont :

- Laboratoire de Conception Produits et Innovation (LCPI) - Antenne de Chambéry - Arts et Métiers ;
- Laboratoire Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux (PIMM) - Arts et Métiers.

Cette expertise déployée repose sur des compétences multiples. L'antenne LCPI de Chambéry d'Arts et Métiers constitue le pôle de compétences sur le recyclage et l'éco-conception. Ce laboratoire a été et est toujours pilote ou partenaire de nombreux projets de recherche nationaux mais également européens, impliquant divers secteurs industriels, tels que l'automobile, l'aéronautique, la plasturgie, le recyclage, etc. Les travaux menés, par ce pôle de compétences, s'articulent autour de trois axes :

¹¹ Tonne équivalent pétrole.

- Le développement de méthodes, d'outils et de pratiques d'éco-conception, destinés à limiter les impacts environnementaux liés à la fabrication, l'usage et la fin de vie des produits ;
- Le développement de procédés de tri et de recyclage des matériaux, principalement axé sur les plastiques, issus des produits en fin de vie ;
- L'évaluation des performances environnementales des produits ou des procédés, par la réalisation d'ACVs.

Le laboratoire PIMM réunit des spécialistes de différents horizons : mécanique des matériaux et des structures, chimie de polymères, etc. Les travaux s'intéressent en particulier aux conséquences des procédés sur les propriétés d'utilisation des produits, par les défauts et les modifications de microstructures engendrés. Les compétences déployées dans le cadre de la Chaire sont :

- Procédés de transformation des matrices polymères ;
- Etude des phénomènes de vieillissement des matériaux plastiques ;
- Caractérisation des propriétés mécaniques et rhéologiques des matériaux plastiques recyclés.

Les équipements mis en œuvre dans ces travaux sont :

- Broyeur à couteaux, broyeur à marteaux, micro-broyeur ;
- Extrudeuse et presse à injection ;
- Spectroscopie Moyen Infra Rouge (MIR), Ultraviolet (UV), Proche Infra Rouge (NIR), Fluorescence X (FX), banc laser ;
- Machine de traction, machine de chocs (Charpy, multi-impacts).

C. Economie circulaire : une problématique émergente

L'économie circulaire propose des solutions émergentes qui visent à décrétement la consommation des ressources naturelles et la production de déchets, en développant l'économie de fonctionnalité, le réemploi, la réparabilité des produits et leur recyclage. Le concept d'une économie circulaire repose ainsi sur un bouclage des flux de matières et d'énergie. Le développement d'une telle économie suppose à la fois de nouvelles formes d'organisation, une responsabilisation des producteurs, de nouvelles technologies, mais également de nouvelles logiques de création de valeur et de richesse. La problématique de la Chaire Mines Urbaines, qui s'inscrit dans cette logique de circularité, met de ce fait en exergue l'existence d'un potentiel de valeur à exploiter dans nos déchets urbains. Ils ne constituent pas seulement une source de pollution à éliminer, mais également une source de valeur à fructifier [27].

Les travaux menés par l'équipe de Mines ParisTech s'intéressent aux dimensions économiques, managériales et de gouvernance des mines urbaines, qui s'inscrivent dans la problématique plus large de l'économie circulaire. Dans ce contexte, l'équipe travaille sur trois axes de recherche :

- Théorie et pratiques de la responsabilité élargie des producteurs (REP). Ce travail vise à comprendre les mécanismes et les dispositifs qui cherchent à articuler en Europe responsabilités individuelle et collective, par la création des éco-organismes au sein de nouvelles filières, les formes de co-régulation et de gouvernance, qui sont mises en place avec les pouvoirs publics et d'autres parties prenantes ;
- Etude des modèles économiques de l'économie circulaire. Il s'agit de caractériser les modèles économiques qui émergent actuellement dans le domaine des DEEE, d'évaluer leur potentiel de valeur, les mécanismes de captation de cette valeur à l'œuvre et de mettre

en évidence les conditions (ingénierie de filières, écosystèmes d'affaire, soutiens, etc.) qui sont nécessaires à leur développement et à leur pérennisation ;

- Modèles d'organisation des filières REP. La recherche vise à mieux spécifier et théoriser le rôle des éco-organismes, dans la conduite d'apprentissage collectif et le type de levier qu'ils peuvent mobiliser dans leur intervention, auprès des producteurs et des acteurs de la fin de vie.

Le consortium impliqué dans ces travaux est issu du Centre de Gestion Scientifique (CGS) des Mines ParisTech, dont l'expertise est reconnue dans le domaine du management de l'innovation, de la Responsabilité Sociétale des Entreprises (RSE) et de l'éco-conception. Elle est spécialisée dans la recherche-intervention, à savoir l'accompagnement des entreprises et des organisations, autour de nouveaux enjeux de gestion. Elle s'appuie sur des enquêtes de terrain approfondies, des analyses qualitatives et quantitatives de l'observation participante, complétées par l'étude des archives. Elle a noué dans le domaine de la RSE et du développement durable des partenariats avec différentes institutions de recherche à l'étranger (CANADA, Royaume-Uni et Danemark). Elle compte mobiliser son réseau, pour faire connaître et diffuser les travaux ainsi menés, au sein de la Chaire Mines Urbaines [27].

1.4.2.2. Les avancées du projet REDLED

La gouvernance du projet REDLED soutenu par la commission européenne KIC EIT Raw Materials, pour la période 2019-2021, est assurée par l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M) du centre de Bordeaux d'Arts et Métiers ParisTech, rattaché à l'université de Bordeaux. Reconnu et supporté par le département INSIS¹² du CNRS depuis sa création, l'I2M est constamment en phase avec les avancées majeures réalisées dans le domaine de l'ingénierie mécanique. Les porteurs scientifiques du projet sont les docteurs Olivier MANTAUX et Bertrand LARATTE. Contrairement au projet RECYLED, l'objectif du projet REDLED est d'apporter une solution industrielle de recyclage efficace non seulement pour les produits d'éclairage à LED, mais également pour les écrans plats à LED des téléviseurs, en fin de vie. Aucune solution, clé en main viable industriellement et économiquement, n'a été mise au point jusqu'à ce jour. Le gisement d'équipements à LED contient une grande variabilité de matériaux et de métaux stratégiques, qui pourraient ensuite être utilisés comme des ressources secondaires [31] [32] [33].

A. Etude du gisement de lampes à LED

Dans le cadre du projet REDLED, une étude du gisement aurait été menée, pour quantifier les matériaux et les composants électroniques issus des lampes et des spots à LED en fin de cycle de vie, qui seraient potentiellement disponibles au cours de la décennie, afin de les valoriser en matières premières secondaires. Les porteurs du projet seraient parvenus à instaurer une étroite coopération avec les fabricants des sources lumineuses à LED. Ils auraient ainsi obtenu les quantités des dispositifs à LED vendues, par typologie de produits (lampes, spots, tubes et dalles) et par type de culots (E27, E14, B22, GU10 et GU5.3). A partir du taux de collecte (donnée ECOSYSTEM) et en réalisant des bilans massiques des produits à LED neufs et/ou déchets, une extrapolation des matériaux constitutifs des dispositifs, mais aussi des puces à LED et des drivers, est possible. Ces données, étant strictement confidentielles, ne nous ont pas été communiquées

¹² L'Institut des Sciences et de l'Ingénierie des Systèmes du Centre National de la Recherche Scientifique coordonne des recherches situées à l'interface des sciences, des technologies et des besoins de la société. Les travaux des laboratoires portent sur la conception, l'optimisation et le recyclage d'objets et de systèmes complexes [30].

par les acteurs du projet, que ce soit de la part des industriels, d'ECOSYSTEM ou des responsables de l'université de Bordeaux.

B. Etude de fragmentation des lampes à LED avec SELFRAG

L'entreprise SELFRAG a diligenté, en 2019, des études paramétriques sur des lampes à LED, sur les réacteurs de fragmentation électrodynamique discontinu (dispositif SELFRAG Lab) et continu (dispositif PWTS¹³). Les caractéristiques sont répertoriées dans le Tableau 1-7 [34].

Paramètre	SELRAG Lab	PWTS
Tension (kV)	90-200	50-200
Fréquence (Hz)	1-5	1-100
Gap électrodes (mm)	10-40	10-80
Nombre de pulses électriques	1-1000	1-1000
Volume réacteur (L)	2,78	-
Poids max échantillon (kg)	1	-
Débit max (t/h) [35]	-	10
Taille échantillon (h x d) (mm)	40x80	-
Température eau (réacteur) (°C) [36]	12-32	-
Energie tir (décharge) (J)	-	27,5-750
Consommation énergétique (kW)	-	20

Tableau 1-7 : Caractéristiques des réacteurs de fragmentation électrodynamique SELFRAG [34]

Ces essais auraient été réalisés en fonction des typologies et de la nature des matériaux constituant les lampes et les spots à LED, en faisant varier les paramètres machines (tension, nombre de pulses, fréquence, gap électrodes, etc.) sur chacune des deux machines laboratoires. Afin de démontrer la capacité de la technologie à déconstruire les dispositifs LEDs et la comparer, en conséquence, à celle des broyeurs mécaniques actuellement disponibles. Les protocoles et les résultats de ces études sont confidentiels et ne nous ont donc pas été communiqués par les acteurs du projet REDLED.

L'objectif de ces études est de confirmer la faisabilité de cette technologie, pour que le partenaire industriel MTB Recycling Manufacturing Engineering puisse concevoir, fabriquer et breveter des lignes entières de recyclage des produits à LED, de l'entrée du déchet jusqu'à la valorisation en matières premières secondaires. Une première machine de traitement, à l'échelle pré-industrielle, serait ainsi conçue chez COOLREC, puis des futures lignes pourraient être vendues aux industriels du recyclage, à travers le monde entier.

Notons par ailleurs, contrairement au projet RECYLED, le projet REDLED ne s'intéresserait nullement aux scénarii de réutilisation des sources lumineuses, potentiellement fonctionnelles (scénario I du projet RECYLED) et des composants électroniques valorisables, pour la fabrication de nouveaux dispositifs à LED et/ou leur réparation (scénario III du projet RECYLED). Effectivement, l'originalité du projet RECYLED, en plus de breveter la solution technologique de déconstruction des dispositifs à LED en fin de cycle de vie, est également de valoriser les voies de réutilisation des produits à LED et/ou de certains de leurs composants électroniques, encore fonctionnels. Ce double scénario de réutilisation est plus vertueux, en raison des durées d'utilisation des dispositifs et de leurs composants qui sont allongées. Dès lors, les impacts environnementaux liés à ces produits à LED, dans les analyses du cycle de vie, sont minimisés sur des plus longues durées de vie en moyenne.

¹³ Pre-Weakening Test Station.

C. Tri des matériaux plastiques des lampes à LED

Les matériaux plastiques des sources lumineuses à LED sont un frein au taux de recyclage réglementaire, imposé à 80% par les pouvoirs publics, car certains d'entre eux sont incorporés par des retardateurs de flamme bromés (RFBs) pour des raisons sécuritaires. La Directive européenne 2012/19/EU du 4 juillet 2012, relative au DEEE, impose un seuil réglementaire de RFB inférieur à 2000 ppm (0,2%-2 g/kg), pour que les matériaux plastiques puissent être recyclés [37].

Les travaux menés par le Laboratoire de Conception Produits et Innovation (LCPI), antenne de Chambéry d'Arts et Métiers, dans le cadre de la Chaire Mines Urbaines, pour caractériser par spectroscopie IR et fluorescence X les matrices plastiques, auraient permis d'analyser leur composition, puis de proposer une technique de tri et de séparation des plastiques bromés et non bromés : la technologie retenue est la flottaison.

La séparation des matériaux plastiques est effective par les différences de densités de ces derniers. Les systèmes optiques en PolyCarbonate (PC), ainsi que les corps et les culots en PolyButylèneTéréphtalate (PBT) ont une densité respective de 1,2 et 1,31. Le brome, ayant une densité de 3,1, incorporé dans les matrices plastiques induit une augmentation de la densité à 1,6. Dès lors, dans une solution aqueuse de chlorure de calcium (CaCl_2) de densité 1,41 : les matériaux plastiques chargés en brome à densité élevée coulent, alors que les matériaux non chargés flottent en surface. Cette méthodologie, peu coûteuse et simple à mettre en œuvre, permettra de valoriser les plastiques non incorporés par le brome, afin d'augmenter le taux de recyclage des dispositifs d'éclairage à LED, pour tendre vers le taux réglementaire.

Remarquons, en outre, les difficultés que nous avons rencontrées pour obtenir ces données, car les avancées du projet REDLED restent strictement confidentielles et de ce fait sont très peu diffusées par les acteurs académiques, industriels et leurs partenaires. Ceci est justifié car la demande actuelle des consommateurs suscite un tel engouement, que le développement de l'éclairage à LED ne cesse d'évoluer, depuis ces dernières années. Le marché induira, en conséquence, un fort besoin de traitement en fin de vie de ces nouveaux équipements, surtout dans la seconde moitié de la décennie. Si bien que, les industriels ainsi que leurs partenaires universitaires se doivent d'être pionniers, afin de remporter les futurs appels d'offres de traitement de cette nouvelle catégorie de DEEE, qui seront lancés à partir de 2023, par ECOSYSTEM [3] [23]. Abordons désormais l'évolution de l'éclairage, par le déploiement de la technologie LED.

1.5. Développement de l'éclairage à LED

Nos ancêtres ont longtemps été tributaires de la lumière naturelle du soleil. L'histoire de l'utilisation de la lumière a commencé, il y a 500 000 ans, avec la domestication du feu. Dès lors, la lumière et la chaleur pouvaient être utilisées de manière ciblée et depuis la lumière artificielle prolonge la journée naturelle. Pendant longtemps, pour obtenir de la lumière, les hommes brûlaient du bois ou de l'huile. Cependant, ce n'est qu'à la révolution industrielle que sont apparus les changements révolutionnaires : l'alimentation au gaz et le courant électrique, peu de temps après, ont acquis la primauté dans la distribution de l'énergie et la production de lumière. Depuis plus de 130 ans, la lumière artificielle est omniprésente. Aujourd'hui, la vie moderne est impensable sans la lumière artificielle. La société actuelle est active nuit et jour, nous passons la majeure partie de notre temps dans des espaces intérieurs. L'extérieur est, quant à lui, également éclairé que ce soit par l'éclairage des rues ou l'illumination décorative. Les besoins en lumière artificielle sont très grands et les exigences très élevées. La lumière artificielle doit être disponible partout, sa production doit être économique et écologique. Les sources lumineuses modernes sont très efficaces et produisent une lumière de bonne qualité. La part de l'éclairage représente 14% de la consommation électrique

en Europe et 19% à l'échelle mondiale [2]. Dans cette part, l'éclairage professionnel représente environ 80% et celui à usage domestique environ 20%. Le secteur de l'éclairage a produit de nombreux types de lampes. Elles se différencient par leur forme et le type de technologie (incandescence, halogène, CFL et LED), illustrés sur la Figure 1-16. Les principaux critères des sources lumineuses modernes sont la qualité de la lumière produite, l'efficacité du flux lumineux, une faible consommation d'énergie et une grande durée de vie [38].



Figure 1-16 : Evolution des technologies des sources lumineuses : Incandescence (a), halogène (b), CFL (c) et LED (d) [39]

En France, pour alimenter les illuminations de Noël, la puissance électrique nécessaire s'élève à 1300 MW (MégaWatts). 75% de cette surconsommation est due aux éclairages chez les particuliers. Celle-ci représente l'équivalent de la consommation annuelle de 600 000 réfrigérateurs récents. Grâce à l'utilisation de la technologie LED, moins énergivore, ces chiffres ne cessent de diminuer. La ville de Paris a, par exemple, considérablement réduit la consommation et le budget des illuminations. En passant aux sources lumineuses à LED, les 800 000 points lumineux de l'avenue des Champs Elysées ne consomment pas plus qu'une famille de 4 personnes en une année, soit 10 990 kWh. Cette consommation est divisée par 4 par rapport à 2013 et par 50 par rapport à 2006 [1].

1.5.1. Eclairage public français

Entre 2012 et 2017, près de 80% des lampes d'éclairage public auraient dû être remplacées, du fait de la réglementation européenne, dans le cadre du projet européen Streetlight-EPC (Energy Performance Contracting¹⁴), entre avril 2014 et mars 2017 [40]. Les communes rurales concentrent, aujourd'hui, la majorité des sources CFL encore en fonctionnement. Un million de points lumineux « ballons » ont été recensés en 2015. Ces sources sont énergivores et induisent de grandes pollutions lumineuses. Le prix de l'électricité dédiée à l'éclairage public a augmenté de 40%, entre 2005 et 2012. Des hausses annuelles se répercutent sur les factures, quelle que soit la durée d'éclairage choisie. Une rénovation, à plus ou moins long terme, est donc inéluctable [41].

L'éclairage public est un bon « terrain d'apprentissage et d'essai » pour l'EPC, en raison de sa moindre complexité technique et économique, par rapport à l'EPC du bâtiment. En outre, la récente introduction, sur le marché, de la technologie LED pour l'éclairage public offre des économies d'énergie et de coûts élevées, avec des temps de retour sur investissement relativement courts. Les contrats de performance énergétique sont une solution efficace, pour réaliser la rénovation de l'éclairage public [41]. Avec une part conséquente sur la facture d'éclairage, 20% en moyenne, la diminution de la puissance souscrite peut rapidement se répercuter sur la facture. La puissance des lampes installées joue donc un rôle crucial dans les dépenses énergétiques. En fonction de la technologie remplacée, ainsi que celle de remplacement, les estimations des économies potentielles sont [41] :

¹⁴ Contrats de Performance Energétique : CPE.

- 30% en remplaçant les lampes à vapeur de mercure par des lampes sodium ;
- 70% en remplaçant les lampes à vapeur de mercure par les technologies les plus performantes, telles que les sources à LED ;
- 90% en remplaçant les anciennes technologies par des dispositifs à LED, dotés de détecteur de présence.

Le coût total de la rénovation des lampes énergivores, hors coûts d'infrastructures et de mise en conformité électrique des réseaux, est évalué à 500 millions d'euros, avec un coût moyen de 500 € TTC par luminaire, variable en fonction de la solution technologique choisie [41]. La Figure 1-17 présente les consommations globales d'électricité dues à l'éclairage en France, entre 2012 et 2018 :

- Pour le territoire à 56 TWh (soit 12% de la consommation d'électricité française) ;
- Pour l'éclairage public à 5,6 TWh ;
- Pour l'éclairage intérieur toute collectivité confondue à 7 TWh ;
- Pour les bâtiments non résidentiels à 37 TWh (9,5 TWh dans les commerces, 6 TWh dans les bureaux, 4 TWh dans les établissements de santé et 4 TWh dans l'enseignement, etc.).

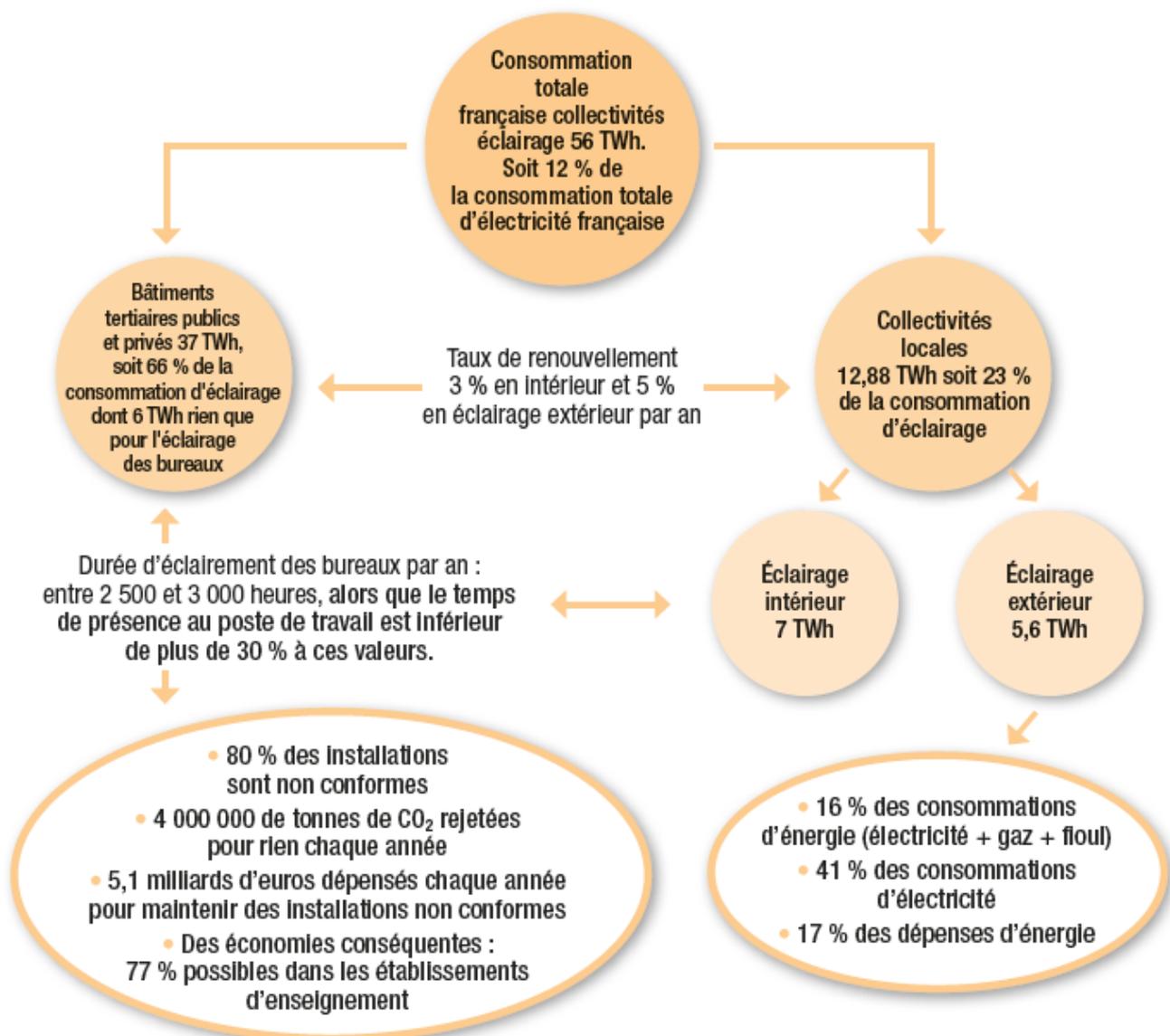


Figure 1-17 : L'éclairage dans les collectivités : les chiffres clés, entre 2012 et 2018 [42]

Les luminaires d'éclairage public auraient dû être remplacés du fait de la réglementation européenne, des nouvelles performances électriques et photométriques des luminaires [40]. Le parc français est vieillissant, 25% à 30% des luminaires en service ont plus de 25 ans et ne sont plus conformes, dont près de 1 million de « ballons » CFL en 2015 [42]. La France compte 10,5 millions de sources lumineuses qui éclairent nos routes. En outre, l'analyse de l'état des lieux des installations d'éclairage, confirmée par le Grenelle Environnement, fait apparaître d'importants besoins de rénovation de notre parc d'éclairage, dont plus de la moitié de ce dernier est composée de matériels obsolètes et énergivores. Pour cette raison, il présente un potentiel d'économies d'énergie estimé entre 50% et 75%, résumé dans le Tableau 1-8.

Consommation annuelle de l'éclairage public	5,6 TWh soit 1% de la production totale d'électricité
Nombre de points lumineux	10,5 millions dont près de 1 million de lampes à vapeur de mercure, recensées en 2015, année d'interdiction de leur mise sur le marché
Age moyen du parc d'éclairage public	20-30 ans (25% des luminaires en service ont plus de 25 ans)
Temps moyen de fonctionnement par an	3600 heures en moyenne pour une commune de métropole (les durées peuvent varier en fonction de la collectivité et sont comprises entre 3100 et 4100 heures)
Temps de fonctionnement en heures creuses	86% (2752 heures) alimentées en énergie nucléaire, sans production de CO ₂
Temps de fonctionnement en heures pleines et heures de pointe	14% (448 heures) dont 50% alimentées en énergie thermique avec CO ₂
Puissance en pointe demandée par l'éclairage public urbain à plein régime	1,32 GW, soit 1,26% de la plus haute pointe EDF (février 2012)
Prix moyen	0,14 € TTC/kWh (0,077 € en 2015)
Production totale annuelle de CO ₂	L'éclairage public produit 85 000 tonnes de CO ₂ , soit 800 fois moins que le parc automobile des véhicules de tourisme en France
Répartition kilométrique linéaire, éclairée par l'éclairage public (voies et abords) sur l'ensemble du territoire	33 points lumineux / km de voie éclairée en fonction de la nature des voies éclairées (de 22 à 46)
Potentiel global d'économie d'énergie	Entre 50% et 75% (sources à technologie LED)

Tableau 1-8 : Caractéristiques de l'éclairage en France, entre 2021 et 2018 [42]

Un français sur cinq estime que sa rue n'est assez éclairée [43]. L'éclairage public est un enjeu central de sécurité. 87% des français pensent qu'il constitue un facteur de sécurité, la nuit sur les routes départementales et communales [44]. Plus d'un français sur quatre (28%) a déjà vécu une situation particulièrement dangereuse, la nuit en raison d'un problème de visibilité [45]. Les français continuent de penser, à 73%, qu'il est possible d'allier environnement, baisse des dépenses et progrès de l'éclairage. L'amélioration de l'efficacité énergétique des luminaires constitue la solution privilégiée, pour continuer d'augmenter la sécurité de la population en éclairant davantage les espaces publics, tout en réduisant la consommation d'électricité, par l'éclairage moderne à technologie LED [42].

La part de marché des lampes à LED pour l'éclairage des bâtiments est passée de 35% en 2017 à 61% en 2020 [46]. Le taux de pénétration des équipements à LED en France, pour l'éclairage public est estimé à 15%. D'après la commission européenne, les dispositifs d'éclairage à LED en Europe représentaient 4% des luminaires routiers des 28 pays, en 2015 [1].

Par ailleurs, les installations vétustes sont sources de nuisances et de pollution lumineuse, 30% à 40% d'énergie serait perdue. Selon l'UNEP (United Nations Environment Program), le passage aux nouvelles technologies d'éclairage à LED permettrait d'économiser 140 milliards de dollars et de réduire les émissions de CO₂ de 580 millions de tonnes annuellement [1]. Cette décennie jouera donc un rôle essentiel dans cette rupture technologique, qualifiée de transition des technologies d'éclairages « traditionnelles », vers des technologies d'éclairage des « semi-conducteurs », sur les aspects environnementaux, techniques et économiques.

1.5.2. Eclairage à l'université : exemple du campus de l'UTT

Dans le cadre de la thèse, nous avons réalisé une étude prospective, afin d'évaluer les économies d'énergie potentielles, que nous pouvons réaliser, en remplaçant les lampes fluo-compacts et les tubes fluorescents, par des systèmes d'éclairage à technologie LED. Cette analyse économique a été effectuée sur l'ensemble du campus de l'Université de Troyes, comprenant 44 000 m² de bâtis et 4046 points lumineux (cf. Figure 1-18). Il a été considéré les premiers remplacements, ayant débuté en 2014, par des blocs secours de l'Ellipse de l'UTT, en allant jusqu'à horizon 2026, avec le changement des tubes traditionnels 60 cm par des dalles LEDs à pilotage radio, équipées de détecteurs de présence.

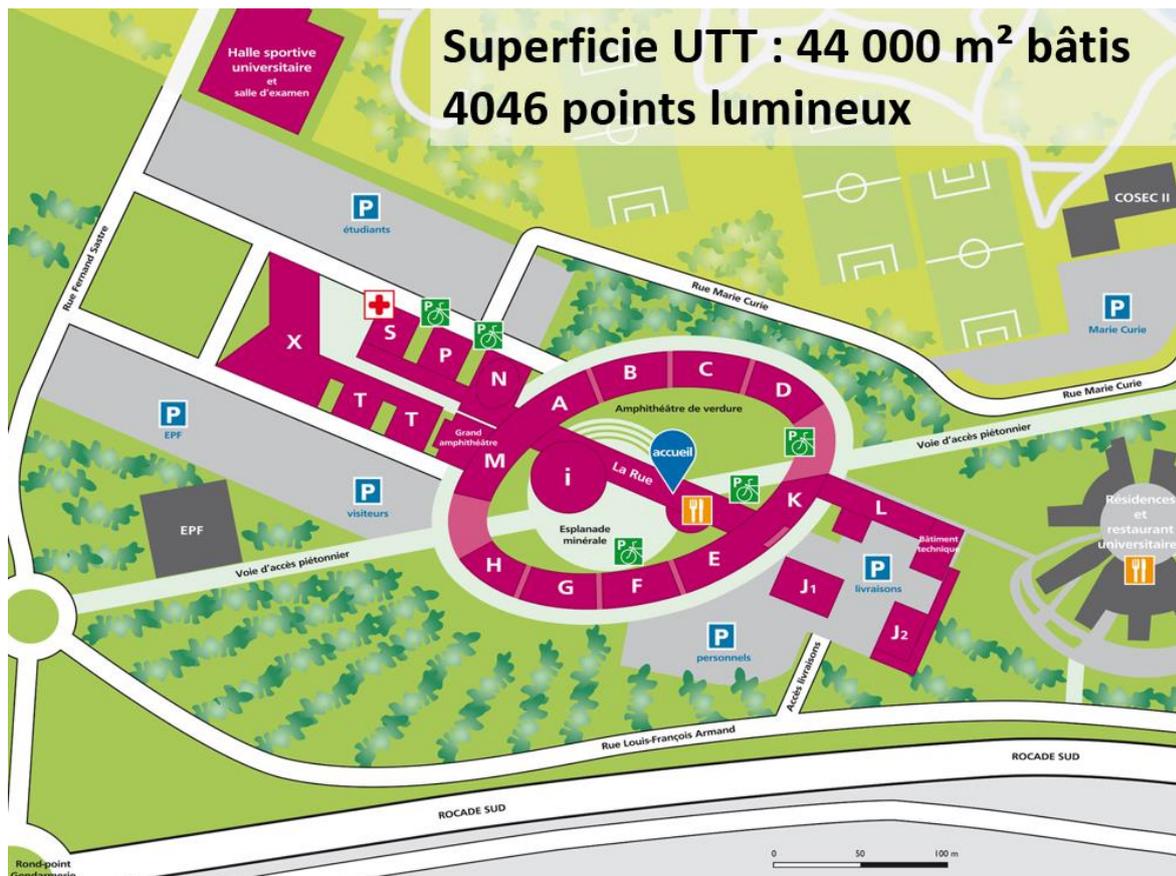


Figure 1-18 : Campus de l'Université de Technologie de Troyes

L'UTT a initié une campagne de remplacement des systèmes d'éclairage traditionnels par des sources lumineuses à technologie LED. Le Tableau 1-9 synthétise l'ensemble des gains énergétiques et financiers réalisés, depuis 2014 jusqu'en 2022. La consommation totale des

sources lumineuses non LEDs est estimée à 660 105 kWh et celle des sources LEDs à 240 965 kWh. Soit un gain énergétique de 419 140 kWh, correspondant à un gain financier HT de 33 531 € (0,08 € le kWh). Dès lors, l'économie énergétique réalisée, par l'utilisation des équipements d'éclairage à LED à l'UTT, est appréciée à hauteur de **63%**.

Année	Localisation	Quantité	Durée de fonctionnement (h)	Source NL = Non LED L = LED	Puissance (W)	Consommation (kWh)	Gain (kWh)	Gain cumulé (kWh)	Gain cumulé HT (€)
2014	Blocs secours Ellipse	658	8760	NL	10	57641	51877	51877	4150
				L	1	5764			
2017	Parkings	54	2720	NL	160	23501	11457	90309	7225
				L	82	12044			
2017	Halle sportive (grande salle)	45	1600	NL	440	31680	20736	90309	7225
				L	152	10944			
2017	Couloirs Ellipse	400	1200	NL	22	10560	6240	90309	7225
				L	9	4320			
2017 à 2019	Salles de plus de 50 personnes (bât A, B, C, D)	20	3500	NL	10	700	630	90939	7275
				L	1	70			
2020	Eclairage voirie	42	3650	NL	250	38325	19929	203140	16251
				L	120	18396			
2020	Bureaux et autres salles (bât A, B, C, D)	400	2200	NL	100	88000	52800	203140	16251
				L	40	35200			
2020	Bibliothèque universitaire	150	3000	NL	90	40500	31500	203140	16251
				L	20	9000			
2020	Blocs secours	70	8760	NL	10	6132	5519	203140	16251
				L	1	613			
2020	Blocs phares	7	8760	NL	50	3066	2453	203140	16251
				L	10	613			
2021 à 2022	Bâtiments de recherche E, F, G, H	1200	3000	NL	100	360000	216000	419140	33531
				L	40	144000			

Tableau 1-9 : Gains énergétiques et financiers par l'utilisation des sources lumineuses à LED à l'UTT

Par ailleurs, les services techniques de l'UTT prévoient à horizon 2026 l'utilisation des dalles LEDs à pilotage radio, fonctionnant avec des détecteurs de présence et/ou de luminosité. Ceci pour favoriser l'éclairage au juste nécessaire et par conséquent maximiser les gains énergétiques et financiers. La consommation de tels dispositifs à LED est inférieure de 30% par rapport aux dispositifs à LED classiques, soit une consommation estimée à hauteur de 168 675 kWh. Les gains énergétiques et financiers HT sont donc évalués respectivement à 491 429 kWh et 39 314 €. La Figure 1-19 illustre les gains pour les sources LEDs classiques (a) et à pilotage radio (b), entre 2014 et 2022. L'économie énergétique réalisée, par l'utilisation des systèmes d'éclairage à LED pilotés, aurait été appréciée à hauteur de **74%**.

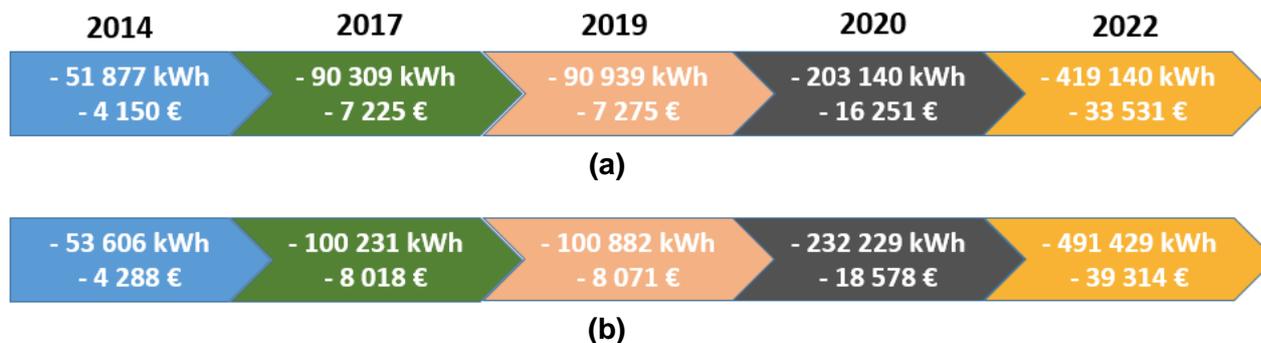


Figure 1-19 : Economies énergétiques et financières des sources à LED à l'UTT : Classiques (a) et à pilotage radio (b)

Le remplacement des dispositifs d'éclairage traditionnels actuels par des systèmes à technologie LED permettra, à horizon 2022, des gains énergétiques et donc économiques à hauteur de 63%. L'utilisation des systèmes d'éclairage intelligents, tels que les dispositifs à pilotage radio, permettrait d'accroître ces gains de 11%. Le choix de cette technologie LED à ondes radio induirait ainsi une économie substantielle de 72 289 kWh, correspondant à un gain financier de 5 783 €.

1.5.3. Eclairage privatif des logements français

La consommation électrique des ménages français, hors chauffage et eau chaude, est en moyenne de 2700 kWh/an. Les ménages consacrent 12,8% de leur consommation d'électricité spécifique à l'éclairage, soit entre 325 et 450 kWh/an, ce qui représente un coût annuel moyen d'environ 60 €. A titre de comparaison, les appareils laissés en veille représentent entre 7% et 18% de la consommation électrique. Le temps d'éclairage moyen chez les ménages est de 2464 heures par an, soit 6,7 heures par jour. Chaque foyer possède en moyenne 25 points lumineux et achète 3 lampes neuves chaque année [1] [47].

En 2017, les ventes de lampes à LED ont fortement progressé en France pour dépasser les 127 millions d'unités, soit les trois quarts des lampes vendues au cours de l'année, 169 millions d'unités au total. Entre 2016 et 2017, le nombre de lampes à LED vendues a bondi de près de 46%, passant de 87 à 127 millions, d'après l'éco-organisme ECOSYSTEM [3] [23].

Prenons pour exemple, l'allongement de l'espérance de vie, dans des conditions de santé et d'autonomie souvent bien préservées. Un nombre croissant d'octogénaires et souvent de nonagénaires vivent à leur domicile. Cette solution est souvent préférable à leur placement dans des structures spécialisées, telles que les EHPAD¹⁵. Il a été démontré que tant qu'une personne âgée peut maintenir un degré d'autonomie suffisant, il est fortement conseillé de la laisser dans un environnement familial. Outre l'absence de perte des repères immédiats, ce maintien à domicile permet de préserver des interactions sociales avec l'entourage (famille, amis, voisins, etc.). Les pouvoirs publics ont mis en place de nombreuses aides le favorisant. Néanmoins, ce maintien à domicile se fait dans une résidence ou une maison dans laquelle ces personnes vivent souvent depuis longtemps. Elles n'ont pas réellement modifié ou adapté l'agencement ni l'éclairage des pièces de vie (séjour, salle à manger, chambre et bureau), des zones de circulation (couloirs) et des pièces à risques d'accidents (cuisine, salle de bains et toilettes) [48].

De ce fait, l'architecture intérieure des logements ne s'accorde plus à leur état physiologique qui s'est modifié. Les besoins visuels, de lumière et d'éclairage des personnes âgées de plus de 75 ans ne sont pas ceux d'une personne de 55-60 ans. Du fait du vieillissement physiologique de l'œil et de la rétine, il est nécessaire d'avoir plus de lumière, pour la réalisation des tâches nécessitant une certaine précision. Ce besoin est accru en cas de pathologies telles que la cataracte, ou d'atteintes oculaires liées au diabète et à la prise de médicaments. Aussi, cette baisse de l'acuité visuelle, chez ces personnes âgées, peut être compensée par un éclairage de qualité. Rappelons l'importance de la vue dans la vie quotidienne : celle-ci apporte 80% des informations essentielles aux activités courantes, dont certaines nécessitent une plus grande précision, un éclairage plus intense et plus adapté, surtout avec l'âge. Citons la lecture, facilitée par une lampe d'appoint et les tâches quotidiennes demandant de bien discerner les activités, prendre sans confondre les médicaments, préparer et couper les aliments, etc. C'est pourquoi, un éclairage inadapté dans sa direction et/ou son intensité, auquel s'ajoute une baisse des capacités visuelles et de multiples autres altérations liées à l'âge, constitue une cause d'accidents domestiques et d'erreurs dans la prise de traitements, avec parfois des conséquences pouvant être dramatiques. Par ailleurs, un éclairage inadapté multiplierait par sept les risques de chutes domestiques qui chez les personnes âgées sont potentiellement gravissimes. Elles sont très souvent responsables de fractures,

¹⁵ Etablissement d'Hébergement pour Personnes Agées Dépendantes.

notamment du col du fémur, impliquant un geste chirurgical ou au minimum une hospitalisation. Ces chutes constituent donc des événements traumatisants pouvant avoir, en conséquence, des impacts psychologiques irréversibles. Avec de telles expériences, les personnes âgées peuvent développer une peur de sortir, pour éviter de retomber. Cette crainte est justifiée car une personne « chuteuse » présente 20 fois plus de risque de rechuter qu'une personne n'ayant jamais fait de chute. La crainte de sortir est appelée le syndrome du glissement, ayant pour conséquences la perte des interactions sociales et le placement en EHPAD. Selon une évaluation réalisée en 2001 en Australie, le coût humain mais aussi financier de ces chutes, dues à la mauvaise vision chez les personnes âgées, s'élèverait à 500 millions de dollars [48].

Par ailleurs, il faut noter qu'un mauvais éclairage peut entraîner des troubles de l'humeur, avec un certain degré de désorientation temporel et des tendances dépressives. Aussi, rappelons l'impact négatif sur le sommeil causé par les nuisances lumineuses de l'éclairage urbain. Il est recommandé de disposer de veilleuses dans un couloir plutôt que de laisser des rideaux ouverts, afin de se déplacer la nuit avec une lumière de fond. Il est essentiel d'insister sur l'amélioration de la prise d'informations visuelles dans les logements des personnes âgées qui comporte un quadruple enjeu : sanitaire, sécuritaire, social et économique pour la société. Elle va réduire les accidents domestiques et leurs coûts inhérents permettant ainsi leur maintien à domicile, dont nous avons déjà évoqué l'importance, pour le maintien des liens sociaux, en limitant les besoins de placements en structures spécialisées. La protection et l'adaptation des capacités visuelles des personnes âgées permettent d'une part une meilleure prise en charge des pathologies ophtalmologiques, en ajustant les corrections optiques, et d'autre part l'optimisation de l'architecture intérieure des logements [48].

Ces améliorations passent indéniablement par la suppression des obstacles accidentogènes (meubles, équipements, etc.) et par l'adaptation de l'éclairage intérieur. Il est essentiel de travailler sur la disposition des sources lumineuses pour supprimer les zones de travail mal éclairées et/ou pour éviter que les personnes ne créent des zones d'ombre dans leurs lieux de vie ou leurs activités. Pour ce faire, il est nécessaire de multiplier les sources lumineuses par association des éclairages larges et des systèmes à diffusion plus ponctuelle. Par exemple, les sources d'éclairage large, provenant du plafond, peuvent être associées à des spots, pour éclairer spécifiquement le plan de travail de la cuisine ou à des lampes à éclairage directionnel placées à proximité d'un canapé, pour la zone de lecture. En addendum, il faut apporter un soin particulier aux zones de circulation. Ceci est essentiel la nuit pour permettre de se déplacer dans un couloir, sans risque d'accident, lorsqu'il n'est pas possible d'allumer la totalité de l'éclairage, pour éviter de réveiller l'ensemble des occupants du logement. L'éclairage doit être adapté pour être à la fois peu intense et faire ressortir les éventuels obstacles [48].

Le choix des températures de couleur de la lumière est également important et doit être adapté à la destination des pièces. Ainsi, il est recommandé des températures élevées (lumières froides) avec un éclairage proche de la lumière naturelle, pour les zones nécessitant une vision technique ou de précision, comme la cuisine ou la salle de bains. Toutefois, des températures faibles (lumières chaudes) sont préférables dans les pièces à vivre, tels que le salon ou la chambre, car elles sont plus confortables et plus reposantes [48].

Pour éclairer un espace, le flux lumineux doit être adapté en fonction des pièces du logement. Ci-dessous les niveaux d'éclairage généralement conseillés [47] :

- Hall d'entrée : 100 lux¹⁶ ;
- Chambre : 200 lux ;
- Cuisine ou salle à manger : 300 lux ;
- Bureau : 400 à 500 lux.

¹⁶ Unité pour mesurer l'éclairement : lux (lx). Elle désigne le flux lumineux reçu par unité de surface (1 lx = 1 lm/m²).

Des solutions existent aujourd'hui, grâce à la technologie LED. Les éclairagistes et les fabricants de dispositifs à LED ne cessent d'innover dans ce domaine, pour mettre en place des systèmes intelligents. L'éclairage intelligent deviendra l'épine dorsale des maisons et des villes intelligentes de demain. Ainsi, il sera au cœur de « l'Internet des objets ».

1.5.4. Les domaines d'application de la technologie LED

Toujours fiable, et malgré tout pleine de surprises, la lumière naturelle nous guide et nous accompagne depuis la nuit des temps. Elle soutient intuitivement notre rythme naturel et possède une influence dynamique sur notre capacité à voir et à ressentir les émotions, nous donnant de nouvelles images, pour nous stimuler au jour le jour. Elle contrôle les processus humains et affecte même notre horloge biologique interne. Les fabricants de dispositifs d'éclairage à LED possèdent cette capacité unique à imiter la lumière naturelle et à l'adapter à notre cadre de vie. Ouvrant ainsi le temps et l'espace à différents niveaux des interactions humaines, lorsqu'ils sont combinés à notre architecture avec succès. Dès lors, le mélange minutieux de l'intensité, de la couleur et de la direction, au moment opportun, peut seconder la lumière naturelle, éveillant une meilleure qualité de vie, grâce à la lumière artificielle [38].

Par ailleurs, la crise sanitaire de la COVID-19 a eu pour conséquences trois confinements, au printemps et automne 2020 ainsi qu'au printemps 2021. Beaucoup de français ont découvert le télétravail et ont utilisé, de façon plus intense, la lumière artificielle pour travailler, se détendre, se cultiver et s'informer. Dès lors, 22% des français ont constaté l'apparition de troubles visuels non observés jusqu'alors [49]. Comment pouvons-nous éviter ces troubles aujourd'hui ? D'autant plus que l'automne est peu propice au confort visuel à cause de l'heure d'hiver et de l'éclairage artificiel. Un manque de lumière, associé à une installation inadaptée, peut déclencher des symptômes de fatigue visuelle qu'il est aisé de soulager. L'utilisation de l'éclairage à LED peut améliorer notre cadre de vie. Une mise en lumière réussie allie les quatre dimensions de la lumière : l'orientation, l'intensité, la couleur et le temps, pour une compréhension et une appropriation approfondies de la situation des lieux d'exposition. La LED est un produit semi-conducteur opto-électronique qui produit de la lumière, lorsqu'elle est parcourue par un courant électrique. La longueur d'onde, de l'émission semi-conductrice qui peut être convertie en lumière blanche, dépend de la nature du matériau semi-conducteur. Le spectre d'une LED blanche offre un avantage capital : il n'émet que de la lumière (rayonnement électromagnétique) dans la plage visible et n'émet pas de rayonnement ultraviolet ou infrarouge. Les propriétés des LEDs sont nombreuses [38] :

- Grande efficacité (rendement lumineux élevé lumens/watt) ;
- Longévité accrue ;
- Large spectre de lumière blanche (blanc chaud à blanc lumière du jour) ;
- Pas de rayonnement ultraviolet ou infrarouge ;
- Bon voire très bon indice de rendu des couleurs ;
- Flux lumineux et longévité dépendant fortement de la température (augmentent par des températures plus basses) ;
- Pas de matériaux présentant un risque pour l'environnement (absence de mercure) ;
- Résistantes aux vibrations et aux chocs ;
- Allumage immédiat (100% du flux lumineux dès activation).

Les exigences relatives à l'éclairage, dans le milieu de travail, évoluent au fil du temps, en fonction des lieux, des personnes, ainsi que des activités à accomplir. Un système de gestion de l'éclairage s'adapte aux besoins concrets et fournit toujours un éclairage optimal. Le travail concentré et l'intensification de la communication posent des exigences variées à l'éclairage. Des composantes d'éclairage artificiel, à technologie LED, agissent sur le rythme nyctéméral. Apportées au bon

moment, elles soutiennent, avec la lumière du jour, l'horloge interne et ont un effet stimulant. Avec une gestion temporelle, une commande en fonction de la lumière du jour et une détection de présence, les dispositifs à LED ont atteint un degré d'automatisation élevé qui s'accompagnent d'un maximum d'économie d'énergie et d'une augmentation de la flexibilité d'adaptation. Lorsque les utilisateurs peuvent intervenir eux-mêmes sur l'éclairage de leur environnement de travail, la technologie profite d'un degré élevé d'acceptation [38].

Les nouvelles formes d'enseignement et les technologies médiatiques exigent une adaptation fréquente de l'éclairage, pour l'éducation et le savoir. Les appareils de commande intuitifs avec des ambiances définies réalisent ces adaptations, pour le travail en groupes réduits ou les cours magistraux, pour les présentations avec des vidéoprojecteurs, qui requièrent un niveau d'intensité plus faible, ou pour les explications au tableau avec des éclairages verticaux plus intenses. La lumière naturelle stimule et accroît le bien-être, ainsi que la capacité de rendement. Une commande en fonction de la lumière du jour et une détection de présence offrent un maximum d'économie d'énergie, sans pour autant affecter la qualité. Le couplage de l'éclairage et de la commande des stores améliore les contrastes ainsi que le confort de la pièce, en minimisant l'éblouissement et le développement de la chaleur [38].

Dans le monde de l'hôtellerie et du bien-être, les désirs personnels du client ont toujours la priorité. L'éclairage personnalise l'environnement, en combinant la commande des stores avec l'adaptation de la lumière du jour et la lumière artificielle, aux différentes exigences de la pièce et visuelles. Des ambiances lumineuses dynamiques, en fonction des conditions météorologiques ou de l'heure du jour, influencent le bien-être des clients, plus particulièrement dans les zones gastronomiques. Par ailleurs, à l'entrée du bâtiment, les ambiances adaptées à la lumière extérieure optimisent les conditions d'accommodation de l'œil humain. Elles donnent, ainsi, un sentiment de sécurité et facilitent l'orientation des clients. Dans les salles de conférences, des programmes d'éclairage définis permettent l'utilisation des divers outils médiatiques, en apportant la lumière nécessaire [38].

L'éclairage LED, avec des systèmes de commandes intuitifs, permet d'adapter les ambiances lumineuses aux diverses activités commerciales, telles que la vente, la présentation des marchandises, la lumière de travail des comptoirs, jusqu'aux variations de couleurs attrayantes dans les zones d'accueil. En raison de la sensibilisation croissante en matière d'énergie, de plus en plus de luminaires graduables sont utilisés dans les espaces de vente. La variation des températures de couleur, en combinaison avec la luminance, valorise les matériaux des marchandises et de l'architecture.

Un grand confort, plus de flexibilité et moins d'entretien sont les caractéristiques des solutions lumineuses à technologie LED, intégrant une gestion de l'éclairage. Elles facilitent, par exemple, l'adaptation optimale du spectre lumineux aux objets à éclairer, sans devoir changer de filtre. Des points de commande adéquats permettent de modifier en douceur l'éclairage de base, à l'aide de lignes temporelles ou d'une régulation, en fonction de la lumière du jour. L'exploitation de la lumière du jour économise non seulement l'énergie et rend aussi certaines zones de l'établissement commercial très captivantes. Une mise en scène émotionnelle des marchandises, ainsi que des effets de surprise peuvent être obtenus avec des programmes d'éclairage statiques et dynamiques, répondant aux besoins de la clientèle [38].

Dans le domaine de l'art et de la culture, la gestion intelligente de l'éclairage permet de doser l'exposition des objets sensibles, à la lumière, de manière à ce qu'ils reçoivent juste la lumière exclusivement essentielle. Elle modifie le niveau d'éclairage ou de couleur des lumières, pour assurer une bonne perception visuelle. Grâce à des détecteurs de présence, cet éclairage n'est actif que lorsque des visiteurs se trouvent dans la salle. Les temps d'allumage et d'extinction peuvent être programmés à des plages horaires déterminées. En outre, la gestion des stores ainsi que celle des capteurs de lumière du jour ne laissent entrer que la lumière du jour strictement nécessaire, en équilibre entre architecture, bien-être des personnes, conservation des objets exposés et coûts énergétiques [38].

Au sein des établissements de santé (hôpitaux, centres de soins, etc.), des solutions à technologie LED offrent des possibilités de commandes intuitives, adaptées aux besoins des patients par une gestion de l'éclairage, depuis la lumière intime et confortable jusqu'à l'éclairage des soins. En raison du vieillissement de l'œil, le besoin de lumière augmente avec l'âge. La lumière artificielle peut-être adaptée individuellement aux tâches visuelles du personnel soignant ou des malades. En raison du processus de dégradation, l'œil filtre les composantes bleues, qui ont un effet biologique important. L'horloge interne ainsi que les comportements du sommeil et du repos, qui sont liés, doivent être soutenus par des séjours en plein air et complémentaires par une lumière artificielle, à effet biologique d'intensité élevée, comportant une part importante du rayonnement bleu. Ces systèmes d'éclairage bioactifs recherchent des lignes temporelles dans la gestion de l'éclairage, perfectionnant l'interaction entre lumière du jour et lumière artificielle, et ce, à toute heure de la journée [38].

Le travail en équipe et de nuit, ainsi que le manque de lumière du jour, dans les locaux industriels et techniques, font que les durées de fonctionnement des installations d'éclairage dans l'industrie sont très importantes. Cela implique donc un fort potentiel d'économie d'énergie, assuré par les dispositifs d'éclairage à LED. Par ailleurs, des systèmes de gestion, durables et efficaces, de l'éclairage à LED réduisent l'entretien et les coûts associés. La gestion optimale de l'éclairage assure de manière efficiente la flexibilité exigée, dans les zones de production. Des boîtiers de commande et/ou des détecteurs, en fonction de la lumière du jour, apportent une réduction supplémentaire de la consommation d'énergie, en adaptant continuellement la puissance des dispositifs, en fonction de l'apport lumineux du jour, ou à la durée de fonctionnement. Des interfaces avec d'autres équipements techniques assurent, en outre, une exploitation confortable et économique des bâtiments et des locaux techniques [38].

Les systèmes intelligents gagnent également en importance dans les espaces extérieurs et architecturaux. Ils constituent une étape essentielle, pour atteindre des objets durables. Dans le contexte d'une approche centrée sur l'humain et les aspects sociaux, cette étape est considérée comme faisant partie d'un processus de conception complet. Le contrôle des systèmes à LED semi-autonomes est effectué sur la base du comportement humain (détection de la présence), des activités et des émotions (température de couleur variable) et en fonction des heures de la journée. Ces dispositifs intelligents offrent une flexibilité accrue pour contrôler chaque luminaire. Ces solutions technologiques de lumières adaptatives offrent la possibilité d'agencer l'éclairage, par une segmentation de la lumière, de façon à ce que les luminaires remplissent différentes tâches, à partir d'un emplacement unique [38].

Les scènes d'éclairage, statiques ou dynamiques, permettent de modifier complètement les ambiances des lieux de travail et de vie, en optimisant l'éclairage lumineux, sans ombre par exemple. Les espaces de vie peuvent avoir des impacts favorables sur la santé d'un point de vue biologique. Les ambiances lumineuses garantissent une transition plus naturelle et plus saine le soir, avec une lumière tamisée et rougeoyante pour un sommeil réparateur. Les effets directs, de cette ère technologique du tout LED, sont la contribution et l'amélioration du bien-être des individus dans leurs espaces de vie, tel que leur domicile.

1.5.5. Maison intelligente : la domotique

Ces dernières années, le concept de « maison intelligente » a connu un essor considérable. Le terme « domotique » est entré dans le langage courant. Ce concept repose sur un ensemble de dispositifs connectés permettant de commander les différents éléments d'un espace de vie, tels que le chauffage, la vidéosurveillance ou encore la lumière. Son principal objectif est d'apporter un maximum de confort et de sécurité aux occupants des logements. Le développement de la domotique repose en majorité sur l'éclairage intelligent, dont le fonctionnement révolutionnaire

permet de faciliter la vie quotidienne et d'optimiser l'efficacité énergétique. Cette technologie rend possible la programmation de l'éclairage à distance et à des heures prédéfinies, selon les envies et les humeurs de chacun. Il est possible de régler la luminosité d'une pièce, pour réguler la consommation d'énergie ou tout simplement pour modifier l'ambiance. Par ailleurs, ce type de dispositif intelligent permet de programmer des scénarii de lumière, pour simuler une présence dans le logement et ainsi dissuader toute intrusion malveillante, alors que les occupants du logement sont éloignés à plusieurs centaines de kilomètres. De plus, grâce à des détecteurs de présence intégrés aux luminaires à LED, il est possible d'être alerté, par allumage automatique des lumières, lorsqu'un individu s'est introduit dans une pièce [50]. En conséquence, l'éclairage intelligent, permet d'accroître la sécurité des logements et de leurs occupants, en réduisant les risques de cambriolage. Le matériel requis pour l'installation d'un dispositif d'éclairage intelligent est [48] :

- Des commutateurs optiques ;
- Un logiciel ou application pour faciliter les commandes ;
- Un dispositif de commande (smartphone, tablette ou télécommande) pour effectuer les réglages ;
- Des sondes ou des capteurs de présence ;
- Des interrupteurs infrarouges ;
- Des lampes, des prises et des dimmers connectés ;

Afin de bénéficier d'un système d'éclairage intelligent complet, il faut aussi intégrer à la domotique l'éclairage extérieur (jardin, cour, préau, terrasse, etc.). Plusieurs types d'éclairages peuvent être intégrés aux systèmes domotiques [50] :

- Les luminaires d'ambiance : permettant d'attirer le regard. Ce type d'éclairage peut aussi bien diffuser une lumière diffuse que directe ;
- Les luminaires décoratifs : apportant une touche d'originalité aux espaces de vie, création d'ombre ou modelage de volumes ;
- Les éclairages cinétiques : création d'ambiances chaleureuses et conviviales, un peu à l'image des feux de cheminée ou d'un assortiment de bougies ;
- Les luminaires fonctionnels : remplissant une mission spécifique comme éclairer une allée ou réaliser des travaux.

Par l'automatisation des points d'éclairage, les utilisateurs n'ont plus besoin de se déplacer vers un interrupteur, pour allumer ou éteindre les luminaires. Les commandes sont centralisées par un boîtier de contrôle, par un smartphone ou par un assistant vocal. La Figure 1-20 présente la technologie somfy®).



Figure 1-20 : Photographies d'une box domotique TaHoma et d'une maison équipée de ce système d'éclairage intelligent somfy® [51]

L'éclairage intelligent répond aux besoins des consommateurs au quotidien, par une amélioration du cadre de vie, en leur fournissant l'intensité idéale à chaque moment de la journée (au réveil, visionnage d'un film ou même le scénario de retour de voyage) [50]. Il est aussi envisageable d'éteindre la lumière, en cas d'oubli par exemple, à distance comme à partir de son lieu de travail [51].

En raison de l'optimisation de la gestion de l'éclairage dans les logements, des économies importantes d'énergie peuvent être réalisées, en contrôlant les moments d'éclairage. De ce fait, la consommation d'électricité relative à l'éclairage d'un ménage français pourrait atteindre entre 228 et 315 kWh/an, soit une économie énergétique comprise entre 97 et 135 kWh/an [1] [47]. Ce qui correspond à une économie substantielle annuelle moyenne estimée à 30%. L'éclairage intelligent répond, par conséquent, aux exigences du concept d'habitat basse consommation [50]. Ces systèmes peuvent également être appliqués dans les bâtiments industriels, avec des gains énergétiques inhérents pouvant atteindre 50% à 70%. Les périodes d'amortissement varient en fonction des projets, mais en moyenne elles sont estimées à environ deux ans [52].

La mise en place d'un éclairage intelligent, à l'intérieur et à l'extérieur des logements, est un investissement, offrant des avantages considérables en termes de confort et de sécurité. Ce sont des solutions également idéales pour les personnes âgées ou les personnes à mobilité réduite. Nul besoin de se déplacer pour allumer ou éteindre, tout est commandé à distance.

L'éclairage intelligent, combiné à d'autres systèmes, tels que le chauffage intelligent, les systèmes de télésurveillance, l'automatisation des volets, des portes de garages et des portails, entre dans l'ère des maisons connectées, appelées communément les « smarthomes » [48].

1.6. Conclusion

Bien que les éclairages public, privatif et industriel, à leurs débuts, devaient répondre avant tout à la fonction primaire : éclairer. L'évolution des technologies d'éclairage, avec le temps, a mis en avant d'autres objectifs, telles que la sécurité ou encore la qualité des ambiances lumineuses. Ces notions sont devenues au fil du temps, des exigences essentielles dans les espaces public et privatif, ainsi que dans les secteurs industriels (tertiaire, numérique, aéronautique, aéroportuaire, automobile, etc.). Cependant depuis quelques années, ces critères de sécurité et de confort visuel sont associés aux performances visant à mieux cibler les points à éclairer et ceux à laisser dans l'ombre, pour préserver la faune, la flore environnante¹⁷ et les autres usagers, mais aussi à permettre des économies d'énergies. Aujourd'hui, les enjeux des avancées potentielles, dans ce domaine, se focalisent sur cinq catégories [2] :

- Les enjeux économiques, en lien avec la consommation énergétique annuelle, pour l'éclairage public s'élèvent à 5,6 TWh (représentant 1% de la production totale d'électricité française annuelle). Ce chiffre correspond à 16% des consommations d'énergie (électricité, gaz et fioul) des collectivités territoriales, soit 41% des consommations d'électricité ou encore 17% des dépenses d'énergie. L'utilisation des sources lumineuses à LED réduirait la facture entre 50% et 75% [42] ;
- Les enjeux écologiques, en lien avec le type de production d'ambiance lumineuse, qui impactent à la fois les ressources naturelles et l'environnement. Dès la phase de conception, des nouveaux luminaires, la pollution lumineuse impactant notre biodiversité doit être prise en compte [38] ;

¹⁷ La pollution lumineuse a des effets négatifs significatifs sur la faune et la flore, à un point tel qu'elle est suspectée d'être au moins partiellement responsable de la régression, voire de la disparition d'un certain nombre d'espèces, sur toute ou une partie de leurs aires potentielles de répartition.

- Les enjeux, en lien avec la qualité d’ambiance lumineuse, ouvrant de nouvelles études concernant l’impact des luminaires sur notre santé ;
- Les enjeux sociétaux, en lien avec la sécurité des biens, routière et des personnes, qui restent, sans doute, la première priorité des pouvoirs publics, qu’elle soit immédiate ou à long terme. De plus, de nouveaux besoins sont désormais à considérer pour certaines catégories de personnes, notamment malvoyantes ou âgées ;
- Les enjeux techniques et économiques, en lien avec le recyclage de ces nouvelles sources lumineuses à technologie LED, après plusieurs milliers d’heures de fonctionnement. Afin de valoriser, réutiliser et recycler les matériaux ainsi que les composants électroniques les constituant en vue de préserver les ressources naturelles non renouvelables.

Dans le cadre de cette thèse, c’est ce dernier point qui attire toute notre attention. De nos jours, aucune technologie dédiée, viable et rentable économiquement, ne permet le traitement, en fin de vie, de ces nouvelles sources d’éclairage à technologie LED.

L’éco-organisme ECOSYSTEM, créé en 2006 et agréé par l’Etat, est responsable du traitement en fin de vie de ces nouveaux produits d’éclairage, de la collecte jusqu’à la valorisation par les industriels. Les luminaires doivent porter le logo « poubelle barrée¹⁸ » et être déposés dans les bacs de collecte ECOSYSTEM, bornes LUMIBOX et TUBIBOX dans les magasins de bricolage et dans les grandes surfaces. La référence réglementaire, à jour en la matière, correspond au décret n°2014-928 du 19 août 2014 transposant la Directive 2012/19/UE du 4 juillet 2012 [53]. Le financement du traitement des produits en fin de vie est assuré par les fabricants des sources lumineuses, c’est le principe de la responsabilité élargie des producteurs (REP) [54]. Le logo Triman¹⁹ alerte également le consommateur sur la nécessité de trier ses déchets.

Par conséquent, c’est dans ces contextes réglementaire, économique, écologique et technologique que plusieurs acteurs industriels et académiques s’intéressent à la valorisation de ces nouveaux équipements. Ce qui va permettre de répondre à deux attentes, d’une part de réutiliser les dispositifs encore potentiellement fonctionnels et d’autre part de recycler les matériaux ainsi que les composants électroniques dont les gisements augmenteront tout au long de la décennie [3].

Dès lors, une étude prospective et exhaustive du gisement potentiel réalisée est exposée dans le chapitre suivant. L’objectif de ce travail est de donner de la visibilité à l’entreprise ARTEMISE, sur les futures quantités de ces sources d’éclairage à LED à valoriser, et lui permettre en conséquence de dimensionner et d’optimiser son outil de traitement industriel.

¹⁸ Tout producteur, importateur ou distributeur a l’obligation d’apposer le logo poubelle barrée sur l’ensemble des EEE, piles ou accumulateurs mis sur le marché après le 13 août 2005. La poubelle barrée est établie par la norme NF EN 50419 conformément à l’article R543-177 du code de l’environnement. Elle indique aux consommateurs que leurs EEE usagés ou leurs DEEE ne doivent pas être jetés avec les ordures ménagères mais orientés vers des points de collecte séparée (décret d’application n°2014-1577, paru le 1^{er} janvier 2015).

¹⁹ A la suite du même décret, ce pictogramme qui se retrouve sur la majorité des produits pour indiquer aux consommateurs que ceux-ci relèvent d’une consigne de tri spécifique. Il permet d’identifier sans ambiguïté, tous les produits recyclables conformément au principe de responsabilité élargie des producteurs (REP).

Références bibliographiques

- [1] Association Française de l'Eclairage « <http://www.afe-eclairage.fr/> », 11 mai 2021
- [2] Angel Barroso, « Optimisation des systèmes d'éclairage des bâtiments de l'Université Paul Sabatier basé sur un réseau novateur de type bus continu/basse tension ». Thèse de doctorat, soutenue le 13 janvier 2017 à l'Université de Toulouse 3 Paul Sabatier
- [3] Xavier Lantoinette et Romain Lesage, « Tri et traitement des lampes LED », Appel à projet, RECYLUM, 4 décembre 2017. Site internet « <https://www.ecosystem.eco/> »
- [4] Leena Tähkämö, « Analyse du cycle de vie de sources lumineuses - Etudes de cas et examen des analyses ». Thèse de doctorat, soutenue le 13 septembre 2013 à l'Université d'Aalto (Finlande)
- [5] Otmar Deubzer et al. « Recycling of Critical Resources from LED Products », Proceedings of EcoDesign 2015 International Symposium, 9th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 2-4 December, Tokyo, Japan, 2015
- [6] Gilles Lerondel, Anna Rumyantseva, Christophe Couteau et Youcef Bouzidi, « Recyclage de lampes à LED », Descriptif détaillé du projet RECYLED, 2017
- [7] Zakaria Outahar, « LEDs lamps and their recycling », module acquisition des connaissances, Université de Technologie de Troyes, 2016
- [8] LEDs-dépôt, « <https://leds-depot.fr/differences-puces-led> », le numéro 1 pour les ampoules à LED, 11 mai 2021
- [9] Les différentes technologies LEDs, « <https://www.quelleenergie.fr/questions/ampoules-led-technologies> », Quelle énergie, 11 mai 2021
- [10] La technologie COG, « <https://zoneled.fr/ampouleledfilamente27/> », L'ampoule LED à filaments, 11 mai 2021
- [11] Magazine RECYCLAGE RECUPERATION - N°38 - 16 novembre 2020 - Les cours des matériaux recyclés
- [12] Gilles Lerondel, « Solutions technologiques pour la valorisation d'un composant d'éclairage à LED en fin de cycle », Descriptif de thèse CIFRE ARTEMISE-UTT, 2016
- [13] Gilles Lerondel, « Rapport d'avancement première année », Projet RECYLED, 14 mars 2017
- [14] Mizanur Rahman, S.M., Kim J., Lerondel G., Bouzidi Y., Clerget L., 2019. Value Retention Options in Circular Economy: Issues and Challenges of LED Lamp Preprocessing. Sustainability 11 (17), 4723. <https://doi.org/10.3390/su11174723>
- [15] IEA & OECD, « Light's Labour's Lost - Policies for Energy-efficient Lighting », Paris: IEA Publications, Agence internationale de l'énergie - 2006 - ISBN : 9789264109520. <https://doi.org/10.1787/9789264109520->
- [16] ISO 14040: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, 2006
- [17] ISO 14044: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, 2006
- [18] A. Gydesen and D. Maimann, « Life cycle analyses of integral compact fluorescent lamps versus incandescent lamps » in Proceedings of the 1st European Conference on Energy-Efficient Lighting, Stockholm, Sweden, 1991

- [19] R. P. Pfeifer, « Comparison between filament lamps and compact fluorescent lamps » *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 1, pp. 8-16, 1996. <https://doi.org/10.1007/BF02978625>
- [20] Bio Intelligence Service (BIOIS), « Study on environmental effects related to the life cycle of products and services » European Commission, 2003
- [21] D. Parsons, « The environmental impact of compact fluorescent lamps and incandescent lamps for Australian conditions » *The Environmental Engineer*, vol. 7, no. 2, pp. 8-14, ISSN 1447-9435, 2006
- [22] United States Department of Energy, « Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products. Part 1: Review of the Life-Cycle Energy Consumption of Incandescent, Compact Fluorescent, and LED Lamps (Updated August 2012) » 2012
- [23] ECOSYSTEM, rapport d'activités 2019 « <https://rapport2019.ecosystem.eco/rapport/let-lampes/> », 28 novembre 2019
- [24] KIC EIT Raw Materials, commission européenne de recherche et développement « <https://eitrawmaterials.eu/> », 11 mai 2021
- [25] MTB Recycling Manufacturing Engineering, à travers 3 métiers recyclage-fabrication-ingénierie « <https://www.mtb-recycling.fr/fr/> », 11 mai 2021
- [26] COOLREC, transformation des matériaux en matières premières secondaires « <https://www.coolrec.com/fr-fr> », 11 mai 2021
- [27] Chaire Mines Urbaines. « <http://mines-urbaines.eu/fr/la-recherche/missions-et-objectifs/metaux-strategiques/> », Métaux stratégiques : développement de nouvelles technologies à haute valeur ajoutée, 11 mai 2021
- [28] Fondation ParisTech, fondation dédiée à l'enseignement supérieur et à la recherche « <http://fondationparitech.org/decouvrir/la-fondation/> », 11 mai 2021
- [29] Rémy Le Moigne, *L'Economie circulaire, Comment la mettre en œuvre dans l'entreprise grâce à la reverse supply chain ?*, Dunod, Paris, 2014
- [30] INSIS, CNRS : INstitut des Sciences et de l'Ingénierie des Systèmes du Centre National de la Recherche Scientifique « <https://insis.cnrs.fr/> », 12 mai 2021
- [31] Université de Bordeaux, projet REDLED « https://place-ep-recrute.talent-soft.com/offre-de-emploi/emploi-charge-de-projets-europeens-f-h_436297.aspx », 28 août 2020
- [32] Mizanur Rahman, S.M., Bertrand Laratte, Stéphane Pompidou, Thècle Alix, 2021. Waste LED lamp characterization: A call for more consistent and well-documented study. doi: 10.20944/preprints202107.0427.v1
- [33] Mizanur Rahman, S.M., Stéphane Pompidou, Thècle Alix, Bertrand Laratte, 2021. A review of LED lamp recycling process from the 10 R strategy perspective. *Sustainable Production and Consumption* 28 (2021) 1178-1192. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.07.025>
- [34] Kathy Bru, Solène Touze, Pascal Auger, Svatopluk Dobrusky, Jérôme Tierrie, Daniel B. Parvaz. Investigation of lab and pilot scale electric-pulse fragmentation systems for the recycling of ultra-high performance fibre-reinforced concrete. *Minerals Engineering* 128 (2018) 187-194. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.08.040>
- [35] Weiran ZUO, Fengnian Shi, Klaas Peter Van Der Wielen, Alexander Weh. Ore particle breakage behaviour in a pilot scale high voltage pulse machine. *Minerals Engineering* 84 (2015) 64-73. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.09.025>

- [36] Chenlong Duan, Jun Han, Shen Zhao, Zhonglin Gao, Jinpeng Qiao, Guanghui Yan. The stripping effect of using high voltage electrical pulses breakage for waste printed circuit boards. Waste management 77 (2018) 603-610. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.003>
- [37] Flore Rebischung, Marianne Fleury et François David. Rapport INERIS-DRC-17- 164547-01461C « Tri et classement des plastiques des Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques », octobre 2017
- [38] ZUMTOBEL Lighting GmbH, Manuel pratique de l'éclairage « Technique et l'application d'éclairage », article n°04 924 111-F 07/17, ISBN 978-3-902940-73-5
- [39] Vincent Semetey. Recyclage des Déchets d'Equipements Electrique et Electronique (D3E) : Défis et innovations, ATHENS Program : Circular Economy and Eco-design : « Urban mine » case, November 13th-17th, 2017
- [40] Projet européen Streetlight-EPC : Energy Performance Contracting « <https://www.streetlight-epc.eu/> », 13 mai 2021
- [41] Association Française de l'Eclairage, « Eclairage public : comparatif des solutions pour réaliser des économies », Fiche n°12, novembre 2019
- [42] Association Française de l'Eclairage, « Eclairage dans les collectivités : les chiffres clés », Fiche n°1, novembre 2019
- [43] Louiza Hacene et Kevin Guez. Syndicat de l'éclairage, étude HEC Junior Conseil, « <http://www.syndicat-eclairage.com/> », janvier 2014
- [44] Enquête Harris interactive pour SPIE, « https://harris-interactive.fr/opinion_polls/les-francais-leur-commune-et-lenergie/ », mars 2014
- [45] Enquête association prévention routière « Les Français, la nuit et les dangers de la route », Opinionway, septembre 2016
- [46] ADEME « Les filières à responsabilité élargie du producteur », Faits & chiffres, Edition 2017
- [47] Connaissance des énergies, Eclairage dans l'habitat, Chiffres clés des ménages, « <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/eclairage-dans-lhabitat> », 14 mai 2021
- [48] Association Française de l'Eclairage - Communication - « Intérêt d'un éclairage adapté au domicile des personnes âgés », Docteur C. Orssaud, Président du Collège Santé de l'AFE, Responsable de l'UF d'ophtalmologie et CRMR OPHTARA, HEGP - HUPO, AP-HP, 14 octobre 2020
- [49] Catherine JEGAT. Association Nationale pour l'Amélioration de la Vue (AsnaV) - Communiqué de presse - « Nouveau confinement : Comment bien gérer sa vue », 16 novembre 2020
- [50] Maison et domotique, « <https://www.maison-et-domotique.com/119550-un-eclairage-intelligent-avec-la-domotique/> », 14 mai 2021
- [51] somfy, Tous les produits pour l'éclairage connecté, « <https://www.somfy.fr/produits/chauffage-et-eclairage/eclairage> », 14 mai 2021
- [52] Schneider Electric, Economies d'énergie liées à l'éclairage, Efficacité énergétique de la distribution électrique, « <https://fr.electrical-installation.org/frwiki/Accueil> », 12 août 2021
- [53] Directive 2012/19/UE du parlement européen et du conseil du 4 juillet 2012 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), Journal officiel de l'Union européenne
- [54] ADEME, Les filières à Responsabilité élargie des producteurs (REP), « <https://www.ademe.fr/expertises/dechets/elements-contexte/filieres-a-responsabilite-elargie-producteurs-rep> », 02 octobre 2021

CHAPITRE 2

Etude du gisement

2.1. Introduction

Dans le cadre de ce projet doctoral, associé au projet RECYLED, il est apparu indispensable de caractériser non seulement les gisements des déchets actuellement disponibles en France collectés par ECOSYSTEM, mais également les gisements vendus (lampes, spots, tubes et dalles à LED), qui arriveront en fin de cycle de vie au cours de la prochaine décennie. Cette étude permettra de quantifier le potentiel de valorisation, afin de dimensionner efficacement la ligne de traitement à une échelle industrielle, pour l'entreprise ARTEMISE. La typologie du gisement est composée de plusieurs modèles de lampes et spots dont les principaux sont : les lampes E27, E14 et B22 ainsi que les spots GU10 et GU5.3. La Figure 2-1 présente les principaux culots et formes associées des dispositifs de lampes, de spots et de tubes à LED [1] [2].

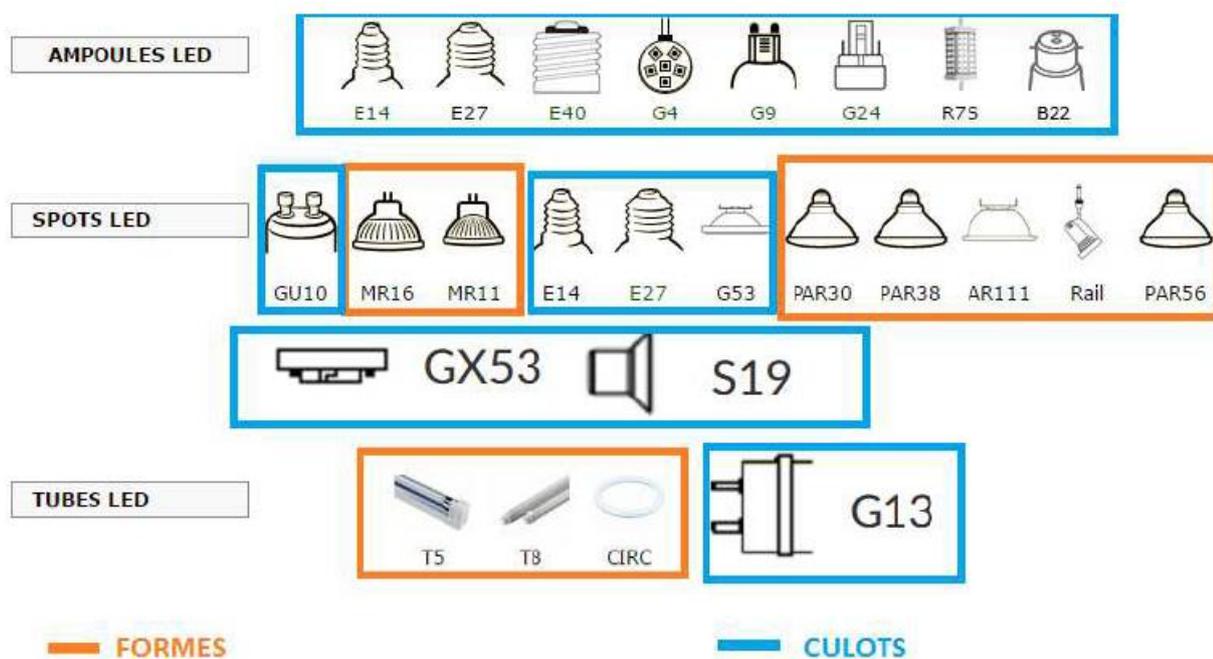


Figure 2-1 : Les principaux culots et formes de lampes, de spots et de tubes à LED [1] [2]

2.2. Caractérisation des déchets actuels

Pour réaliser une étude exhaustive des déchets actuels de lampes et de spots à LED, nous avons caractérisé plusieurs big-bags entre 2019 et 2021 chez ARTEMISE, puis effectué un échantillonnage, afin d'analyser plus finement les produits et ainsi constituer une base de données. Cette étude statistique doit permettre de mieux comprendre l'évolution du gisement et en conséquence de le caractériser, pour une meilleure adaptation de la future ligne de traitement industrielle.

2.2.1. Caractérisations massique et typologique

Les lampes et les spots à LED sont collectés par l'éco-organisme ECOSYSTEM. Ils sont mélangés dans des cartons et caisses LUMIBOX, avec le gisement des systèmes d'éclairage traditionnels.

Le transport, routier entre les centres de collecte et de tri, est organisé par ECOSYSTEM. Ensuite, le tri est réalisé manuellement sur les tables de chargement des lignes de traitement, par des opérateurs dans les usines ou centres de tri, afin de constituer les big-bags de lampes et de spots à LED. En moyenne, un big-bag chez ARTEMISE pèse 327 kg et comptabilise environ 5000 unités. La Figure 2-2 représente un exemple de big-bag trié dans l'usine ARTEMISE. Les flux ménagers (cartons LUMIBOX) et professionnels (caisses LUMIBOX) ne sont pas dissociés et les big-bags contiennent les deux types de flux de déchets de LEDs.



Figure 2-2 : Exemple de big-bag de lampes et de spots à LED, trié chez ARTEMISE

Depuis 2016, le nombre de big-bags de lampes et de spots à LED n'a cessé d'augmenter. En effet, les opérateurs triaient en moyenne 2 big-bags par semaine, entre 2016 et 2017. Aujourd'hui, le ratio a quadruplé : jusqu'à 8 big-bags sont constitués par semaine (source entreprise ARTEMISE). La Figure 2-3 montre l'évolution des big-bags triés dans l'usine ARTEMISE. En 2020, le taux de croissance a été estimé à +129%, et ce, malgré la crise sanitaire de la COVID-19. Cette tendance va très fortement augmenter, au cours de la décennie, pour ne contenir plus que des systèmes d'éclairage à technologie LED [3].

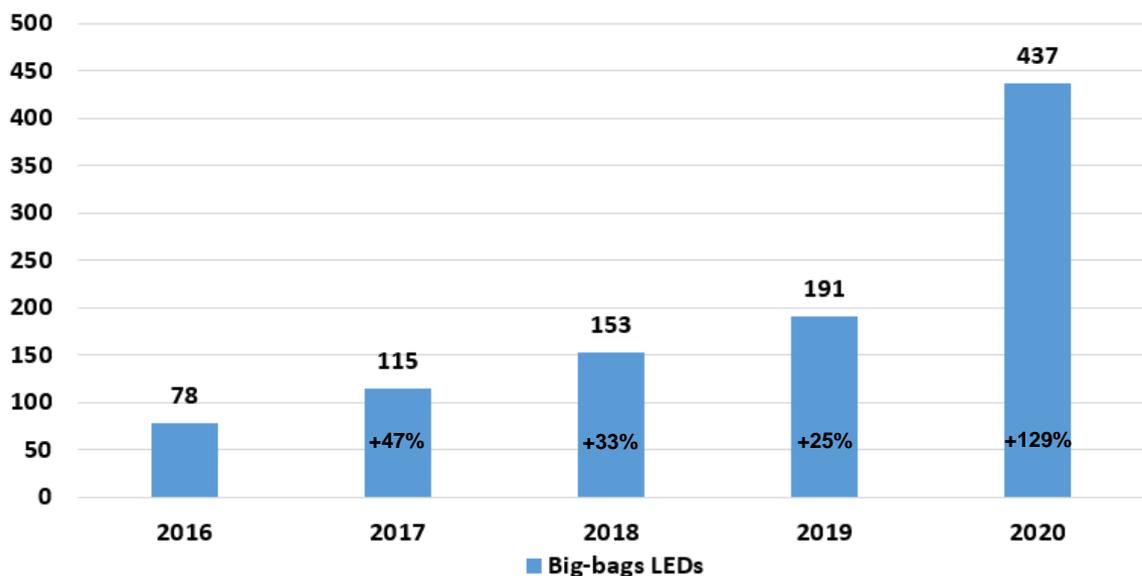


Figure 2-3 : Nombre de big-bags de lampes et de spots à LED, constitués chez ARTEMISE

Dans le cadre de cette thèse, des caractérisations de big-bags ont été réalisées régulièrement, tout d'abord mensuellement puis trimestriellement au sein de l'entreprise ARTEMISE, entre septembre 2019 et juin 2021. Les résultats sont regroupés dans les Tableaux 2-1 & 2-2 et sur les Figures 2-4 & 2-5, ci-dessous. Au total, 2,6 tonnes de lampes et spots à LED ont été caractérisées (soit environ 39 000 unités) afin d'en déduire la tendance et la répétabilité des typologies.

Nous constatons une diversité du gisement qui s'explique par les différents produits commercialisés, qui n'ont cessé d'évoluer avec la technologie LED. De ce fait, ARTEMISE devra prendre en considération la notion de tri des différentes typologies, dans le traitement des dispositifs à LED. Cet aspect n'était pas prévu initialement dans le cadre du projet RECYLED, ce qui l'enrichit toutefois. Dès lors, nous prendrons en considération ce besoin essentiel, dans la solution finale de la ligne de traitement industrielle, mais en se limitant à une utilisation et à une adaptation des techniques existantes ou préexistantes (intelligence artificielle, automatisation, etc.).

Typologie (kg)	2019				2020		2021		Big-Bag moyen	Ecart type
	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Mars	Juin	Mars	Juin		
E14	17	8	8,5	13,5	12,5	24	22	14,5	15	5,8
E27 petits verre	126,5	31	47	23	51,5	50	20,5	57	50,8	14,8
E27 petits plastique	91	147,5	129,5	157	113,5	123	106,5	132,5	125,1	21,5
E27 gros plastique	34,5	28,5	21,5	20	48	43	23,5	34	31,6	10,2
B22	3,5	9,5	11	10,5	9,5	17	13,5	10,5	10,6	3,8
GU10	59,5	45	100	85	69,5	83	52	77	71,4	18,5
GU5.3	16	5,5	11,5	10,5	8	8,5	11	10,5	10,2	3,1
Divers	9	8	14	10,5	24	15	6,5	14	12,6	5,5
Masse totale	357	283	343	330	337	364	256	350	327	38,1

Tableau 2-1 : Bilan massique du gisement de 8 big-bags, entre septembre 2019 et juin 2021

Typologie (%)	2019				2020		2021		Big-bag moyen
	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Mars	Juin	Mars	Juin	
E14	5	3	3	4	4	7	9	4	4,5
E27 petits verre	35	11	14	7	15	14	8	16	15,5
E27 petits plastique	26	52	38	48	34	34	42	38	38
E27 gros plastique	10	10	6	6	14	12	9	10	10
B22	1	3	3	3	3	5	5	3	3
GU10	17	16	29	26	21	23	20	22	22
GU5.3	4	2	3	3	2	2	4	3	3
Divers	2	3	4	3	7	3	3	4	4
Total	100								

Tableau 2-2 : Cartographie du gisement de 8 big-bags, entre septembre 2019 et juin 2021

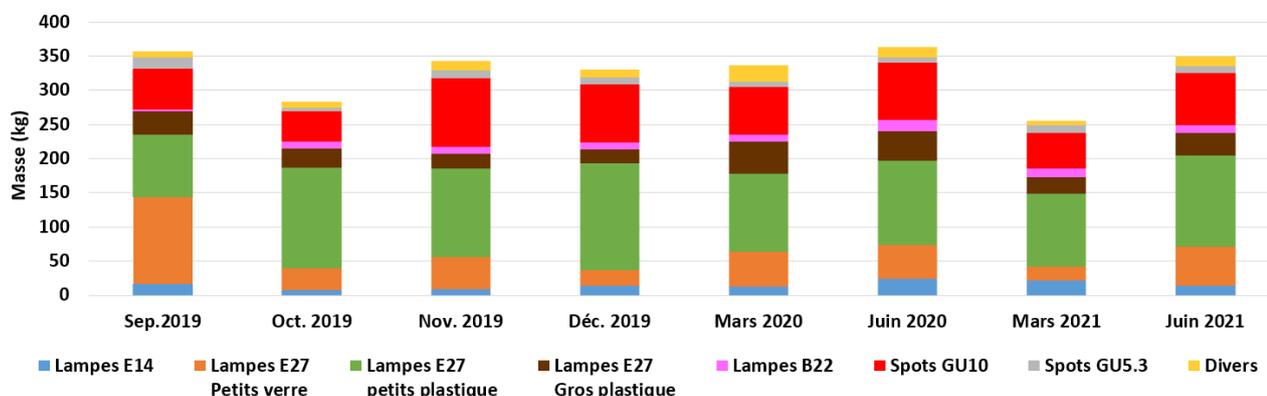


Figure 2-4 : Typologie de 8 big-bags, entre septembre 2019 et juin 2021

Il en résulte que la lampe E27 représente le modèle le plus répandu, soit 58% à 73% du gisement, suivi du spot GU10 avec 16% à 29% et enfin de la lampe E14 avec 3% à 9%. Ces trois modèles réunis constituent entre 88% et 92% du gisement total. En 2018, cette tendance avait été observée à travers l'étude de Mizanur Rahman S.M., qui avait conclu que ces trois typologies de LEDs représentaient 90% du gisement chez ARTEMISE [2]. Le reste du gisement est occupé par d'autres modèles : GU5.3 et B22 représentant respectivement 2% à 4% et 1% à 5%, soit 8% à 12% en intégrant les modèles E40, GX53 et G9 (catégorisés sous l'onglet divers). L'annexe 1 synthétise l'ensemble des données de cette analyse.

La tendance observée mensuellement en 2019, nous a fait modifier la périodicité de caractérisation des big-bags. La répétabilité des résultats obtenus, nous a conduit à les analyser trimestriellement. Ceux constitués en mars et juin des années 2020 et 2021, nous ont permis de corroborer la tendance observée en 2019. Ces résultats permettront, en conséquence, d'assurer à l'entreprise un potentiel de valorisation viable pour les prochaines années. En outre, d'autres caractérisations devront être effectuées trimestriellement, à la suite de la thèse, afin de suivre l'évolution et donc d'adapter, au besoin, la future ligne de traitement industrielle.

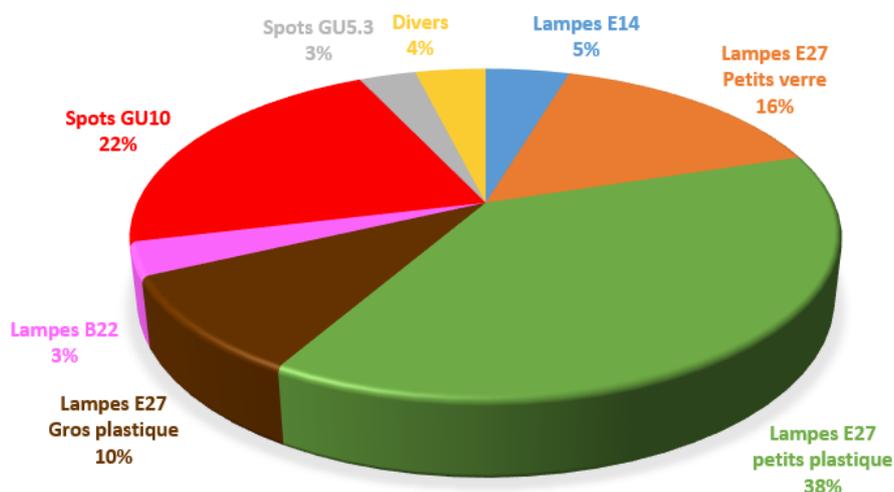


Figure 2-5 : Typologie moyenne d'un big-bag trié chez ARTEMISE, entre septembre 2019 et juin 2021

En observant plus en détails la cartographie du gisement, nous pouvons confirmer que la lampe E27 petits en plastique prédomine et ses proportions, au sein des big-bags, sont comprises entre 26% et 52% (moyenne 38% et écart-type 21,5 kg).

La tendance du modèle E27 en verre est en forte croissance avec des variations estimées entre 7% et 35% (moyenne 15,5% et écart-type 14,8 kg). Cette observation est due notamment à l'éclairage décoratif grâce aux puces à LED à filaments COG (Chip On Glass) [4]. Ce type d'éclairage est de plus en plus répandu, d'une part dans les bars et les restaurants et d'autre part dans les logements, de par son confort d'éclairage et son aspect vintage remis au goût du jour.

Le modèle E27 gros en plastique est également représentatif du gisement, avec des valeurs évaluées entre 6% et 14%. Il se différencie du modèle E27 petits en plastique, par la taille du système optique (bulbe) plus volumineux.

Le modèle de spots GU10 occupe une part importante du gisement, soit 16% à 29%. Cette catégorie est très utilisée dans les appliques, mais aussi dans les éclairages encastrés des plafonniers.

Le modèle de lampes E14 est lui faiblement représenté, entre 3% et 9%. Cependant, cette typologie est encore très utilisée dans l'éclairage des lampes de chevet et les appliques murales, notamment.

Enfin, les spots GU5.3 et les lampes B22 sont minoritaires et représentent respectivement 2% à 4% et 1% à 5% (3% en moyenne). Ces deux derniers modèles seraient voués à disparaître dans les prochaines années [2]. L'ensemble des résultats est présenté dans l'annexe 2. Il serait très intéressant de corréliser ces résultats avec une étude des modèles, actuellement commercialisés par les magasins de bricolage et les grandes surfaces, qui devraient arriver en fin de vie durant la décennie, en fonction de leurs conditions d'utilisation et de sollicitation. Cette nouvelle configuration du gisement, limitée uniquement aux modèles E27, E14 et GU10, devrait réduire le besoin de tri. Cet aspect sera abordé dans la partie 2.3.2.

2.2.2. Caractérisation par fabricant

Lors de la constitution des big-bags, un échantillon composé de lampes et de spots à LED a été prélevé hebdomadairement entre mai et juillet 2019, afin d'analyser la répartition par fabricant et par distributeur, en fonction de la typologie. Pour des raisons de commodité et de praticité, il a été choisi de prélever un échantillon d'environ 30 kg. La distribution de cet échantillon est illustrée sur la Figure 2-6. Ce prélèvement a été effectué sur la ligne de tri des opérateurs, au sein de l'usine ARTEMISE, pour étudier un échantillonnage représentatif du gisement. Ce qui a permis, par la suite, de constituer une base de données et de répertorier l'ensemble des caractéristiques de ce gisement :

- Les matériaux constitutifs
- La référence produit
- La puissance (W)
- La température (K)
- La masse (g)
- L'année de fabrication
- Le flux lumineux (lm)
- Le nombre de puces à LED

Notons qu'il serait intéressant de continuer à réaliser annuellement ce type d'étude, afin d'observer l'évolution.

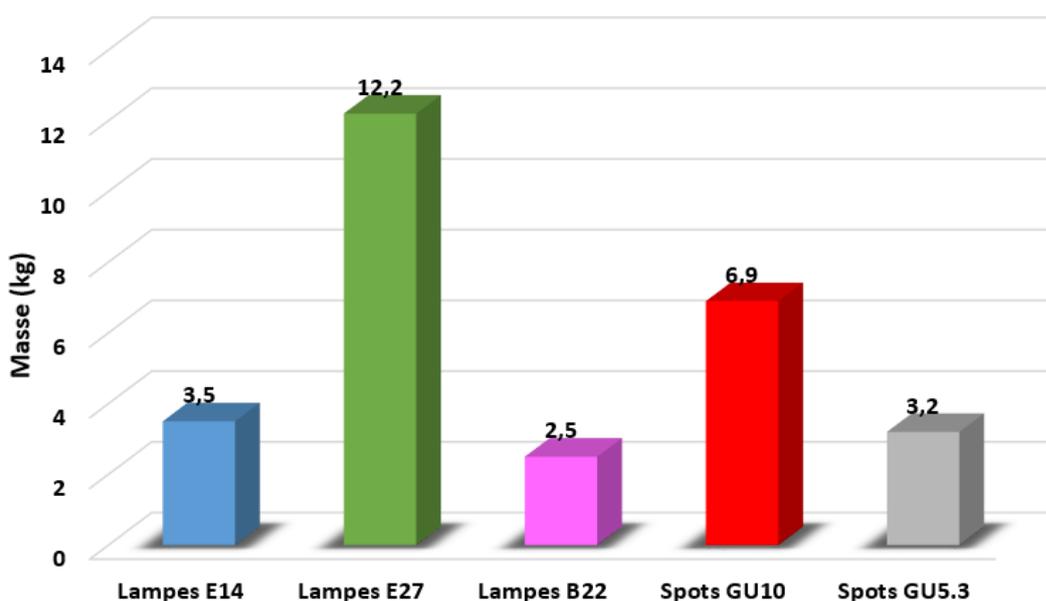


Figure 2-6 : Masses cumulées lors des prélèvements des systèmes d'éclairage à LED, entre mai et juillet 2019

Les résultats de cette base de données sont présentés ci-dessous, sur les Figures 2-7 à 2-11. Cette étude a permis de recueillir la répartition des fabricants-distributeurs, en fonction de la typologie des lampes et des spots à LED, dont voici les principaux :

- **E14** : 21% IKEA - 14% OSRAM - 11% Philips Lighting
- **E27** : 30% OSRAM - 9% Vision-EL - 8% XXCELL - 8% Philips Lighting
- **B22** : 17% XXCELL - 15% LEXMAN - 11% THOMAS WATT
- **GU10** : 26% OSRAM - 11% PROlampesLED - 9% Eglo
- **GU5.3** : 61% SCS MR16 - 11% LDE - 7% OSRAM - 7% Philips Lighting

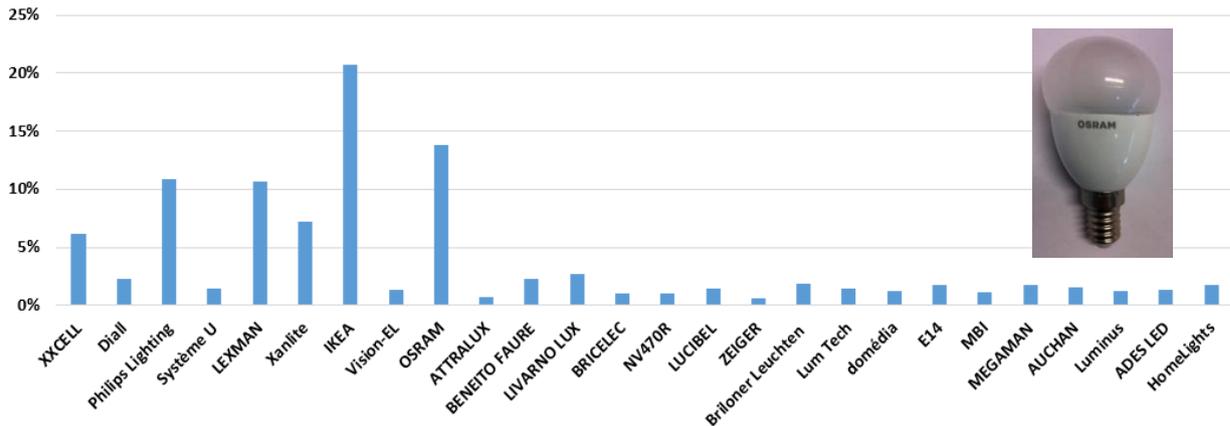


Figure 2-7 : Répartition du gisement (fabricants et distributeurs) des lampes à LED E14

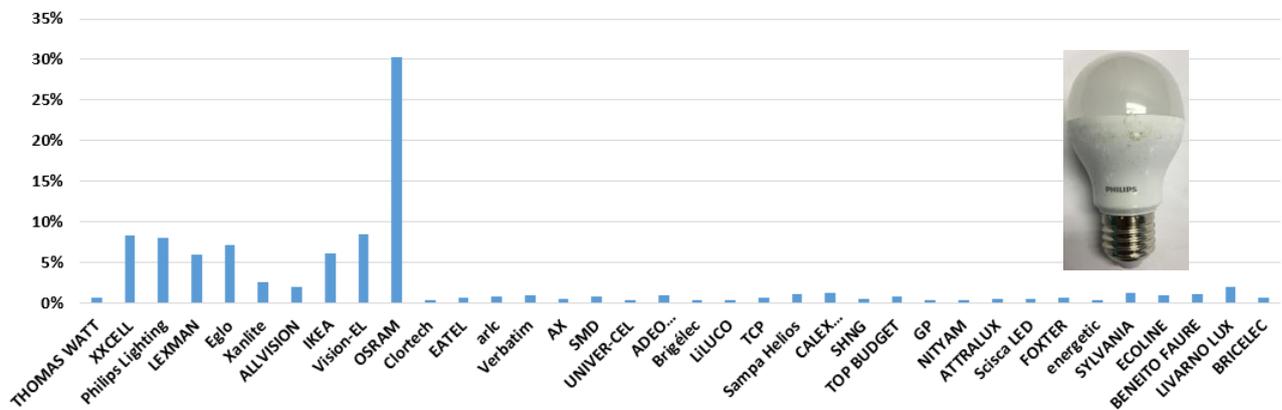


Figure 2-8 : Répartition du gisement (fabricants et distributeurs) des lampes à LED E27

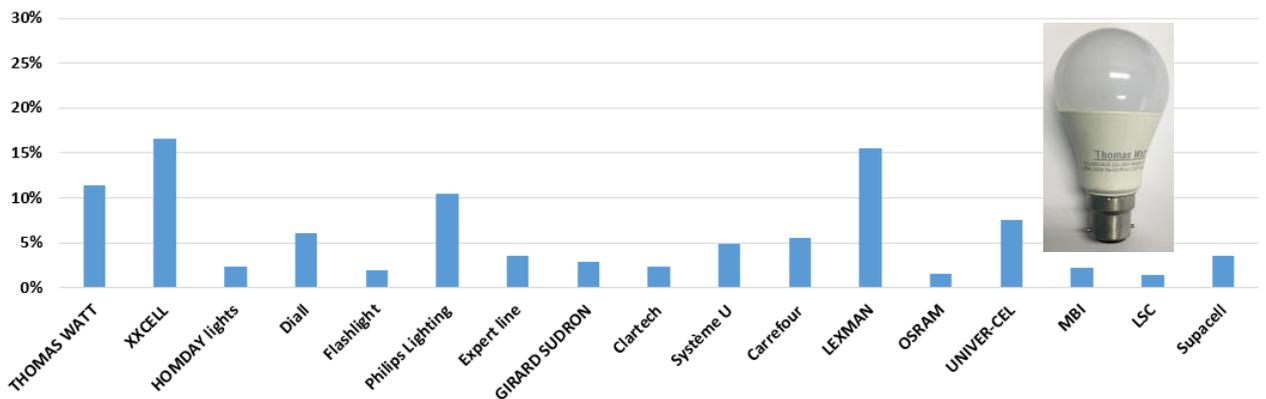


Figure 2-9 : Répartition du gisement (fabricants et distributeurs) des lampes à LED B22

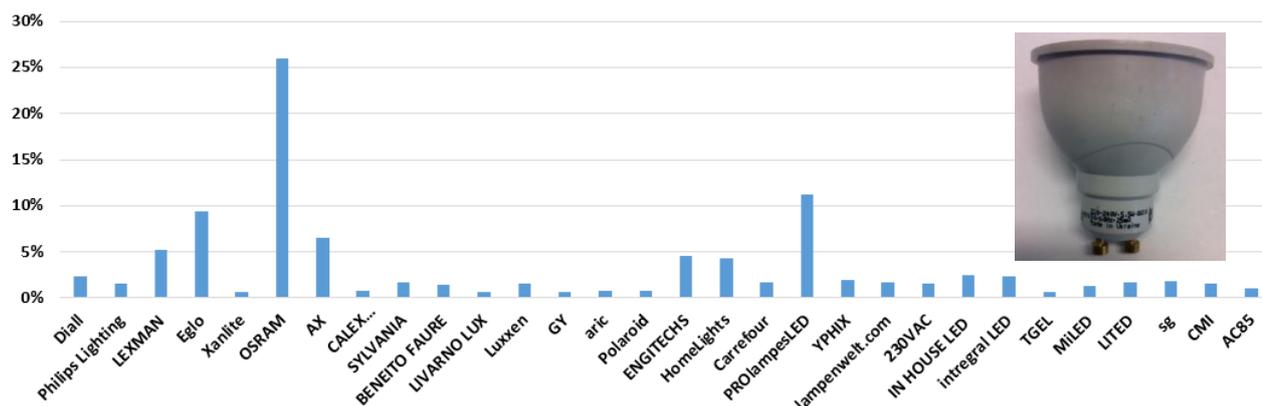


Figure 2-10 : Répartition du gisement (fabricants et distributeurs) des spots à LED GU10

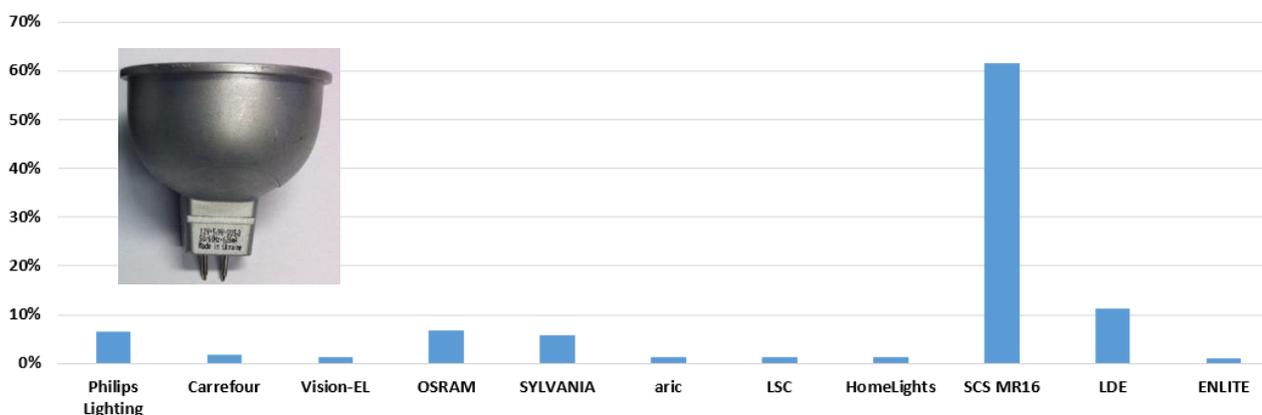


Figure 2-11 : Répartition du gisement (fabricants et distributeurs) des spots à LED GU5.3

Cette distribution ainsi obtenue montre la prédominance de l'industriel OSRAM sur le marché français, notamment avec les modèles les plus représentatifs : E27, E14 et GU10. Ce constat va nous permettre de nous intéresser au potentiel de valorisation matière (cf. chapitre 4, partie 4.2). En somme, la caractérisation des plastiques constituant les lampes et les spots à LED sera axée sur les fabricants et les distributeurs les plus représentatifs du gisement. A ce titre, la détermination de la nature des matrices plastiques et la quantification de leur concentration en retardateurs de flamme bromés (RFBs), considérés comme des Polluants Organiques Persistants (POPs) dans l'annexe A de la convention de Stockholm [5], seront ainsi permises.

Dans le cadre de cette étude, les masses moyennes et les écart-types de chacune des typologies de lampes et de spots à LED ont également été caractérisés. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2-3. L'intérêt de ce type de données sera ensuite de corrélérer ces informations avec les années de fabrication relevées. Par voie de conséquence, nous en déduisons la durée de vie moyenne de notre gisement et pouvons également comprendre l'évolution de la technologie des dispositifs à LED. Ce type d'analyse permet d'obtenir un potentiel de valorisation plus représentatif et fiable.

Typologie	Nombre d'unités	Masse totale (g)	Masse moyenne (g)
E14	79	3 533	45 ± 12
E27	156	12 190	78 ± 18
B22	39	2 535	65 ± 21
GU10	126	6 914	55 ± 13
GU5.3	69	3 123	45 ± 8
Total	469	28 295	Moyenne : 60 ± 23

Tableau 2-3 : Masse moyenne et écart-type de chaque modèle de lampes et de spots à LED

2.3. Caractérisation des déchets futurs

Une analyse fine des dispositifs vendus est également à prendre en compte, dans le cadre de ce travail de thèse, afin de prévoir le futur gisement potentiel de déchets des équipements à LED qu'aura à traiter ARTEMISE, au cours de la décennie. En conséquence, nous optimiserons le dimensionnement de l'outil de traitement industriel, en considérant deux facteurs : les caractérisations massique et typologique du gisement.

2.3.1. Caractérisation massique

A ce jour, il n'existe pas d'usine de fabrication de lampes et de tubes à LED en France et l'ensemble des dispositifs à LED est importé [3]. De ce fait, nous avons sollicité la direction générale des douanes françaises, afin d'obtenir les données d'importation et d'exportation. Puis, nous avons analysé les chiffres communiqués suivant la nomenclature NC8 85395000 « Lampes et tubes à diodes émettrices de lumière (DEL) ». Cette nomenclature a été créée en 2017. Antérieurement, les lampes et les tubes à LED n'étaient pas répertoriés, mais étaient seulement catégorisés dans une autre nomenclature NC8 85437090 « Machines et appareils électriques ayant une fonction propre ». Ces données permettent d'évaluer le gisement qui arrive en fin de vie. Pour ce faire, la loi de probabilité de Weibull [6] sera appliquée, entre 2022 et 2030. Cette loi modélise la durée de vie des EEE et a été utilisée par la commission européenne [7], le projet cycLED [8] et l'ADEME.

Les Tableaux 2-4 et 2-5 présentent les importations et les exportations françaises des lampes et des tubes à LED, entre 2017 et 2020 [9]. En analysant les données, une augmentation de +46% des produits à LED importés est constatée entre 2017 et 2020 (+25% en 2018, +21% en 2019 et -4% en 2020). Pareillement, une augmentation de +53% est observée pour les produits à LED exportés entre 2017 et 2020 (+27% en 2018, +25% en 2019 et -4% en 2020). Notons que les faibles baisses constatées en 2020 seraient dues à la crise sanitaire de la COVID-19.

Nous émettons l'hypothèse, dans cette étude, qu'aucun dispositif d'éclairage à LED n'est fabriqué sur le territoire français. Par conséquent, à partir des données de la direction générale des douanes et en supposant que les ventes annuelles en France sont estimées en soustrayant les exportations des importations, nous obtenons ainsi le gisement français, illustré sur la Figure 2-12. Par ailleurs, une extrapolation rétrospective et prospective est réalisée, en modélisant la courbe de tendance de façon linéaire, afin d'obtenir le gisement des produits à LED vendus, à partir de 2010 jusqu'à 2031. Les résultats sont récapitulés dans le Tableau 2-6.

Zones	2017		2018		2019		2020	
	Masse (t)	Unités	Masse (t)	Unités	Masse (t)	Unités	Masse (t)	Unités
Total	11 158	158 671 997	13 942	207 027 134	16 899	244 025 324	16 261	257 078 861
Variation (%)			+25%		+21%		-4%	
Europe	1 681	24 547 211	1 981	28 542 127	1 628	24 589 562	1 783	26 708 662
UE (27)	1 673	24 437 442	1 976	27 519 587	1 624	24 578 446	1 723	26 241 809
UE (15)	958	13 802 464	1 169	15 011 283	1 511	23 529 266	1 515	25 257 709
Zone Euro	920	13 500 622	1 121	14 583 914	1 481	23 236 269	1 515	25 246 295
Afrique	7	29 363	1	1 475	13	6 027	2	19 637
Amérique	13	58 285	18	100 917	19	111 246	6	30 389
Moyen Orient	1	2 248	1	3 522	1	3 460	19	77 274
Asie	9 451	133 980 444	11 872	178 342 956	15 236	219 295 117	14 450	230 233 546
Divers	4	54 446	68	36 137	3	19 912	2	9 353

Tableau 2-4 : Importations françaises de lampes et tubes à LED, entre 2017 et 2020 [9]

Zones	2017		2018		2019		2020	
	Masse (t)	Unités	Masse (t)	Unités	Masse (t)	Unités	Masse (t)	Unités
Total Variation (%)	6 641	84 271 893	8 427 +27%	114 054 800	10 557 +25%	147 384 586	10 136 -4%	142 702 406
Europe	6 544	79 667 182	8 298	112 000 059	10 448	145 862 869	9 937	141 753 673
UE (27)	6 282	75 443 267	7 993	106 897 125	9 879	136 267 491	8 934	124 178 217
UE (15)	5 680	67 578 440	7 212	95 608 289	8 641	116 935 475	7 662	103 869 916
Zone Euro	5 264	61 489 837	6 577	85 025 996	7 865	104 980 428	7 392	99 202 928
Afrique	46	4 155 092	84	1 371 991	78	998 433	80	304 144
Amérique	5	12 224	7	163 265	9	189 271	8	49 346
Moyen Orient	34	369 500	22	432 665	21	214 700	26	212 003
Asie	2	36 826	1	34 111	8	72 231	19	253 170
Divers	10	31 069	15	52 709	12	47 082	66	130 070

Tableau 2-5 : Exportations françaises de lampes et tubes à LED, entre 2017 et 2020 [9]

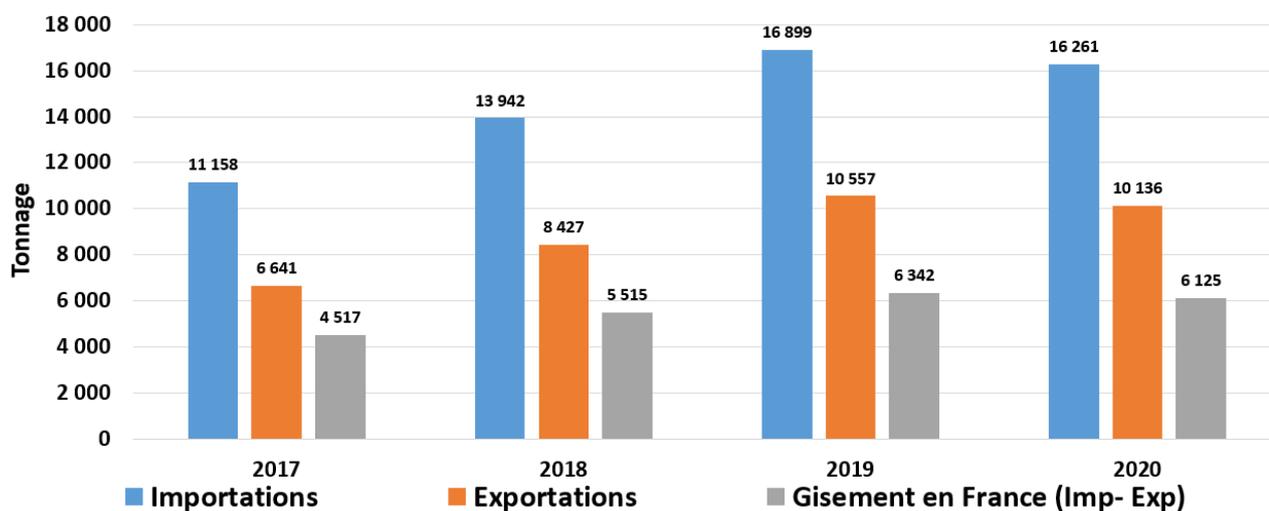


Figure 2-12 : Importations, exportations et gisement français de lampes et tubes à LED, entre 2017 et 2020 [9]

Décennie 2010	Année	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
	Ventes françaises (tonnes)		1 252	1 719	2 185	2 651	3 118	3 584	4 051	4 517	5 515	6 342

(a)

Décennie 2020	Année	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
	Ventes françaises (tonnes)		6 383	6 849	7 315	7 782	8 248	8 715	9 181	9 647	10 114	10 580

(b)

Tableau 2-6 : Extrapolation des ventes des dispositifs à LED en France, entre 2010 et 2031 : Décennie 2010 (a) et décennie 2020 (b)

En appliquant la loi de Weibull [6], expression (1) ci-dessous, il nous est, dès lors, possible de modéliser le gisement potentiel de déchets que pourrait traiter ARTEMISE, à partir de 2022 jusqu'en 2030.

$$W'(t) = W(t) \times \exp\left(-\left(\frac{t-t_0}{\beta}\right)^\alpha\right) \quad (1)$$

Soit :

- $W'(t)$: quantité de produits arrivant à l'état de déchets, à l'année t
- $W(t)$: quantité de produits vendus, à l'année t
- t : année pour laquelle la quantité de déchets est calculée
- t_0 : année de vente des produits
- α : paramètre de forme de la loi de Weibull
- β : paramètre d'échelle de la loi de Weibull

Notre gisement représenté par un échantillon prélevé périodiquement entre mai et juillet 2019, a permis d'estimer sa durée de vie à $4,5 \pm 1,7$ ans (cf. chapitre 4). Cette estimation reste en accord avec la durée de vie moyenne des produits à LED de 4,3 ans pour l'ensemble des dispositifs à LED, issue d'une étude de la commission européenne [7]. Les échantillons des typologies en verre et diverses ne mentionnant pas les dates de fabrication, nous appliquerons donc l'estimation européenne fixée à 4,3 ans. Les valeurs correspondantes des paramètres sont $\alpha = 1,20$ (de forme) et $\beta = 4,57$ (d'échelle). La Figure 2-13 expose la distribution cumulée du taux de sortie du parc des équipements à LED. Nous pouvons ainsi estimer que la fin de vie de 50% du gisement des produits à LED serait atteinte à partir de 3,5 années d'utilisation, de 67% à 5 ans, de 95% à 10 ans et de 100% à 15 ans.

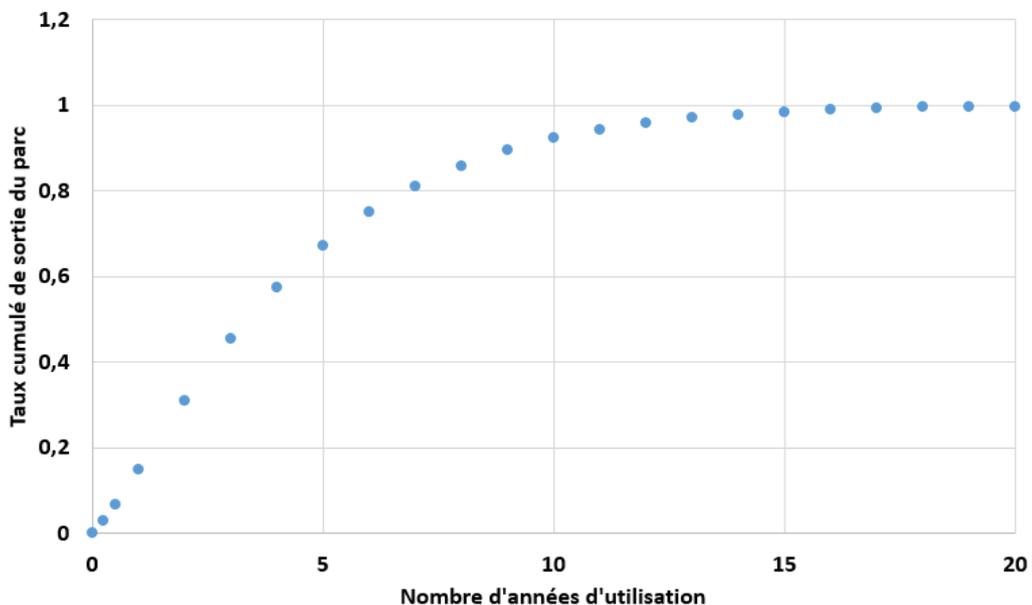


Figure 2-13 : Distribution cumulée du taux de sortie du parc des dispositifs à LED, selon la loi de Weibull

Les taux cumulés de sortie du parc (loi de Weibull) et le gisement des ventes modélisé (donnée de la direction générale des douanes), nous permettent d'estimer les tonnages potentiels de déchets des produits à LED, sur le territoire français, entre 2022 et 2030. A partir de la répartition des fractions, de lampes et de tubes à LED triés et stockés chez ARTEMISE, sur la période 2016-2020, nous extrapolons l'évolution du ratio jusqu'en 2030, par une modélisation linéaire de la courbe de

tendance. Puis, nous appliquons ce ratio lampes/tubes sur les tonnages potentiels de déchets des produits à LED, pour estimer les fractions correspondantes, jusqu'à la fin de la décennie. La Figure 2-14 représente les tonnages potentiels de lampes et de tubes à LED estimés, entre 2022 et 2030. A partir de cette analyse, en 2022, des gisements potentiels de 3000 tonnes de lampes à LED et 1700 tonnes de tubes seraient attendus en France. Ces gisements augmenteraient au cours de la décennie, afin d'atteindre en 2030 plus de 5000 tonnes de lampes et 3200 tonnes de tubes. Au total, ARTEMISE pourrait valoriser la moitié de ces gisements français. Notons qu'à ces gisements de déchets de LEDs, il est appliqué un taux de collecte.

Le taux de collecte constitue l'un des principaux indicateurs de performance de la filière DEEE. La Directive 2002/96/CE laisse le choix aux Etats-membres entre deux modes de calcul du taux de collecte à atteindre [3] [10] [11] [12] :

- Mode de calcul n°1 : utilisé depuis 2015 avec des objectifs annuels croissants : l'Etat-membre doit atteindre 65% de taux de collecte, calculé à partir des quantités collectées annuellement (N) par rapport à la moyenne des trois dernières années de quantités mises sur le marché (N-1, N-2, N-3). Avec un taux de collecte global de 47,5%, l'objectif national fixé par la Directive n'est pas atteint en 2019 [13].
- Mode de calcul n°2 : l'Etat-membre doit atteindre 85% de taux de collecte, correspondant au rapport entre les quantités collectées annuellement (N) et le gisement estimé la même année. Ce mode de calcul nécessite d'estimer la quantité d'équipements devenant des déchets chaque année. Selon cette méthodologie, en 2019, le taux de collecte atteindrait 55%, ce qui est également en dessous de l'objectif [13].

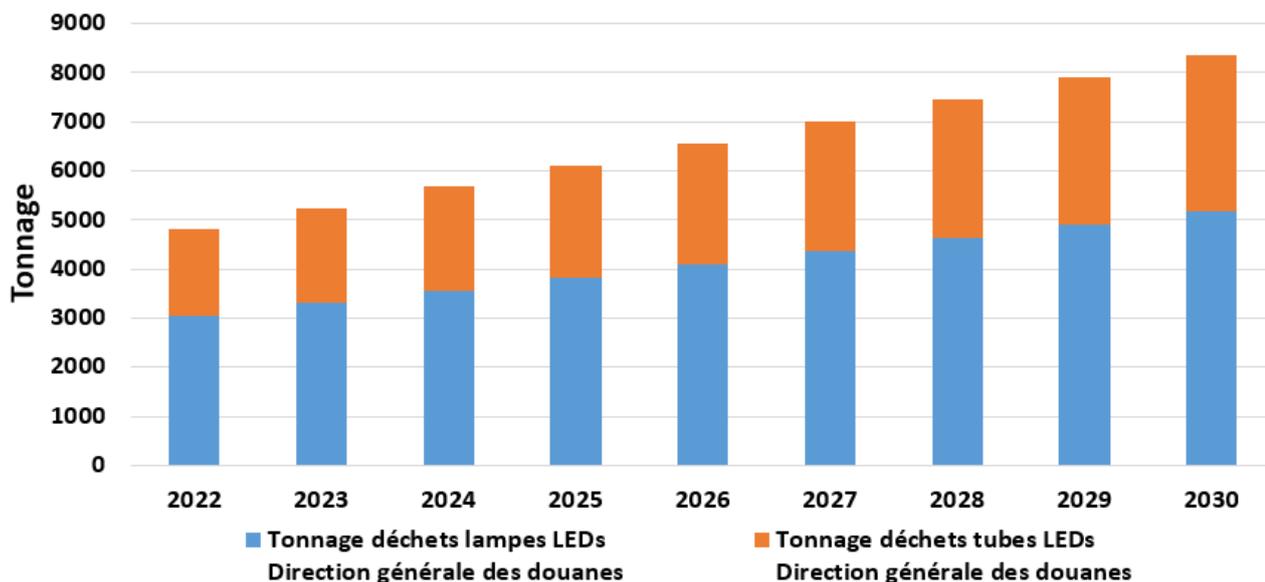


Figure 2-14 : Tonnage de déchets potentiels de lampes et tubes à LED en France, entre 2022 et 2030

Les données nationales des taux de collecte étant confidentielles, nous avons par conséquent pris la décision de travailler sur des hypothèses, pour pallier ce manque de données. D'après l'éco-organisme ECOSYSTEM, le taux de collecte pour les déchets des dispositifs à LED, en 2019, était estimé à 42%. Nous allons, dans le cadre de cette thèse, considérer deux scénarii : un taux de collecte constant à 42%, puis un taux croissant entre 42% et 100%. Grâce à ces deux simulations, nous pourrions estimer les gisements minimal et maximal qui seraient attribués pour l'entreprise ARTEMISE. Dès lors, nous pourrions en déduire les débits des deux lignes de traitement industrielles (lampes et tubes), jusqu'à la fin de la décennie.

Par ailleurs, nous envisageons de préconiser à ARTEMISE des débits sécuritaires maximaux pour l’outil industriel. En effet, une fois le dimensionnement finalisé, il sera plus aisé de diminuer la capacité de traitement plutôt que de l’augmenter, au risque de détériorer prématurément les éléments mécaniques. Notons que cette contrainte technique est à considérer en fonction de la capacité financière de la société.

2.3.1.1. Scénario 1 : taux de collecte constant à 42%

Dans ce premier scénario, nous considérons un taux de collecte constant à 42% tout au long de la décennie. Le choix de ce scénario est volontaire pour donner de la visibilité à l’entreprise sur les quantités minimales qui seraient traitées. Les résultats sont récapitulés dans le Tableau 2-7.

Année	% lampes	% tubes	Tonnage potentiel déchets lampes	Tonnage potentiel déchets tubes	Taux de collecte	Tonnage déchets lampes collectés	Tonnage déchets tubes collectés
2022	63	37	3 042	1 758	0,42	1 278	738
2023	63	37	3 298	1 937	0,42	1 385	814
2024	63	37	3 555	2 115	0,42	1 493	888
2025	62	38	3 816	2 294	0,42	1 603	963
2026	62	38	4 080	2 473	0,42	1 714	1 039
2027	62	38	4 347	2 654	0,42	1 826	1 115
2028	62	38	4 617	2 835	0,42	1 939	1 191
2029	62	38	4 890	3 018	0,42	2 054	1 267
2030	62	38	5 164	3 201	0,42	2 169	1 344

Tableau 2-7 : Tonnages potentiels et collectés en France, entre 2022 et 2030 (scénario 42%)

En 2022, 1278 tonnes de lampes à LED et 738 tonnes de tubes à LED seraient collectées dans l’hexagone. Le gisement augmenterait tout au long de la décennie pour atteindre, en 2030, 2169 tonnes de lampes à LED et 1344 tonnes de tubes à LED (cf. Figure 2-15), dont la moitié serait allouée à ARTEMISE. En considérant cette potentialité, nous parvenons ainsi à estimer le gisement minimal que pourrait avoir à traiter l’entreprise ARTEMISE, entre 2022 à 2030 (cf. Tableau 2-8 et Figure 2-16).

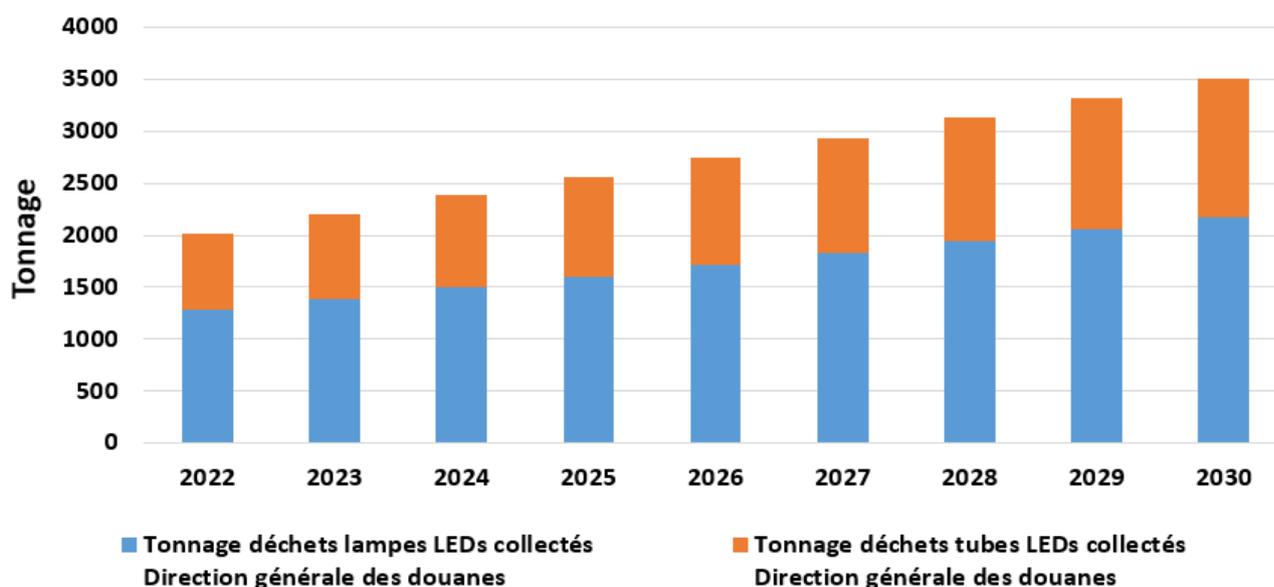


Figure 2-15 : Tonnage de déchets de lampes et tubes à LED collectés en France, entre 2022 et 2030 (scénario 42%)

Année	Données direction des douanes		Données ECOSYSTEM [3]	
	Tonnage déchets lampes collectés	Tonnage estimé pour ARTEMISE	Tonnage déchets lampes collectés	Tonnage estimé pour ARTEMISE
2022	1 278	639	1 090	545
2023	1 385	693	1 545	773
2024	1 493	747	1 909	955
2025	1 603	801	2 272	1 136
2026	1 714	857	2 727	1 364
2027	1 826	913	3 454	1 727
2028	1 939	970	3 909	1 955
2029	2 054	1 027	4 318	2 159
2030	2 169	1 084	4 272	2 136

Tableau 2-8 : Gisement de lampes en France, entre 2022 et 2030 (scénario 42%)

L'entreprise ARTEMISE pourrait traiter, l'année prochaine, 639 tonnes de lampes. Comparées aux 545 tonnes évaluées par ECOSYSTEM, dans l'étude « Etude Ernst & Young, 2015 » [3], cela induirait un écart de 15%. En 2023, les données de l'éco-organisme dépasseraient celles des douanes et cet écart deviendrait alors négatif (-12%). Cette tendance continuerait à s'accroître considérablement pour atteindre -102% en 2028, -110% en 2029 et -97% en 2030. A la fin de la décennie, ARTEMISE ne pourrait recycler environ qu'un millier de tonnes de lampes à LED, lorsque ECOSYSTEM en estimait le double.

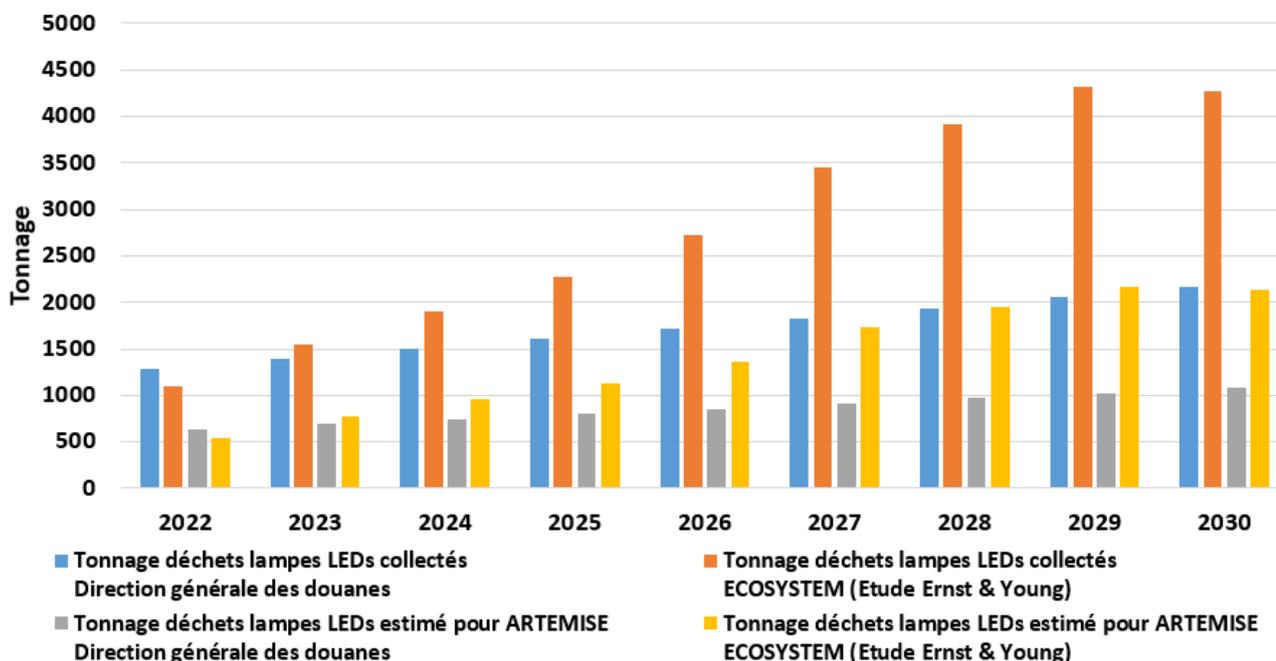


Figure 2-16 : Gisement de lampes en France, entre 2022 et 2030 (scénario 42%)

Ce premier scénario nous permet donc de conclure que le débit annuel minimal, de la ligne de traitement industrielle de l'entreprise ARTEMISE, est évalué à environ 1100 tonnes, soit à un débit horaire de 270 kg/h. La politique environnementale en vigueur et future, ainsi que la prise de conscience des citoyens français au regard de la préservation de l'environnement, ne devraient pas faire baisser le taux de collecte [3] [10] [11] [12] [13]. Depuis 2015, l'objectif de collecte (Directive DEEE II), exprimé en pourcentage de la moyenne des équipements électriques et électroniques

mis sur le marché les trois années précédentes, ne cesse d'augmenter (Source ADEME). En 2017, cet objectif de collecte, concernant toutes les technologies de lampes, était à 52% et il a atteint 65% en 2019 [12]. Nous ne disposons pas de données sur les objectifs de collecte pour les dispositifs à LED. C'est pourquoi, nous proposerons un second scénario avec une tendance maximale, correspondant à un taux croissant de 42% en 2019 à 100% en 2030.

En outre, l'évolution de la performance de collecte par habitant, entre 2009 et 2017 (illustrée sur la Figure 2-17) [12], montre explicitement que le taux de collecte ne pourrait que prospérer vers une perspective positive, en France. En effet, 37 départements collectaient moins de 0,5 lampe/habitant/an en 2009, contre 11 départements en 2017, soit une nette amélioration de 70%. Si bien que, ce rapport d'activités 2017, de l'éco-organisme ECOSYSTEM, vient appuyer notre choix du second scénario de croissance du taux de collecte de 42% à 100%.

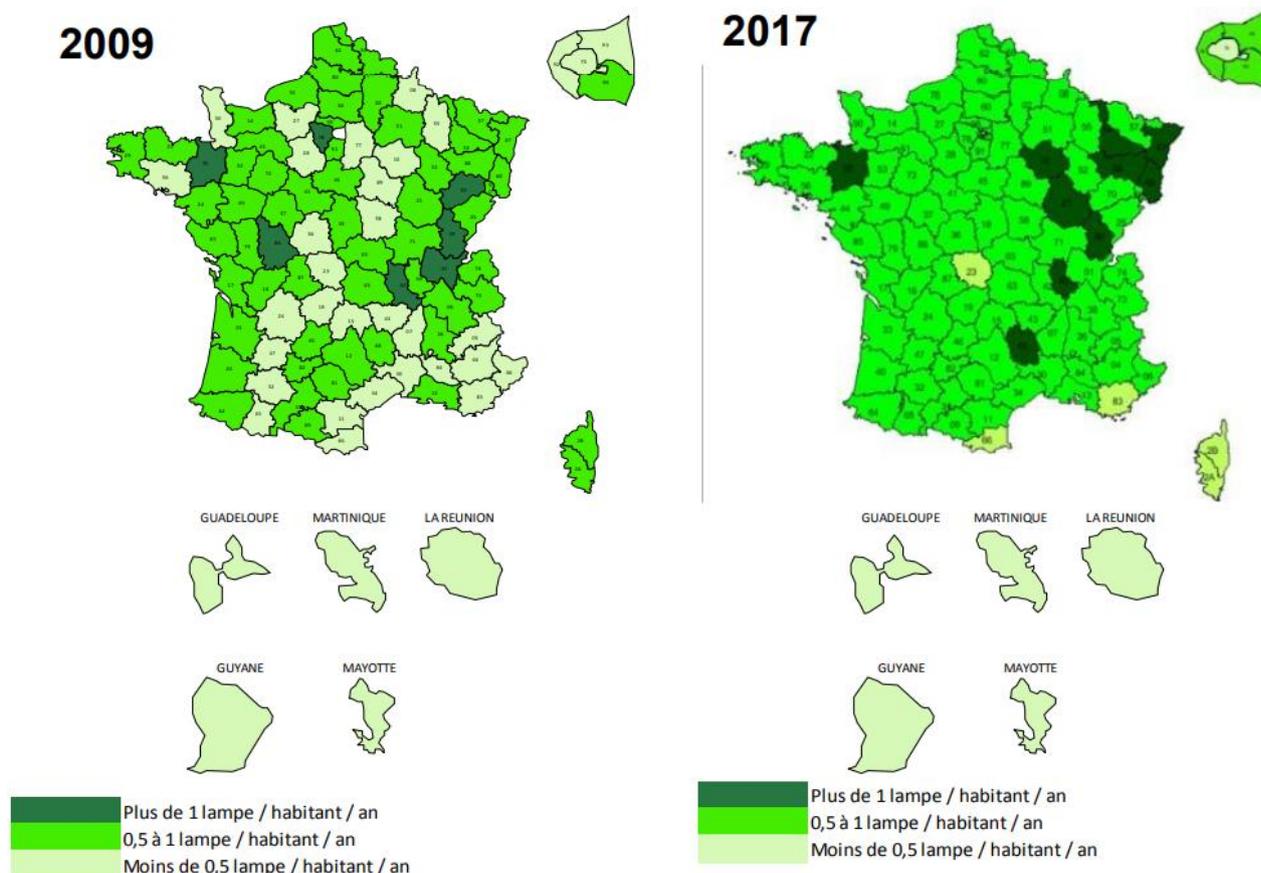


Figure 2-17 : Evolution de la performance de collecte par habitant, entre 2009 et 2017 [12]

De façon générale, la présentification de l'urgence climatique a bien intégré le recyclage dans la préoccupation des français [12]. En 2019, la collecte des lampes (toutes technologies confondues) représentait 0,08 kg/hab [13], ce qui correspond à un taux de collecte de 46% suivant le mode de calcul n°1 et à 60% de collecte pour le mode de calcul n°2. Les déchets de LEDs vont augmenter annuellement jusqu'en 2030. Nous constaterons à partir de 2025, une prédominance des dispositifs LEDs au détriment des équipements traditionnels [3].

Dans la section suivante, nous présentons les analyses concernant un taux de collecte croissant durant la décennie, pour évaluer le gisement maximal des dispositifs à LED.

2.3.1.2. Scénario 2 : évolution du taux de collecte de 42% à 100%

Au travers de ce second scénario, nous faisons croître le taux de collecte jusqu'à atteindre 100% à la fin de la décennie, avec un taux de croissance annuel estimé à 5,8%. En 2022, 1 807 tonnes de lampes et 1 044 tonnes de tubes à LED seraient collectées. En 2030, le gisement collecté devrait dépasser 5 000 tonnes pour les lampes et 3 000 pour les tubes. ARTEMISE traiterait donc 50% de ce gisement, ce qui correspondrait à plus de 2 500 tonnes de lampes et jusqu'à 1 600 tonnes de tubes à LED. Les résultats de cette analyse sont synthétisés dans le Tableau 2-9 et sur la Figure 2-18.

Année	% lampes	% tubes	Tonnage potentiel déchets lampes	Tonnage potentiel déchets tubes	Taux de collecte	Tonnage déchets lampes collectés	Tonnage déchets tubes collectés
2022	63	37	3 042	1 758	0,59	1 807	1 044
2023	63	37	3 298	1 937	0,65	2 150	1 263
2024	63	37	3 555	2 115	0,71	2 524	1 502
2025	62	38	3 816	2 294	0,77	2 931	1 762
2026	62	38	4 080	2 473	0,83	3 370	2 043
2027	62	38	4 347	2 654	0,88	3 843	2 346
2028	62	38	4 617	2 835	0,94	4 350	2 671
2029	62	38	4 890	3 018	1	4 890	3 018
2030	62	38	5 164	3 201	1	5 164	3 201

Tableau 2-9 : Tonnages potentiels et collectés en France, entre 2022 et 2030 (scénario 42-100%)

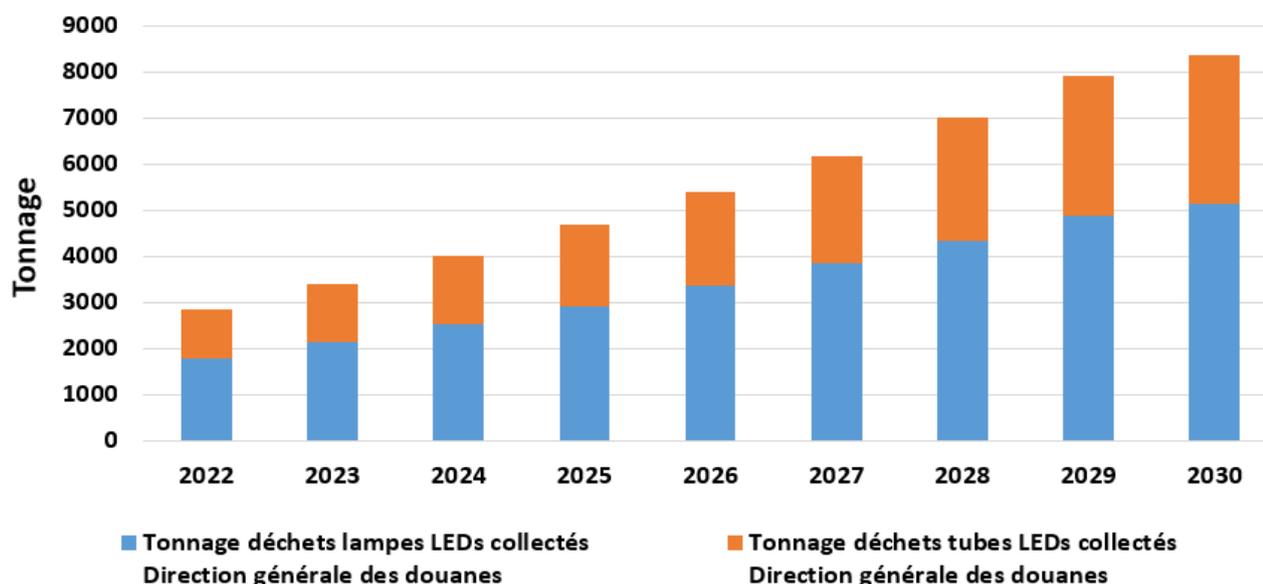


Figure 2-18 : Tonnage de déchets de lampes et tubes à LED collectés en France, entre 2022 et 2030 (scénario 42-100%)

En comparant ces résultats aux données de l'étude de l'éco-organisme sur les lampes à LED [3], nous constatons que la société ARTEMISE devrait dimensionner une ligne industrielle avec un débit annuel de l'ordre de 2 600 tonnes, au lieu de 2 200 tonnes estimées par ECOSYSTEM. L'écart serait évalué en 2022 à 40%, il diminuerait jusqu'à 10% en 2027. Puis, il augmenterait pour atteindre 17% en 2030. Les résultats de cette analyse sont présentés ci-dessous, dans le Tableau 2-10 et sur la Figure 2-19.

Année	Données direction des douanes		Données ECOSYSTEM [3]	
	Tonnage déchets lampes collectés	Tonnage estimé pour ARTEMISE	Tonnage déchets lampes collectés	Tonnage estimé pour ARTEMISE
2022	1 807	904	1 090	545
2023	2 150	1 075	1 545	773
2024	2 524	1 262	1 909	955
2025	2 931	1 465	2 272	1 136
2026	3 370	1 685	2 727	1 364
2027	3 843	1 922	3 454	1 727
2028	4 350	2 175	3 909	1 955
2029	4 890	2 445	4 318	2 159
2030	5 164	2 582	4 272	2 136

Tableau 2-10 : Gisement de lampes en France, entre 2022 et 2030 (scénario 42-100%)

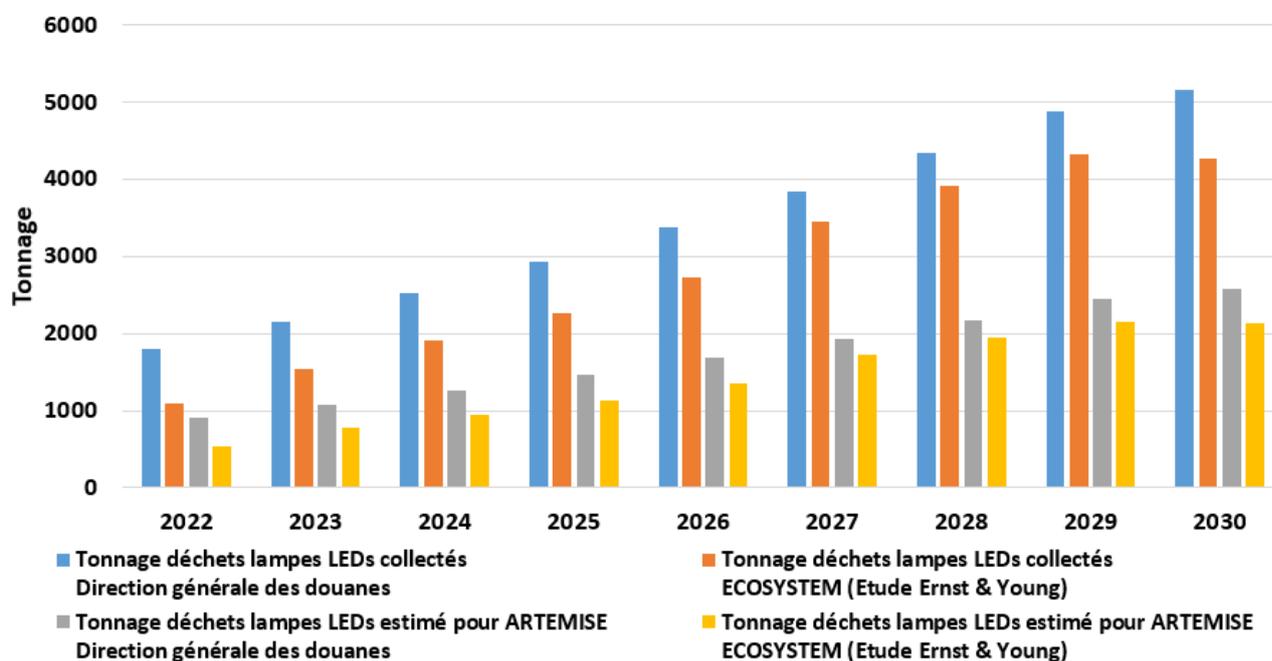


Figure 2-19 : Gisement de lampes en France, entre 2022 et 2030 (scénario 42-100%)

Rappelons que faute d’obtenir les données des ventes en France des dispositifs à LED et l’évolution de leur taux de collecte à partir de 2010, nous avons basé notre étude du gisement sur des projections jusqu’en 2030. Pour cela, nous avons borné le gisement des dispositifs à LED, par des valeurs minimales et maximales. Nous sommes conscients que ces analyses ont un degré de fiabilité relatif, toutefois elles nous permettent d’obtenir une première approche quantitative des futurs déchets de LEDs, qui seraient générés sur le territoire. En conséquence, nous considérerons les débits maximaux pour les futures lignes de traitement industrielles de lampes et de tubes à LED. Ceci nous permettra de garantir la pérennité et donc la viabilité économique de l’entreprise ARTEMISE.

Par ailleurs, les tonnages réels collectés français sont comparés aux tonnages collectés modélisés dans l’étude ECOSYSTEM (Etude Ernst & Young, 2015) [3]. Le gisement réel a été estimé à partir des quantités triées puis stockées dans l’usine ARTEMISE. Rappelons que la société traite 50% du gisement français. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2-11.

Nous constatons un facteur variant entre 2,5 et 4, en faveur des données ECOSYSTEM. Cet écart ne peut être expliqué, à ce stade de nos recherches et analyses, par le manque initial de données de l’étude « Etude Ernst & Young, 2015 » [3].

Tonnage de lampes à LED			
Année	Trié par ARTEMISE	Collecté en France	Estimé par ECOSYSTEM (Etude Ernst & Young) [3]
2016	25,5	51	158
2017	37,5	75	238
2018	50	100	396
2019	62,5	125	550
2020	143	286	700

Tableau 2-11 : Tonnage déchets de lampes à LED : trié par ARTEMISE, collecté en France et estimé par ECOSYSTEM

Afin d’optimiser la valorisation des dispositifs à LED et le traitement de ces déchets dans le futur outil de production industriel de l’entreprise, les typologies qui sont actuellement vendues sur le marché français doivent aussi être analysées. Cet aspect permettra de favoriser la préservation des composants électroniques, à haute valeur marchande, pour une meilleure extraction des métaux précieux et stratégiques les constituant [3].

2.3.2. Caractérisation typologique

Nous souhaitons connaître la cartographie du gisement actuellement vendu par le réseau de distribution français (magasins de bricolage et grandes surfaces). L’objectif unique de cette démarche est une étude académique. Cependant, chaque distributeur se réserve le droit de ne pas divulguer ses chiffres de ventes, pour des raisons de confidentialité, et ce, afin de rester leader sur son segment. Ces données relèvent donc de la stratégie commerciale.

Toutefois, la cartographie des ventes de lampes et de spots à LED du magasin LEROY MERLIN bien achalandé de la ville de Massy, situé dans l’ESSONNE (91), a pu être obtenue. Cette enseigne de bricolage est leader sur le marché français depuis 2020, selon le classement établi par la fédération des magasins de bricolage [14]. Les données collectées sont présentées dans le Tableau 2-12 et sur les Figures 2-20 et 2-21.

Typologie (lampes et spots)	2018		2019		
	Unités	%	Unités	%	Progression
E14 plastique	3 502	2,8	3 607	2,5	+3%
E14 verre	14 295	9,7	17 297	11,8	+21%
E27 petits plastique	40 458	32,2	48 550	33,1	+20%
E27 petits verre	15 335	12,2	20 395	13,9	+33%
E27 gros plastique	18 157	14,4	20 154	13,7	+11%
GU10	25 830	20,5	26 657	18,2	+3%
G9	6 890	5,5	6 821	4,7	-1%
Lampes connectées	1 337	1,1	3 235	2,2	+142%
Total	125 804	100	146 716	100	+16,6%

Tableau 2-12 : Ventes de lampes et de spots à LED du magasin LEROY MERLIN Massy, en 2018 et 2019

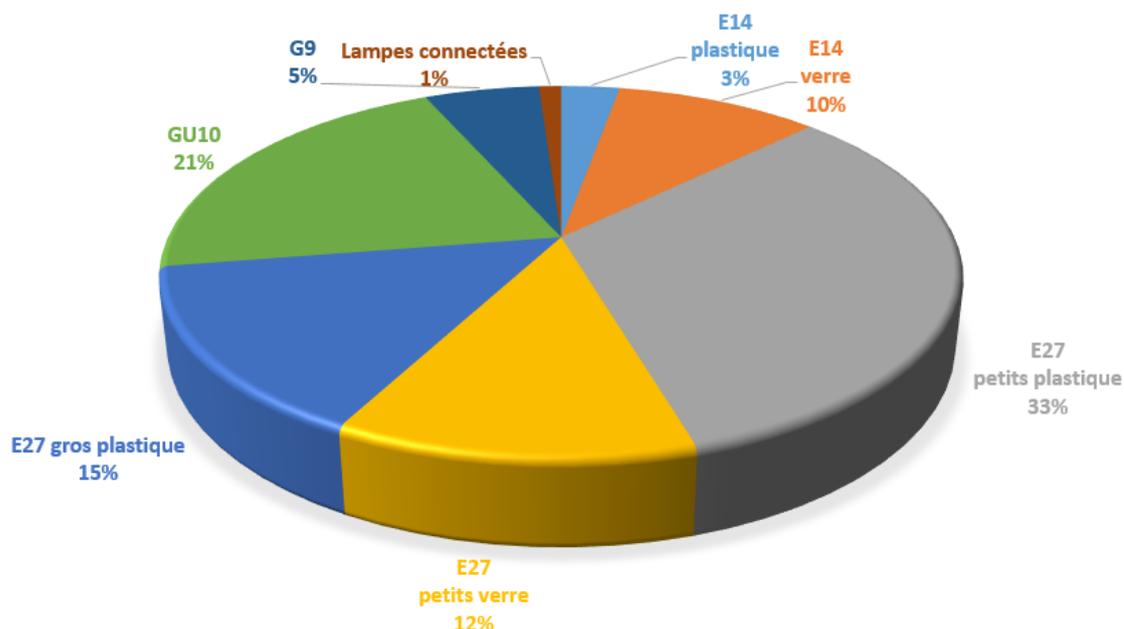


Figure 2-20 : Répartition des ventes 2018 de lampes et de spots à LED LEROY MERLIN Massy

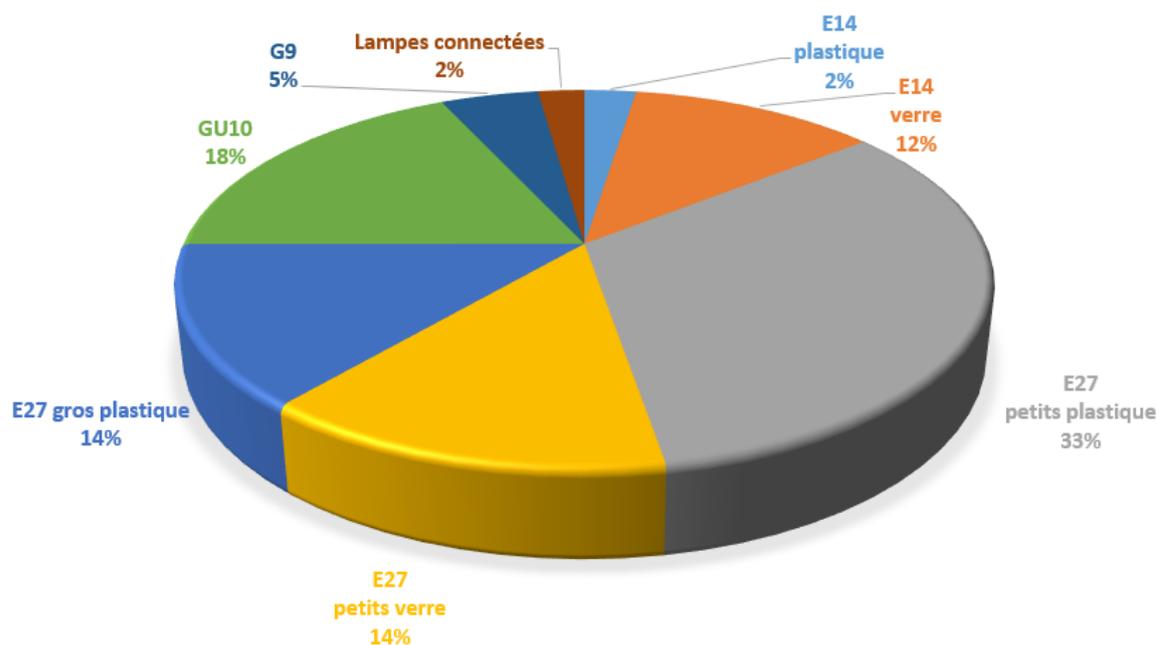


Figure 2-21 : Répartition des ventes 2019 de lampes et de spots à LED LEROY MERLIN Massy

En exploitant ces données, nous constatons une augmentation générale des ventes de lampes et de spots à LED de l'ordre de +16,6%, entre 2018 et 2019. Cette progression peut être corrélée avec l'augmentation du gisement français de +15% (cf. Tableau 2-6).

Plus finement, les lampes connectées, avec la technologie sans fil Bluetooth®, présentent la croissance la plus importante (+142%). Notons au passage la richesse des cartes électroniques, de ce type de produits, par rapport à celle des lampes à LED classiques, qui seront de ce fait plus intéressantes économiquement à valoriser avec une plus haute valeur ajoutée intrinsèque

(présence plus importante de métaux précieux et stratégiques, tels que l'or, l'argent et le palladium²⁰).

En outre, la part des lampes à LED types E27 et E14, avec les puces à filaments COG (Chip On Glass), montrent respectivement une augmentation de +33% et +21%. Ceci peut s'expliquer, notamment, par l'aspect ornemental de ce modèle de lampes, qui imite les ampoules à incandescence en rappelant les ampoules d'antan pour la décoration vintage. L'autre particularité des lampes à LED à filaments est qu'elles sont constituées entre 68-78% de verre. Ceci doit être pris en considération, dans le cahier des charges de la ligne de traitement industrielle, afin de pouvoir valoriser une fraction importante de verre, dans les années à venir, qui pourrait augmenter. La fraction de verre est quantifiée par le bilan massique du gisement de la technologie 2020 (cf. partie 2.4.3).

Les modèles de lampes à LED E27 petits et gros plastique (correspondant aux bulbes de petit et de grand diamètres) ont une progression respective de +20% et de +11%. Ce qui augmentera la part des matrices plastiques à valoriser, avec la problématique d'incorporation des retardateurs de flamme bromés. Les lampes E14 plastique et les spots GU10 avec une croissance de +3% n'impacteraient pas le débit de traitement de l'outil industriel. Enfin, la chute de -1% du modèle G9 est quant à elle négligeable.

En observant les Figures 2-20 et 2-21, nous constatons que la fraction des systèmes d'éclairage à LED avec les puces à filaments COG (E27 et E14) évolue de 21,9% à 25,7% (soit une progression de +3,8%), dans la répartition des ventes du magasin LEROY MERLIN de la ville de Massy. La part des systèmes d'éclairage à LED plastique avec les puces SMD (E27 et E14) fluctue de 49,4% à 49,3% (soit une diminution négligeable de -0,1%). En intégrant les spots GU10 à la part des dispositifs SMD, la fraction décroît de 69,9% à 67,5% (soit une décroissance de -2,4%). Si bien que, cette tendance confirme que les dispositifs d'éclairage à LED en verre sont en progression, depuis ces dernières années.

Par ailleurs, il a été réalisé en décembre 2019 un « inventaire » du rayon des systèmes d'éclairage à LED du magasin MONOPRIX du centre-ville de Troyes. Le Tableau 2-13 et la Figure 2-22 présentent les données collectées.

Typologie (lampes et spots)	Décembre 2019	
	Unités	%
E14 plastique	4	1,8
E14 verre	28	12,4
E27 petits plastique	65	28,8
E27 petits verre	64	28,3
E27 gros plastique	0	0
GU10	22	9,7
GU5.3	15	6,6
G9	7	3,1
B22 plastique	11	4,9
B22 verre	10	4,4
Total	226	100

Tableau 2-13 : Inventaire du rayon de lampes et de spots à LED du magasin MONOPRIX de Troyes

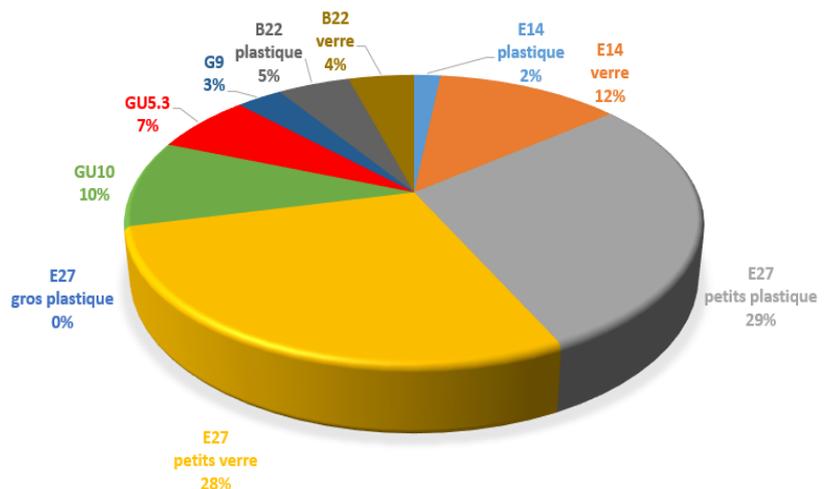


Figure 2-22 : Représentation du rayon de lampes et de spots à LED du magasin MONOPRIX de Troyes, décembre 2019

²⁰ Composition moyenne des drivers : 50% résine époxy, 20% fibre de verre, 20% cuivre, 8% fer, 4% tungstène, 2% nickel, 2% plomb, 1% zinc, 0,2% argent, 0,1% or et 0,005% palladium [15].

La Figure 2-22 nous permet de constater que la répartition du rayon est de 45,1% pour les systèmes d'éclairage à puces LEDs à filaments (E14, E27 et B22 en verre) et de 54,9% pour les systèmes d'éclairage à puces LEDs SMD (E14, E27, GU10, GU5.3, G9 et B22 en plastique). Cette constatation confirme la tendance observée à travers les données des ventes de l'enseigne LEROY MERLIN de Massy. La part de marché des dispositifs d'éclairage à LED avec les puces à filaments COG est en plein essor, depuis plusieurs années, induisant ainsi une augmentation de la fraction de verre à traiter, en fin de cycle de vie des systèmes d'éclairage à LED.

Remarquons que la valorisation des dispositifs à LED en verre est compatible avec la ligne de traitement actuellement disponible chez ARTEMISE. En effet, leur traitement est moins complexe que celui des autres typologies de LEDs et ne nécessite donc pas d'être abordé dans les études paramétriques de déconstruction des dispositifs LEDs dans le chapitre 3. Ils seront en conséquence valorisés par l'outil de traitement des lampes fluo-compactes existant.

Afin de corroborer ces analyses, des bilans massiques ont été réalisés sur des lampes et des tubes à LED présents dans les déchets actuels. Ces dispositifs ont été collectés et triés en 2019, ils reposent sur une technologie datant entre 2013 et 2014 (d'après les données relevées sur les produits). Par ailleurs, d'autres bilans massiques ont été effectués sur des lampes et des dalles à LED (en remplacement des tubes) neuves, commercialisées en 2020.

Ces études permettent d'estimer les futures fractions de matériaux et de composants électroniques que nous aurions à traiter au cours de la décennie. Elles sont essentielles pour dimensionner un outil de traitement industriel fiable techniquement, et par voie de conséquence, rentable et viable économiquement, pour l'entreprise ARTEMISE.

L'objectif industriel est donc double pour la société :

- Concevoir une machine de traitement, qui pourra traiter l'ensemble du gisement durant la prochaine décennie ;
- Garantir un potentiel de valorisation.

2.4. Les bilans massiques

En outre, ont été réalisés d'une part un bilan massique du gisement actuel des déchets, collectés par ECOSYSTEM puis triés et stockés chez ARTEMISE et d'autre part un bilan massique du gisement futur, en achetant des lampes et des dalles à LED neuves. Ces analyses ont été effectuées en utilisant la spectroscopie infrarouge FTIR et de fluorescence de rayons X.

2.4.1. Déchets actuels de lampes à LED

A partir de l'étude du gisement réalisée sur les déchets collectés en 2018, dans le cadre du projet RECYLED et en collaboration avec les Arts et Métiers ParisTech - Institut ENSAM de Chambéry, nous avons réalisé dans cette thèse une étude sur la valorisation des différents modèles de lampes et spots à LED usagées (E27, E14, E40, B22, GU10 et GU5.3) [16]. Pour obtenir un bilan massique représentatif de leur composition, les coefficients de pondération évalués dans la partie 2.2.1 ont été appliqués. Le bilan matériaux et composants, des principaux types de lampes et spots à LED, est récapitulé dans le Tableau 2-14, ci-dessous.

Notons que lors du désassemblage des échantillons de lampes et spots à LED, des défaillances de ces dispositifs ont été constatées. Elles étaient dues à la surchauffe des composants des drivers,

responsables de l'alimentation électrique. Des exemples de surchauffe des composants électroniques sont illustrés sur la Figure 2-23. Nous avons remarqué que 55% des puces à LED des lampes usagées étaient encore potentiellement fonctionnelles.

Lampes à LED	E27 petits plastique	E27 gros plastique	E27 verre	B22	E14	GU10	GU5.3	E40	Total fractions	
									(g)	(%)
Puissance (W)	9	15	9	9	4	5	5	80	-	-
Température (K)	2700	3000	2700	3000	2700	4000	3000	3200	-	-
LEDs + support (g)	2,79	0,58	0,19	0,13	0,10	0,76	0,06	2,92	7,5	5,6
Drivers (g)	6,49	1,03	0,72	0,24	0,31	2,50	0,09	1,42	12,8	9,5
Acier (g)	2,02	0,19	0,33	0,21	0,10	0,43	0,01	1,18	4,5	3,3
Aluminium (g)	9,33	4,48	-	0,16	0,30	0,53	0,21	43,54	58,6	43,4
Plastique PC ²¹ (g)	4,50	4,24	-	0,27	0,27	1,05	0,12	2,75	13,2	9,8
Plastique PBT ²² (g)	5,63	3,59	0,26	0,36	0,74	2,84	0,48	3,40	17,3	12,8
Silicone (g)	10,30	0,34	0,20	-	-	3,56	0,36	-	14,8	11
Verre (g)	-	-	3,41	-	-	-	-	-	3,4	2,5
Masse totale fractions (g)	41,05	14,45	5,11	1,37	1,82	11,66	1,34	55,22	132,0	97,7
Masse lampe (g)	42,81	14,56	5,36	1,41	1,85	11,72	1,37	56,00	135,1	100

Tableau 2-14 : Bilan matériaux et composants des principaux types de lampes et spots à LED (déchets 2019) : valeurs pondérées

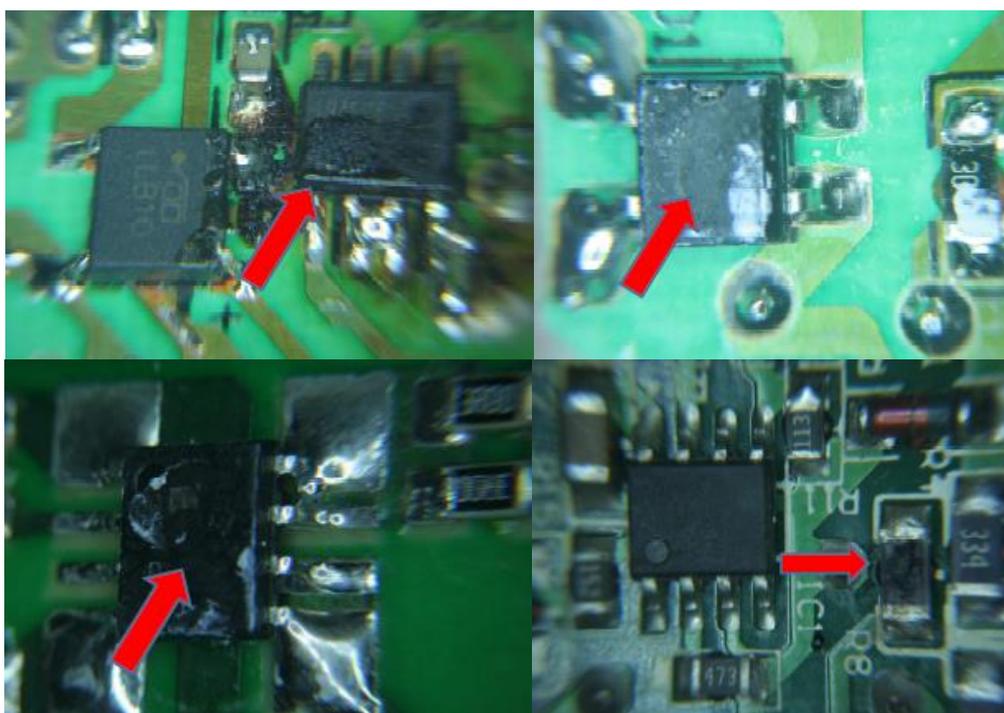


Figure 2-23 : Photographies des cartes électroniques avec surchauffe des composants électroniques

La défaillance des puces à LED serait vraisemblablement liée à celle de l'alimentation électrique qui induit leur détérioration. La Figure 2-24 montre les plateaux de puces à LED récupérés, dont certaines puces peuvent encore fonctionner. Comme illustré, les puces jaunes sont fonctionnelles, alors que les noires ne le sont plus.

²¹ PolyCarbonate.

²² PolyButylèneTéréphtalate

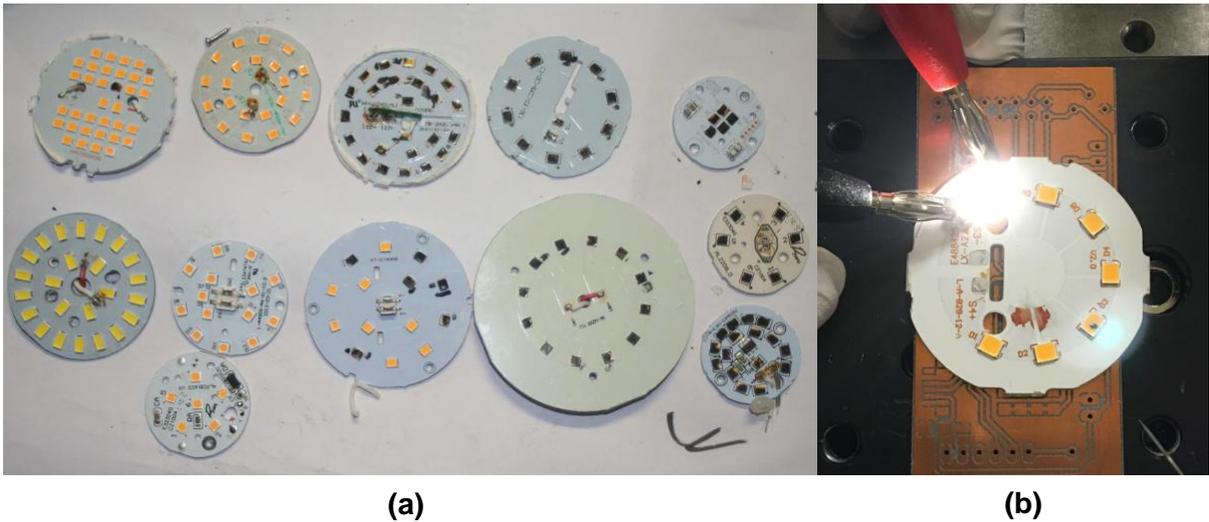


Figure 2-24 : Différents plateaux de puces à LED de l'étude (a) et fonctionnement d'une puce LED (b)

Cette étude nous permet de déduire la composition moyenne d'une lampe à LED (cf. Figure 2-25), issue du gisement de déchets 2019 (fabriquée entre 2013 et 2014, d'après les informations relevées sur les produits). La masse moyenne est évaluée à 135 g et la puissance moyenne à 11,4 W.

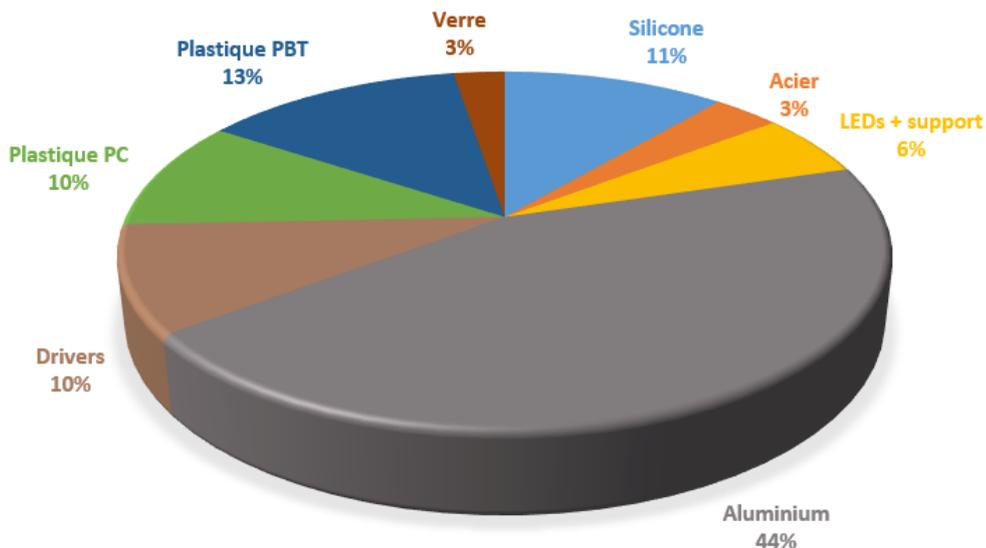


Figure 2-25 : Composition moyenne d'une lampe à LED (déchets 2019)

D'une part, cette cartographie nous permet de quantifier les matériaux qui seront recyclés : le verre (2,5%), l'acier (3,3%) et l'aluminium (43,4%). D'autre part, nous observons que la partie des matrices plastiques (le polycarbonate, le polybutylènetéréphtalate et le silicone) représente 33,6% du bilan massique.

Comme évoqué précédemment dans le chapitre 1, la présence de substances dangereuses, tels que les retardateurs de flamme bromés (RFBs), limite le recyclage des matrices en matières plastiques et donc l'atteinte du taux réglementaire de recyclage de 80%. Ce résultat nous oblige donc à déterminer la ou les fraction(s) contenant des retardateurs de flamme bromés, afin de pouvoir valoriser les matrices non bromées. En dépit, toute la partie plastique ne sera pas valorisée et par conséquent sera envoyée en unité d'incinération en tant que déchets dangereux, sans possibilité de récupération d'énergie [17] [18]. Si bien que, nous n'atteindrons pas le taux réglementaire imposé par les pouvoirs publics. En outre, ARTEMISE devra financer le traitement de ces plastiques et sera de ce fait déficitaire, au lieu de les valoriser en les vendant à un exutoire.

Les proportions des cartes électroniques et des plateaux de puces à LED représentent respectivement 9,5% et 5,6%. Ces fractions peuvent avoir une valorisation hybride : la réutilisation avant le recyclage final. Le scénario de réutilisation est le plus favorable, non seulement financièrement mais également pour l'environnement, puisque ces produits électroniques auront une seconde vie et pourront servir pour la fabrication de nouveaux équipements d'éclairage et/ou à la réparation de produits défectueux. Deux possibilités sont envisagées :

- Revente des composants aux entreprises qui fabriquent des dispositifs d'éclairage à LED ;
- Revente à des structures de l'Economie Sociale et Solidaire, tel que le réseau ENVIE pour la remise en état et la réutilisation des équipements défectueux.

Cependant, la seule condition sera de garantir leur fonctionnalité sur une période déterminée, par rapport à des produits neufs mis sur le marché [19] [20]. La réutilisation des composants électroniques participe à la limitation des déchets, contribue à faire changer les modes de consommation et constitue une originalité particulière du projet RECYLED, par rapport aux projets actuels qui s'intéressent plutôt à la valorisation matière.

Nous concluons, à partir de ce bilan massique, que le respect du taux réglementaire de recyclage de 80%, seuil réglementaire fixé par les pouvoirs publics représentés par l'éco-organisme ECOSYSTEM, dans le cadre de la Directive européenne 2012/19/EU du 4 juillet 2012 relative aux DEEE, est conditionné par la détermination des concentrations des retardateurs de flamme bromés, incorporés dans les matrices plastiques (PC, PBT et silicone). Le taux de valorisation énergétique dépendra, quant à lui, de l'identification d'une technologie capable d'éliminer les RFBs de ces dernières.

Notons que l'analyse détaillée des matériaux plastiques des dispositifs d'éclairage à LED est abordée dans cette thèse (cf. chapitre 4, partie 4.2). Intéressons-nous désormais aux tubes à LED.

2.4.2. Déchets actuels de tubes à LED

Des caractérisations sur les tubes à LED aluminium, plastique et verre, ont été réalisées. Dans cette étude, 45 tubes ont été désassemblés manuellement (15 pour chaque catégorie) à la halle industrielle de l'Université de Technologie de Troyes. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2-15.

Tubes à LED	Tubes Aluminium 120-150cm	Tubes Plastique 120-150cm	Tubes Verre 120-150cm	Total fractions	
				(g)	(%)
Puissance (W)	21	19	24	-	-
Température (K)	6500	4000	6500	-	-
Bandeau LEDs (g)	29,86	11,60	7,07	48,5	15,7
Drivers (g)	13,79	7,20	4,87	25,9	8,4
Acier (g)	1,74	-	4,07	5,8	1,9
Aluminium (g)	78,09	15,80	-	93,9	30,5
Câbles + gaine (g)	5,03	-	-	5,0	1,6
Plastique PC (g)	35,26	39,10	-	74,4	24,1
Plastique noir PC (g)	0,71	0,20	-	0,9	0,3
Plastique PBT (g)	3,28	11,40	-	14,7	4,8
Verre (g)	-	-	36,67	36,7	11,9
Masse totale fraction (g)	167,75	85,30	52,67	305,7	99,1
Masse tube (g)	169,40	85,50	53,47	308,4	100

Tableau 2-15 : Bilan matériaux et composants des principaux types de tubes à LED (déchets 2019) : valeurs pondérées

Pour obtenir un bilan représentatif, nous avons appliqué des coefficients de pondération en considérant le gisement de déchets en 2019, issu de la technologie datant de 2013-2014. Les coefficients appliqués dans le cadre de cette étude sont : 40% pour les tubes en aluminium, 40% pour les tubes en plastique et 20% pour les tubes en verre (source entreprise ARTEMISE). Le bilan matériaux et composants, des principaux types de tubes à LED, est présenté sur la Figure 2-26.

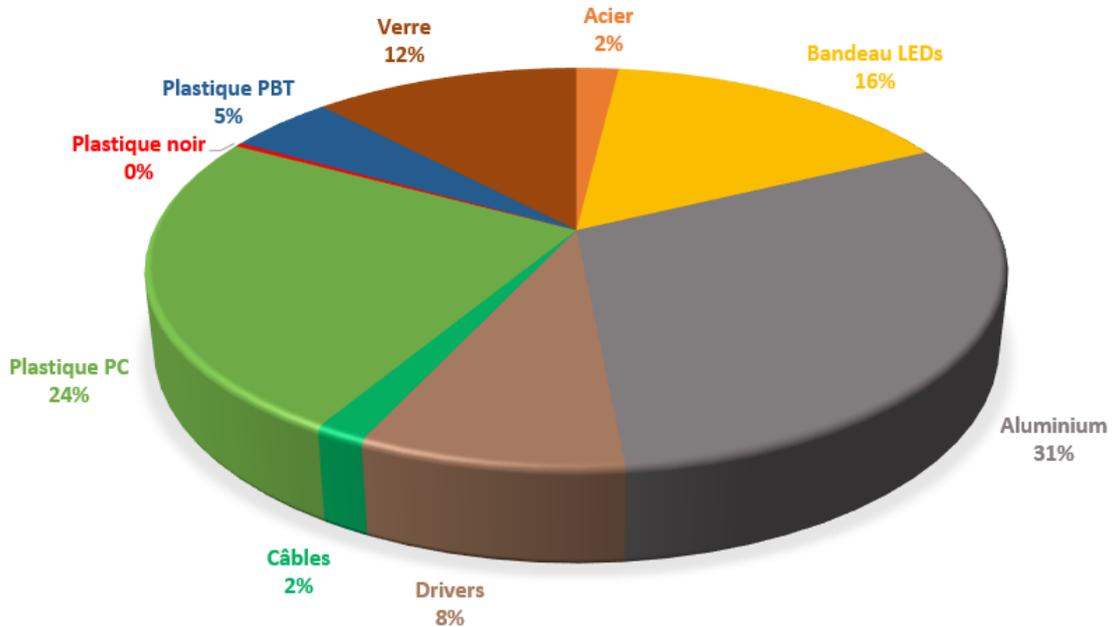


Figure 2-26 : Composition moyenne d'un tube à LED (déchets 2019) : Tubes aluminium, plastique et verre

Cette étude nous permet de déduire une composition moyenne d'un tube à LED (cf. Figure 2-26), issu du gisement de déchets 2019 (fabriqué entre 2013 et 2014, d'après les informations relevées sur les produits). La masse moyenne est appréciée à 308 g et la puissance moyenne à 21 W.

Un exemple de décomposition d'un tube à LED en aluminium est illustré sur la Figure 2-27. Notons qu'un essai de broyage sur 35183 tubes en aluminium, réalisé chez CORNEC [21] (industriel spécialisé dans la valorisation des métaux ferreux, non ferreux et dans les DEEE) a permis de confirmer les bilans matériaux et composants obtenus.

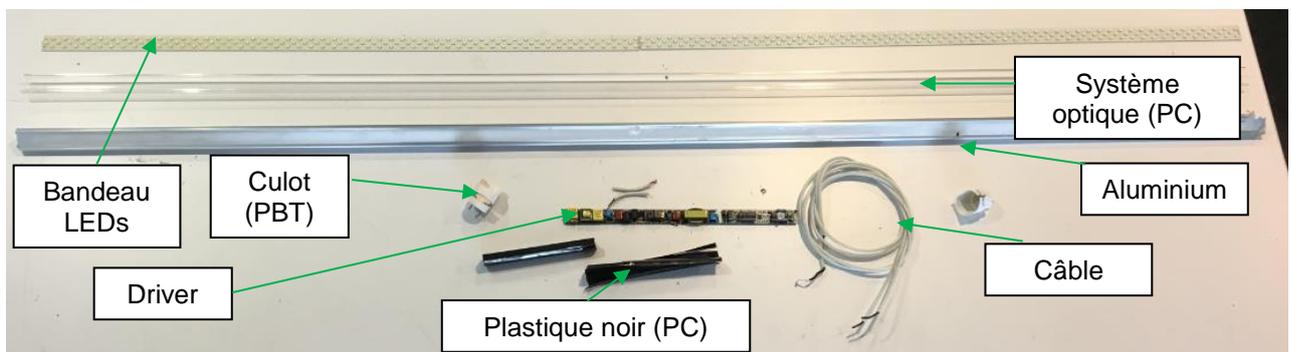


Figure 2-27 : Désassemblage manuel d'un tube à LED aluminium ALTILIGHT, 22 W, 150 cm, 6000-6900 K, masse 477 g et 320 puces LEDs (fabrication mai 2013)

Lors du démontage des échantillons, la totalité des puces à LED des tubes usagés étaient encore potentiellement fonctionnelles. L'annexe 3 présente les compositions moyennes des différents tubes à LED (en aluminium, en verre et en plastique), ainsi que des exemples d'illustrations de désassemblage manuel des tubes à LED en plastique et en verre.

Le bilan matières des tubes à LED indique que le verre (11,9%), l'aluminium (30,5%), l'acier (1,9%) et les câbles (1,6%) seront recyclés, soit un total de 45,9%. La fraction des matrices plastiques représente quant à elle 29,2% de la composition totale. D'une manière similaire aux lampes et spots à LED, la partie plastique devra être caractérisée plus finement, afin de déterminer la concentration des retardateurs de flamme bromés incorporés dans les matrices PBT et PC. Ces dernières devront être analysées, afin d'évaluer le taux de recyclage des tubes à LED. Cet aspect sera abordé dans le chapitre 4.

Enfin, les proportions des cartes électroniques et des bandeaux de puces à LED représentent respectivement 8,4% et 15,7%. Ces composants électroniques pourront soit être réutilisés soit être recyclés.

Les objectifs, des deux études (lampes et tubes) réalisées en 2019, sont d'aboutir au démantèlement des dispositifs d'éclairage à LED et à leur qualification en constituants élémentaires, à partir des big-bags de lampes et des caisses de tubes à LED collectés par l'éco-organisme ECOSYSTEM, triés et stockés chez ARTEMISE. Le travail scientifique consistera à dimensionner le débit des lignes de traitement industrielles pour valoriser les lampes et les tubes à LED, afin d'atteindre le taux réglementaire de recyclage de 80%, fixé par les pouvoirs publics. Rappelons que ce taux sera fortement dépendant de la fraction des retardateurs de flamme bromés, incorporée dans les matrices plastiques, et de la capacité de la technologie industrielle à les trier [17] [18]. Le taux de valorisation énergétique sera, quant à lui, dépendant d'une technologie capable de les extraire de ces matrices. Les taux de recyclage et de valorisation seront étudiés dans le chapitre 4.

Ces études nous montrent la grande diversité de déchets, de lampes et de tubes à LED mis sur le marché, du gisement à partir de 2013-2014, qui souligne le potentiel de réutilisation des puces à LED et celui des cartes électroniques de « seconde main ». Les fabricants ne cessent d'innover, afin de satisfaire les besoins des consommateurs, en termes de confort d'éclairage et de design. Profitons, dès lors, de cette richesse technologique, afin d'analyser le potentiel de valorisation des composants à LED par une réutilisation, lorsqu'ils ne sont pas endommagés ou éventuellement lorsqu'ils sont potentiellement réparables.

Les produits vendus entre 2013 et 2014, ayant permis la réalisation des deux bilans massiques, sont devenus obsolètes et ne correspondent plus désormais à la technologie commercialisée actuellement. De nos jours, les lampes à LED mises sur le marché contiennent moins de mousse silicone [16] et plus de verre. La tendance des modèles en verre (puces à LED à filaments) [3] [4] est en forte croissance, particulièrement grâce à l'éclairage ornemental. Les dalles à LED, vendues en remplacement des tubes [22], contiennent d'une part davantage de matériaux plastiques et aluminium et d'autre part moins de puces à LED et de drivers.

C'est pourquoi, des bilans massiques des produits neufs commercialisés aujourd'hui, qui arriveront en fin de vie dans la seconde moitié de la décennie, notamment à partir de 2025-2026 [7] [23], ont été réalisés. Ce qui permettra de prévoir les fractions futures des déchets de matériaux et de composants électroniques. Ces données sont essentielles pour le potentiel de valorisation des dispositifs, jusqu'à la fin de la décennie.

2.4.3. Lampes à LED (technologie 2020)

Afin d'obtenir un gisement représentatif des produits commercialisés actuellement, différents modèles de lampes à LED ont été achetés en 2020. Elles devraient être destinées à alimenter le gisement des déchets à compter de 2025 [7] [23]. A nouveau, des coefficients de pondération ont été appliqués dans le cadre de cette étude. Ils ont été obtenus par extrapolation de la caractérisation

typologique des ventes de l'enseigne LEROY MERLIN (cf. partie 2.3.2) et par la caractérisation des big-bags actuels (cf. partie 2.2.1). Les coefficients appliqués sont donc de 30% pour les lampes E27 en plastique, 30% pour les lampes E27 en verre, 30% pour les spots GU10, 4% pour les lampes E14 en plastique, 4% pour les lampes E14 en verre et 2% pour les lampes diverses (type E40). Les hypothèses émises dans cette section permettent de pallier le manque de données concernant les typologies des équipements à LED vendus. Le bilan matériaux et composants, des principaux types de lampes à LED, est récapitulé dans le Tableau 2-16. L'annexe 4 présente les compositions moyennes des lampes et spots à LED fabriqués en 2020.

Lampes à LED	E27 plastique	E27 verre	GU10	E14 plastique	E14 verre	E40	Total fractions	
							(g)	(%)
Puissance (W)	10	11	6,9	5,7	4	50	-	-
Température (K)	2700 4000	2700 4000	4000	2700	2700	4000	-	-
LEDs + support (g)	1,68	0,57	1,82	0,05	0,02	1,48	5,6	9,8
Drivers (g)	1,25	1,41	2,04	0,24	0,05	2,80	7,8	13,6
Acier (g)	0,43	0,49	0,47	0,04	0,04	0,88	2,6	4,1
Aluminium (g)	1,31	0,00	0,00	0,31	0,00	10,29	11,9	20,8
Plastique PC (g)	2,14	0,00	1,66	0,29	0,00	1,40	5,5	9,6
Plastique PBT (g)	3,70	0,59	0,00	0,31	0,03	2,40	7,0	12,2
Silicone (g)	0,00	0,15	0,30	0,02	0,00	2,12	2,6	4,5
Verre (g)	0,00	7,15	6,77	0,00	0,54	0,00	14,5	25,2
Masse totale fractions (g)	10,51	10,36	13,06	1,26	0,68	21,37	57,3	99,7
Masse lampe (g)	10,52	10,44	13,10	1,27	0,69	21,41	57,4	100

Tableau 2-16 : Bilan matériaux et composants des principaux types de lampes et spots à LED (technologie 2020) : valeurs pondérées

Nous avons ainsi déduit la composition moyenne d'une lampe à LED, issue du gisement commercialisé en 2020, avec une masse moyenne de 57 g et une puissance moyenne de 9,8 W. Cette dernière est présentée ci-dessous sur la Figure 2-28.

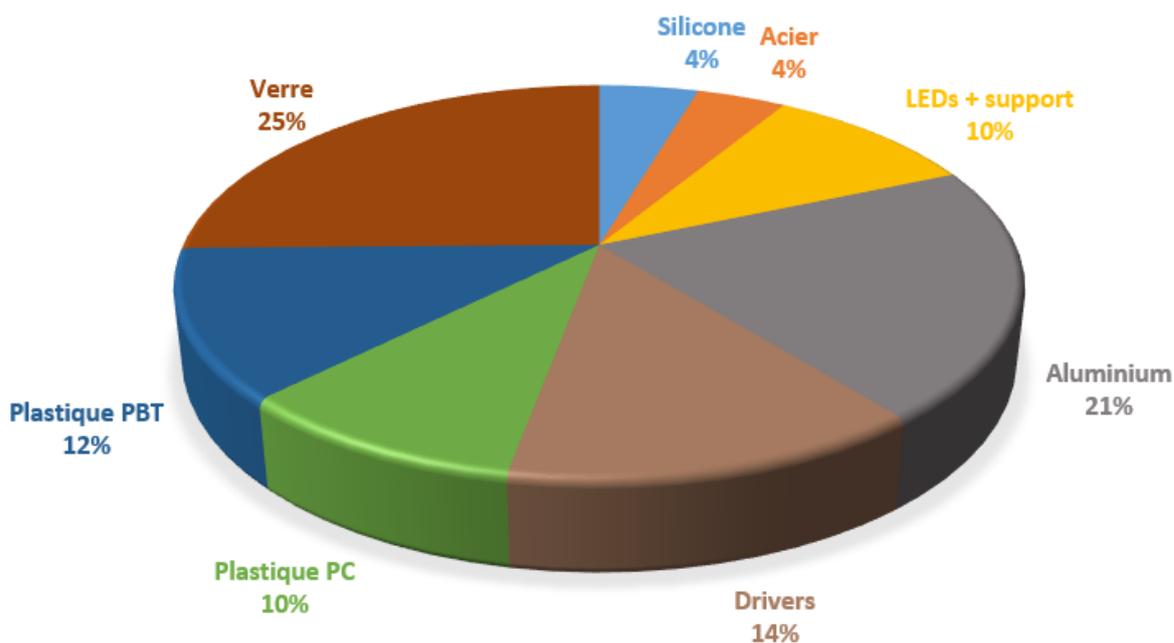


Figure 2-28 : Composition moyenne d'une lampe à LED commercialisée en 2020 (lampes E27, E14, E40 et spots GU10)

En comparant les bilans massiques des technologies, de lampes et de spots à LED, entre 2013 et 2020, synthétisés dans le Tableau 2-17, nous observons une croissance des fractions de l'acier (+0,8%), des plateaux de puces à LED (+4,2%), des drivers (+4,1%) et du verre (+22,7%). Par ailleurs, il est noté une décroissance des fractions de l'aluminium (-22,6%), du plastique PC (-0,2%), du plastique PBT (-0,6%) et du silicone (-6,5%).

Ces variations des fractions sont directement corrélées à l'engouement des systèmes en verre. Les nouveaux équipements à LED présentent des performances énergétiques élevées, par la maîtrise de la fabrication des matériaux semi-conducteurs. Aujourd'hui, il y a un besoin moindre de mousses isolantes, répartitrices de chaleur, pour protéger l'électronique de commande.

Fraction lampes à LED (%)	Technologie 2013	Technologie 2020	Variation
Acier	3,3	4,1	+0,8
LEDs + support	5,6	9,8	+4,2
Aluminium	43,4	20,8	-22,6
Drivers	9,5	13,6	+4,1
Plastique PC	9,8	9,6	-0,2
Plastique PBT	12,8	12,2	-0,6
Silicone	11	4,5	-6,5
Verre	2,5	25,2	+22,7

Tableau 2-17 : Evolution des bilans massiques des technologies de lampes et de spots à LED, entre 2013 et 2020

Ces analyses de l'évolution des fractions de matériaux et de composants électroniques sont directement liées aux masses moyennes estimées des dispositifs des deux technologies. Il est constaté que les dispositifs à LED actuels sont plus légers de 58%, par rapport aux technologies plus anciennes datant de 2013-2014.

2.4.4. Dalles à LED (technologie 2020)

Les tubes à LED sont voués à disparaître au cours de la décennie, pour laisser place progressivement à la technologie des systèmes d'éclairage dalles à LED [22]. Nous avons, en conséquence, étudié deux modèles génériques de dalles, les plus commercialisées en France (de dimensions 60 cm x 60 cm et 120 cm x 30 cm) [14], afin d'analyser plus finement leur composition matières. Suite aux données de ventes 2019, communiquées par l'enseigne LEROY MERLIN, des coefficients de pondération de 50% ont été appliqués dans cette section pour ces deux modèles récemment commercialisés. Cette hypothèse a été posée pour également pallier le manque de données disponibles pour cette nouvelle typologie d'équipements. Les deux typologies de dalles utilisés dans cette étude sont :

- 60 x 60 de marque SECOM (réf : 2200 01 40)
- 120 x 30 de marque Panel Ultra Slim (réf : PL-30-120-40W)

Au même titre que la tendance des lampes, nous constatons également une évolution dans la composition des matériaux constituant ce type de dispositifs à LED, comparativement à celle des tubes de technologie 2013-2014. Le bilan matériaux et composants des dalles à LED commercialisées, en 2020, est synthétisé dans le Tableau 2-18, ci-dessous. Cette nouvelle catégorie d'équipements à LED devrait alimenter le gisement des déchets à partir de 2025-2026 [7] [23]. Ainsi, nous prévoyons une forte diminution des déchets de tubes à LED, à partir du milieu de la décennie.

Dalles à LED	Dalle 60 x 60	Dalle 120 x 30	Total fractions	
			(g)	(%)
Puissance (W)	40	40	-	-
Température (K)	4000	4000	-	-
Bandeau LEDs (g)	8,26	8,65	16,9	0,8
Drivers (g)	15,55	27,21	42,8	2,1
Acier (g)	13,26	15,52	28,8	1,4
Aluminium (g)	362,89	578,02	940,9	45,9
Câbles + gaine (g)	14,17	14,61	28,8	1,4
Plastique PC (g)	435,45	479,10	913,6	44,6
Plastique noir PC (g)	0,57	0,00	0,6	0,03
Plastique PBT (g)	1,64	22,95	24,6	1,2
Plastique PS (g)	9,31	11,11	20,4	1,0
Silicone (g)	32,62	0,00	32,6	1,6
Verre (g)	0,00	0,00	0,0	0,0
Masse totale fraction (g)	892,70	1157,15	2049,9	99,9
Masse dalle (g)	893,10	1157,71	2050,8	100

Tableau 2-18 : Bilan matériaux et composants des dalles à LED (technologie 2020) : valeurs pondérées

La Figure 2-29 expose la composition moyenne d'une dalle à LED vendue en France, en 2020. Ce bilan moyen des matériaux et des composants est déduit pour une dalle à LED, issue du gisement commercialisé en 2020, avec une masse moyenne de 2051 g et une puissance moyenne de 40 W. Les compositions moyennes des dalles à LED mises sur le marché, en 2020, sont présentées et détaillées dans l'annexe 5.

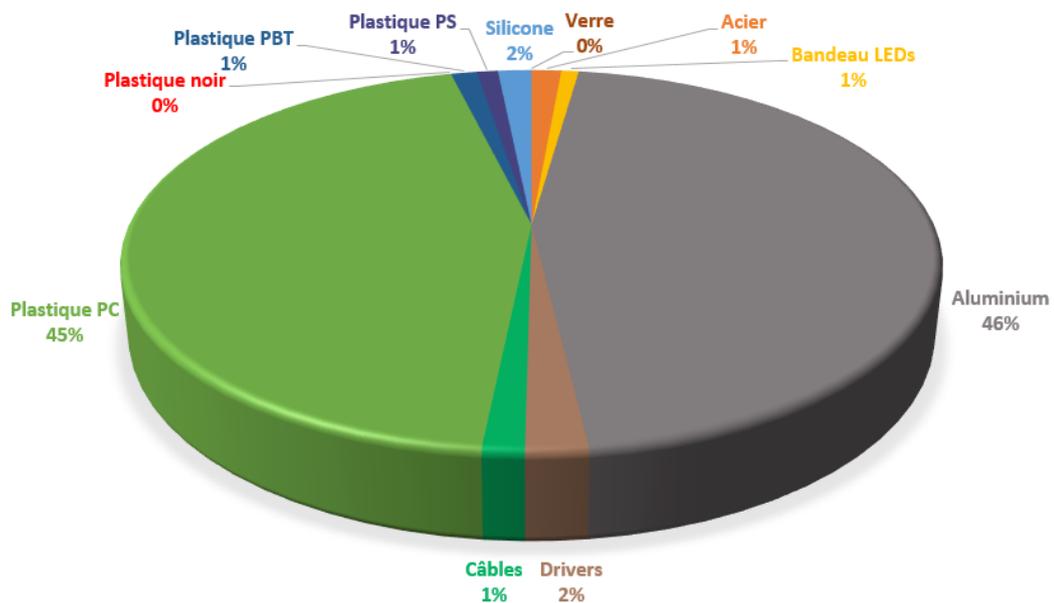


Figure 2-29 : Composition moyenne d'une dalle à LED commercialisée en 2020

Remarquons que cette nouvelle typologie de dispositifs à LED est plutôt destinée pour le marché professionnel [14]. De nombreuses solutions fonctionnelles et/ou ornementales sont proposées aux entreprises, tels que des plafonds ou des tableaux lumineux, des fausses fenêtres, des trompes l'œil, etc. Par conséquent, la durée d'utilisation de ces produits pourrait être réduite, à cause des campagnes de « relamping LED » du secteur tertiaire et des industriels (RATP, ADP, etc.). Les déchets récupérés seraient donc potentiellement encore fonctionnels.

En confrontant les bilans massiques des tubes à LED, technologie 2013-2014, avec ceux des dalles à LED, technologie 2020, synthétisés dans le Tableau 2-19, nous observons une croissance des fractions de l'aluminium (+15,4%), du plastique PC (+20,5%), du plastique PS (PolyStyrène : +1%) et du silicone [15] (+1,6%) et une décroissance des fractions de l'acier (-0,5%), du bandeau à LED (-14,9%), des drivers (-6,3%), des câbles (-0,2%), du plastique noir (-0,3%), du plastique PBT (-3,6%) et du verre (-11,9%).

Les dalles à LED reposent sur une nouvelle technologie plus performante qui nécessite moins de composants électroniques pour l'alimentation électrique et l'émission lumineuse, avec une disparition totale du verre. Cependant, les fractions des métaux non ferreux et du plastique PC augmentent considérablement. L'aluminium permet une meilleure rigidité des dispositifs (armatures métalliques pour supporter la masse moyenne de 2051 g contre 308 g pour les tubes, correspondant à une augmentation d'un facteur 7). Le PC quant à lui favorise une diffusion optimale de la lumière.

Le point retenant notre attention est la présence des mousses en silicone qui étaient absentes dans les drivers des tubes et qui représentent aujourd'hui 1,6% du bilan matériaux. Cette fraction de matière plastique ne pourrait pas être valorisée car elle serait, très probablement, incorporée par des retardateurs de flamme bromés. Cet aspect sera abordé dans le chapitre 4.

Fraction tubes-dalles à LED (%)	Technologie 2013	Technologie 2020	Variation
Acier	1,9	1,4	-0,5
Bandeau LEDs	15,7	0,8	-14,9
Aluminium	30,5	45,9	+15,4
Drivers	8,4	2,1	-6,3
Câbles + gaine	1,6	1,4	-0,2
Plastique PC	24,1	44,6	+20,5
Plastique noir PC	0,3	0,03	-0,3
Plastique PBT	4,8	1,2	-3,6
Plastique PS	0,0	1,0	+1
Silicone	0,0	1,6	+1,6
Verre	11,9	0,0	-11,9

Tableau 2-19 : Evolution des bilans massiques des technologies de tubes et de dalles à LED, entre 2013 et 2020

Nous observons une maturité de la technologie des puces à LED marquée par une optimisation de la gestion des matrices LEDs. Le courant et la tension d'alimentation des LEDs sont aujourd'hui plus calibrés. Cela induit un éclairage plus homogène et des performances énergétiques élevées. Ces dernières sont également dues aux choix et à la maîtrise de la croissance des matériaux semi-conducteurs, de la résine luminescente utilisée (LED blanche : conversion de la lumière bleue en lumière blanche) et à une plus grande contrôlabilité de la technologie de fabrication des composants, qui minimisent les pertes par effet Joule. Le besoin, en énergie, se trouve ainsi réduit, avec une électronique de commande moins robuste mais très performante. Si bien que, le recours à la mousse diélectrique (produit à base de silicone dont le rôle est d'homogénéiser la chaleur) [16] se trouve ainsi diminué voire inexistant dans les lampes.

Concernant les dalles à LED, en 2017, Angel Barroso, dans sa thèse [22], propose une nouvelle méthodologie pour optimiser la fabrication de ces équipements à LED, afin d'augmenter leur rendement énergétique. Il préconise plusieurs pistes pour poursuivre ses recherches (optimisation du nombre de LEDs, inclinaison des LEDs, utilisation du plexiglas perforé ou rainuré, etc.). Par conséquent, la technologie de cette typologie de dispositifs LEDs est en cours de maturité.

Les données affichées par les fabricants ne sont pas forcément exactes et ne donnent pas toutes les informations nécessaires. Aujourd'hui, nous remarquons qu'une fraction de mousse siliconée englobe les drivers des dalles, mais celle-ci devrait tendre à disparaître dans les années à venir. Cette observation devra être corroborée par des futurs bilans massiques, à partir de 2022-2023. Néanmoins, le faible pourcentage de cette fraction n'impactera pas de manière significative le taux de valorisation matière imposé à 80%.

A partir de ces études du gisement des déchets actuels et futurs, ainsi que de leur bilan matériaux et composants électroniques, nous allons désormais nous intéresser à leur potentiel de valorisation.

2.5. Le potentiel de valorisation

Deux gisements sont distingués dans cette partie, le premier est alloué aux lampes et aux spots à LED et le second concerne les tubes et les dalles à LED. Nous estimons, dans ce travail de thèse, le gisement potentiel de valorisation, à partir des deux scénarii établis, concernant les taux de collecte (cf. partie 2.3.1) :

- Scénario 1 : taux de collecte constant de 42% représentant le gisement minimal ;
- Scénario 2 : taux évoluant de 42% à 100% représentant le gisement maximal.

Rappelons que la Directive DEEE 2002/96/CE, relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), a fixé des taux de collecte à 65% en 2015 et à 85% en 2019, des équipements ménagers et professionnels mis sur le marché au cours des précédentes années, suivant deux modes de calcul, définis précédemment [3] [10] [11] [12] (cf. partie 2.3.1). De ce fait, en bornant le taux entre 42% et 100%, une modélisation des valeurs basses et hautes, du gisement potentiel que pourrait avoir à traiter ARTEMISE entre 2022 et 2030, est ainsi possible.

Deux gisements ont été considérés dans cette section :

- 2022 à 2025 : en appliquant les bilans massiques des dispositifs à LED types déchets 2019 (technologies mises sur le marché entre 2013 et 2014, avec une durée de vie moyenne estimée à $4,5 \pm 1,7$ ans) ;
- 2026 à 2030 : en appliquant les bilans massiques des équipements mis sur le marché à partir de 2020 (futurs déchets), avec une durée de vie moyenne de 4,3 ans, selon l'étude européenne [7].

A partir des données estimées par l'analyse des futurs déchets, via la direction générale des douanes françaises et des bilans massiques réalisés, des potentiels de valorisation peuvent être établis, en évaluant les quantités des fractions de matériaux et des composants électroniques (drivers et puces à LED) qui pourraient être valorisées par ARTEMISE.

Notons, par ailleurs, que la valeur marchande de certaines fractions sera déterminée en fonction de leur quantité. En somme, certaines filières ne travaillent qu'avec d'importants tonnages, à partir de plusieurs dizaines, telles que les entreprises Umicore [24] et Morphosis [25], qui valorisent les composants électroniques.

Par voie de conséquence, cette étude du potentiel de valorisation des dispositifs à LED est importante pour l'entreprise ARTEMISE, afin de se positionner pour l'acquisition de la future ligne de traitement industrielle et ainsi maximiser la valorisation des fractions, en fonction des cours des matières premières secondaires.

2.5.1. Bilan matériaux et composants électroniques des lampes à LED

A partir des données de la direction générale des douanes françaises, le gisement prévisionnel annuel de lampes à LED, estimé pour ARTEMISE, est récapitulé dans le Tableau 2-20 et représenté sur la Figure 2-30. Ces estimations sont issues des analyses réalisées dans la partie 2.3.1 en appliquant un taux de collecte constant à 42% et un taux évoluant de 42% à 100%.

Scénario	Gisement lampes à LED	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
1	Douane	1278	1385	1493	1603	1714	1826	1939	2054	2169
	Douane (Pour ARTEMISE)	639	693	747	802	857	913	970	1027	1084
2	Douane	1807	2150	2524	2931	3370	3843	4350	4890	5164
	Douane (Pour ARTEMISE)	904	1075	1262	1466	1685	1922	2175	2445	2582

Tableau 2-20 : Estimation du gisement de lampes à LED pour ARTEMISE (valeurs en tonne)
Taux de collecte constant à 42% et croissant de 42% à 100%

Rappelons que dans le scénario fixant le taux de collecte à 42%, le gisement pour ARTEMISE serait estimé à plus de 1000 tonnes annuelles, à la fin de la décennie, alors qu'il atteindrait 2500-2600 tonnes avec le second scénario. Ces informations sont essentielles pour le dimensionnement de l'outil de traitement industriel, afin qu'il soit fiable et donc rentable économiquement pour l'entreprise.

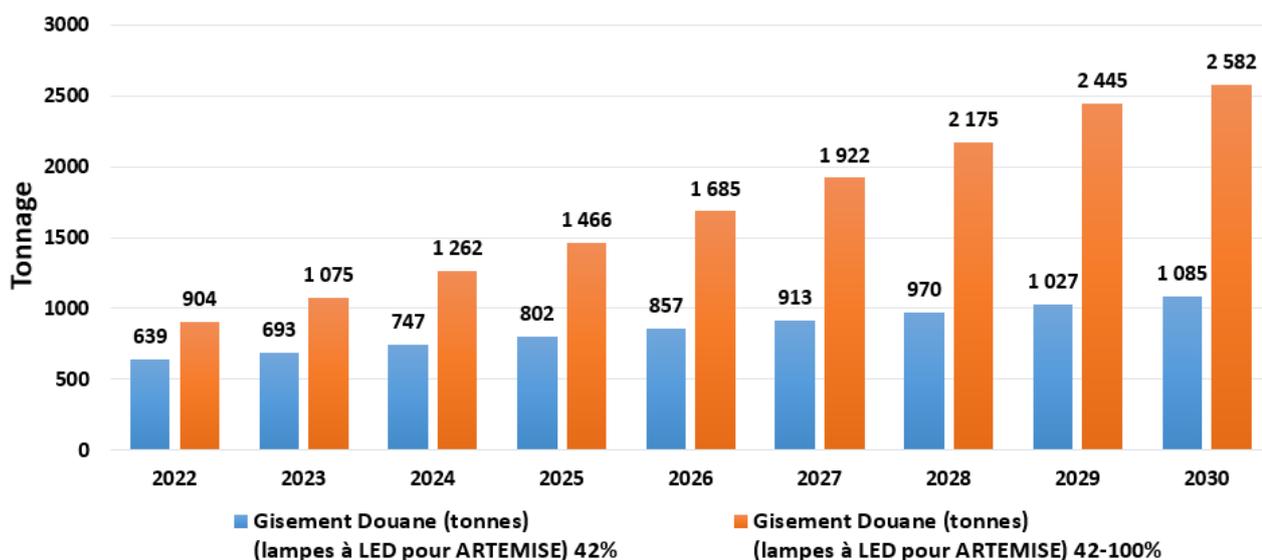


Figure 2-30 : Gisement de lampes à LED pour ARTEMISE
(Taux de collecte constant à 42% et croissant de 42% à 100%)

A partir du gisement annuel de lampes à LED et des bilans massiques réalisés, nous sommes en mesure d'évaluer la répartition des fractions des matériaux constitutifs et des composants

électroniques, pour ARTEMISE, entre 2022 et 2030. La répartition des fractions est présentée dans le Tableau 2-21 et sur la Figure 2-31.

Scénario	Année	Gisement ARTEMISE	Drivers	Puces + support	PC	PBT	Silicone	Acier	Aluminium	Verre
1	2022	639	61	36	62	82	70	21	277	16
	2023	693	73	46	67	88	65	24	261	57
	2024	747	86	57	72	93	58	27	239	103
	2025	802	101	70	77	99	49	29	212	156
	2026	857	116	84	82	105	39	35	178	216
	2027	913	124	89	87	112	41	37	190	230
	2028	970	132	95	93	119	44	40	201	244
	2029	1027	139	101	98	126	46	42	213	259
	2030	1084	147	106	104	133	49	44	225	273
2	2022	904	86	50	88	116	99	30	392	23
	2023	1075	113	71	104	136	100	37	405	88
	2024	1262	145	97	122	158	97	45	405	175
	2025	1466	184	128	141	181	90	54	387	286
	2026	1485	229	165	161	206	76	69	350	424
	2027	1922	261	188	184	235	87	79	399	484
	2028	2175	295	213	208	266	98	89	452	548
	2029	2445	332	240	234	299	111	100	508	616
	2030	2582	350	253	247	316	117	106	536	650

Tableau 2-21 : Gisement ARTEMISE pour les deux scénarii : Matériaux et composants des lampes à LED (valeurs en tonne)

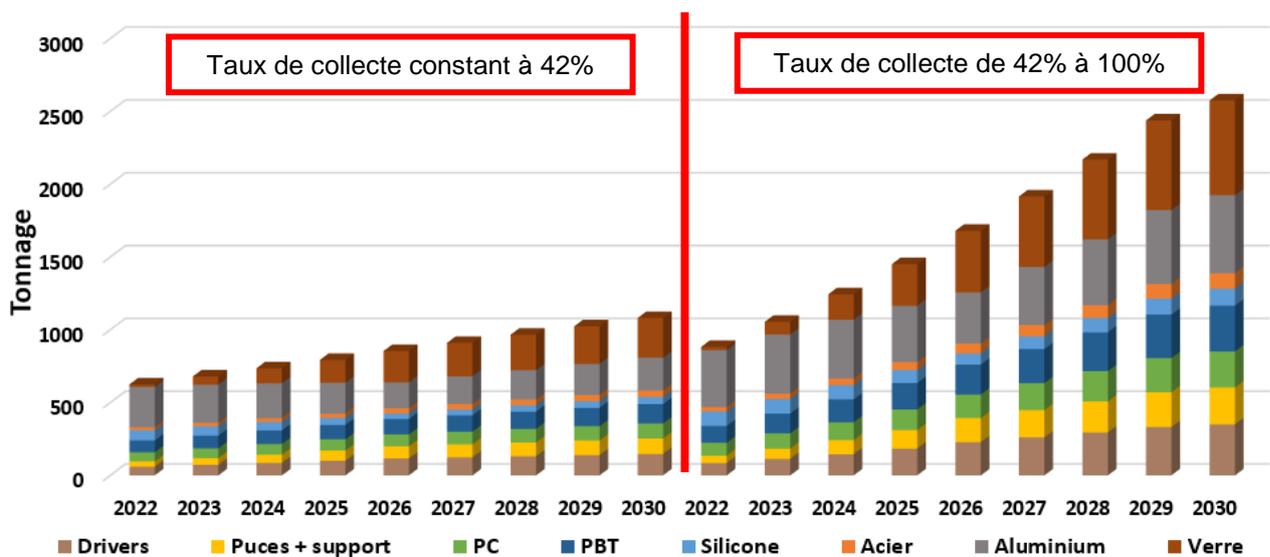


Figure 2-31 : Répartition des fractions de matériaux et composants des lampes à LED, pour les deux scénarii (gisement ARTEMISE)

Le Tableau 2-21 et la Figure 2-31 nous permettent d'en déduire que la société ARTEMISE pourrait ainsi traiter, à partir de 2022, entre 61 et 86 tonnes de drivers et entre 36 et 50 tonnes de supports à LED. A la fin de la décennie, l'entreprise valoriserait entre 147 et 350 tonnes de drivers et entre 106 et 253 tonnes de puces à LED (avec leur support). Ces fractions de composants électroniques sont potentiellement à haute valeur ajoutée.

Si nous considérons l'estimation précédente (drivers et supports à LED), les fractions d'aluminium sont considérables et varieraient entre 277 et 392 tonnes, en 2022, et entre 225 et 536 tonnes, en 2030. Dans le scénario 1, nous constatons que la quantité d'aluminium diminuerait, alors qu'elle augmenterait dans le scénario 2. Cette observation est due à la baisse du taux d'aluminium constituant les lampes à LED, entre les technologies 2013 (43,4%) et 2020 (20,8%) et au taux de collecte constant de 42%. Alors que dans le scénario 2, malgré la baisse du pourcentage d'aluminium, les quantités collectées augmentent. Concernant l'acier, les quantités évolueraient de 21 à 44 tonnes, dans le cas du scénario 1, et de 30 à 106 tonnes, dans le scénario 2.

La fraction du verre augmente de 22,7%, entre 2013 et 2020. Par conséquent, les tonnages évolueraient de 16 à 273 tonnes (scénario 1) et de 23 à 650 tonnes dans le scénario 2. Ces très fortes progressions sont dues, en partie, à l'effet de mode des lampes de décoration vintage.

Une baisse des tonnages de silicone serait constatée, dans le scénario 1, de 70 à 49 tonnes car sa concentration dans les lampes à LED diminue de 11% (technologie 2013) à 4,5% (technologie 2020). Cependant, dans le scénario 2, les quantités augmenteraient légèrement de 99 à 117 tonnes. Comme expliqué précédemment, la faible progression du gisement de silicone est due à l'évolution des drivers des nouvelles lampes à LED, qui chauffent beaucoup moins et qui ont, de ce fait, un besoin moindre d'être isolés dans les corps et les culots des lampes à LED [16]. Cependant, concernant les plastiques PC et PBT, malgré des baisses respectives de 0,2% et 0,6% (bilans massiques), ARTEMISE traiterait potentiellement, en 2022, entre 62 et 88 tonnes de PC et entre 82 et 116 tonnes de PBT. Ces tonnages augmenteraient tout au long la décennie. En 2030, ARTEMISE recyclerait entre 104 et 247 tonnes de PC et entre 133 et 316 tonnes de PBT.

Dans la section suivante, nous analysons le bilan matériaux et composants des tubes et dalles à LED.

2.5.2. Bilan matériaux et composants électroniques des tubes et dalles à LED

De façon similaire aux lampes à LED et en considérant également les données de la direction générale des douanes françaises, le gisement de tubes et dalles à LED pour ARTEMISE est estimé, pour les deux scénarii (cf. partie 2.3.1). Les résultats des projections sont résumés dans le Tableau 2-22 et sur la Figure 2-32.

Scénario	Gisement tubes et dalles à LED	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
1	Douane	728	814	888	963	1039	1115	1191	1267	1344
	Douane (Pour ARTEMISE)	364	407	444	482	520	558	596	634	672
2	Douane	1044	1263	1502	1762	2043	2346	2671	3018	3201
	Douane (Pour ARTEMISE)	522	632	751	881	1022	1173	1336	1509	1601

Tableau 2-22 : Estimation du gisement de tubes et dalles à LED pour ARTEMISE (valeurs en tonne)
Taux de collecte constant à 42% et croissant de 42% à 100%

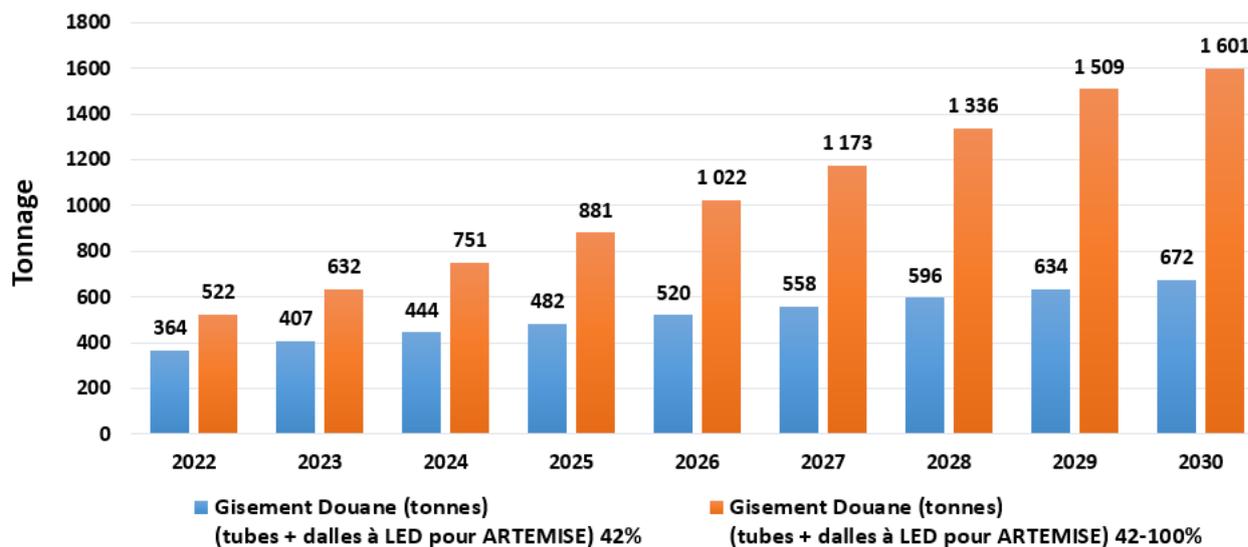


Figure 2-32 : Gisement de tubes et dalles à LED pour ARTEMISE
(Taux de collecte constant à 42% et croissant de 42% à 100%)

A partir des données du gisement annuel et des bilans massiques réalisés sur les tubes et les dalles à LED, en suivant le même modèle que celui des lampes, la répartition des fractions de matériaux constitutifs et de composants électroniques pour ARTEMISE est obtenue, entre 2022 et 2030. Celle-ci est présentée dans le Tableau 2-23 et sur la Figure 2-33.

En analysant ces résultats, nous projetons que l'entreprise pourrait traiter, à partir de 2022, entre 31 et 44 tonnes de drivers et entre 57 et 82 tonnes de bandeaux LEDs. A la fin de la décennie, les fractions des composants diminueraient (6,3% pour les drivers et 14,9% pour les rubans à LED). En conséquence, les quantités valorisables seraient entre 14 et 33 tonnes de drivers et entre 6 et 13 tonnes de supports à LED. Cette baisse s'explique par la maturité des composants électroniques, avec une optimisation de la gestion des matrices LEDs.

Les quantités d'aluminium fluctueraient entre 111 et 159 tonnes en 2022, et entre 308 et 734 en 2030. Dans les deux scénarii, les quantités augmenteraient, contrairement aux lampes à LED, car pour les dalles, l'aluminium permet de rigidifier la structure des dispositifs. Les pourcentages d'acier étant faiblement représentés (1,9% technologie 2013 et 1,4% technologie 2020), les quantités évolueraient de 7 à 9 tonnes, dans le cas du scénario 1, et de 10 à 22 tonnes, dans le scénario 2. La présence des câbles d'alimentation, avec leur gaine, permettrait une valorisation de 6 à 9 tonnes (scénario 1) et de 9 à 22 tonnes (scénario 2). Ces fractions sont très recherchées par les ferrailleurs, telle que l'entreprise CORNEC [21].

La fraction de verre n'est présente que dans les tubes à LED et disparaîtrait dans la technologie des dalles à LED. A terme, ce matériau ne serait donc plus valorisé et à la fin de la décennie il devrait être supplanté par le PC pour la diffusion de la lumière. L'évolution de la fraction de PC est estimée à 20,5%, si bien que les capacités de traitement évolueraient entre 88 et 299 tonnes (scénario 1) et entre 126 et 713 tonnes (scénario 2). Nous constatons également une augmentation dans les fractions de PS et de silicone, respectivement entre 7 à 16 tonnes et entre 11 à 25 tonnes, à la fin de la décennie. Notons que la croissance de la proportion des mousses en silicone [16] est corrélée au fait que la technologie des dalles à LED a besoin de mûrir avant de décrémenter cette fraction, telle que cela a été réalisé sur la technologie de lampes à LED [22]. C'est pourquoi, les mousses isolantes siliconées devraient être supprimées, en fonction de la vitesse de maturité des dalles à LED. Au même titre, le plastique noir devrait également disparaître. Cependant concernant, le PBT, usité pour les boîtiers extérieurs des drivers des dalles à LED, malgré une baisse de 3,6%, dans les analyses massiques, entre les technologies 2013 et 2020, ARTEMISE traiterait potentiellement entre 17 et 25 tonnes en 2022, et entre 8 et 19 tonnes en 2030.

Scénario	Année	Gisement ARTEMISE	Drivers	Bandeaux LEDs	PC	PBT	Plastique Noir	PS	Silicone	Câbles avec gaine	Acier	Aluminium	Verre
1	2022	364	31	57	88	17	1	0	0	6	7	111	43
	2023	407	28	49	119	16	1	1	2	6	7	140	36
	2024	444	23	37	152	13	1	2	4	7	7	169	26
	2025	482	18	22	190	10	0	4	6	7	7	202	14
	2026	520	11	4	231	6	0	5	8	7	7	238	0
	2027	558	12	5	248	7	0	6	9	8	8	256	0
	2028	596	12	5	265	7	0	6	9	8	8	273	0
	2029	634	13	5	282	8	0	6	10	9	9	291	0
	2030	672	14	6	299	8	0	7	11	9	9	308	0
2	2022	522	44	82	126	25	2	0	0	9	10	159	62
	2023	632	43	76	185	24	1	2	3	10	11	217	56
	2024	751	39	62	258	22	1	4	6	11	12	287	45
	2025	881	32	40	347	18	1	7	11	13	13	370	26
	2026	1022	21	8	455	12	0	10	16	14	14	469	0
	2027	1173	24	10	523	14	0	12	19	16	16	538	0
	2028	1336	28	11	595	16	0	13	21	19	19	613	0
	2029	1509	31	12	672	18	0	15	24	21	21	692	0
	2030	1601	33	13	713	19	0	16	25	22	22	734	0

Tableau 2-23 : Gisement ARTEMISE pour les deux scénarii : Matériaux et composants des tubes et dalles à LED (valeurs en tonne)

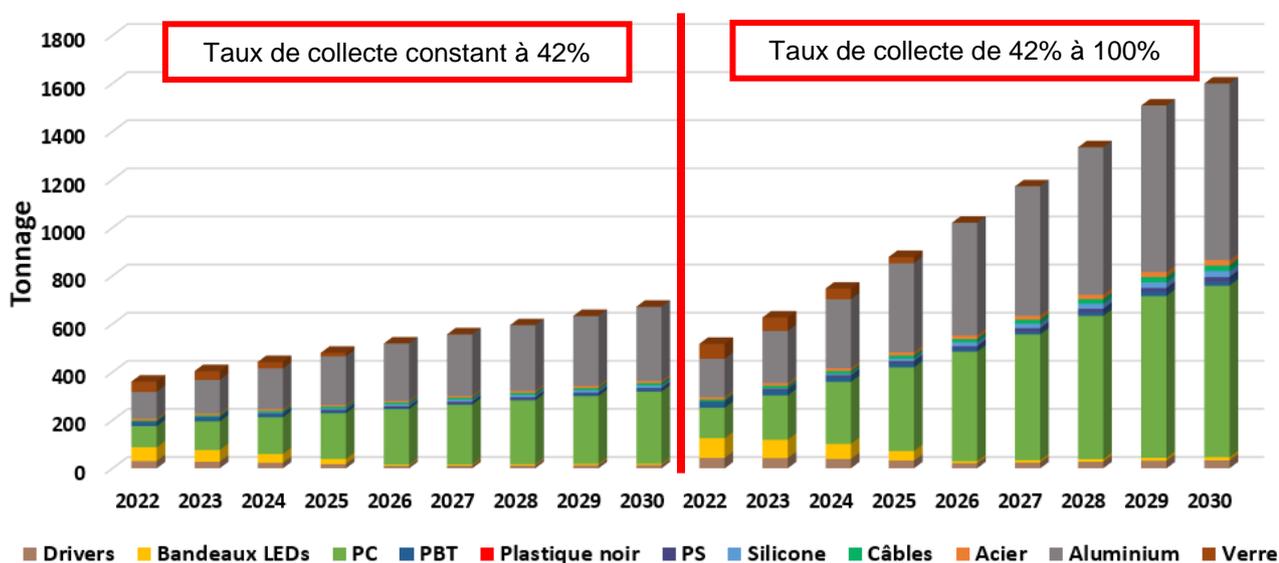


Figure 2-33 : Répartition des fractions de matériaux et composants des tubes et dalles à LED, pour les deux scénarii (gisement ARTEMISE)

Nous avons abordé séparément la répartition des fractions des matériaux constitutifs et des composants électroniques des lampes à LED, puis celle des tubes et dalles à LED. Dans la section suivante, nous allons nous focaliser sur le potentiel global de l'ensemble des dispositifs à LED.

2.5.3. Potentiel de valorisation global

Le gisement total de lampes, tubes et dalles à LED, pour ARTEMISE, dans les deux scénarii est estimé à partir des données de la direction générale des douanes françaises. Ces estimations sont synthétisées dans le Tableau 2-24 et sur la Figure 2-34.

Scénario	Gisement lampes, tubes et dalles	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
1	Douane	2006	2199	2381	2566	2753	2941	3130	3321	3513
	Douane (Pour ARTEMISE)	1003	1100	1191	1283	1377	1471	1565	1661	1757
2	Douane	2851	3413	4026	4693	5413	6189	7021	7908	8365
	Douane (Pour ARTEMISE)	1426	1707	2013	2347	2707	3095	3511	3954	4183

Tableau 2-24 : Estimation du gisement global à LED pour ARTEMISE (valeurs en tonne)
Taux de collecte constant à 42% et croissant de 42% à 100%

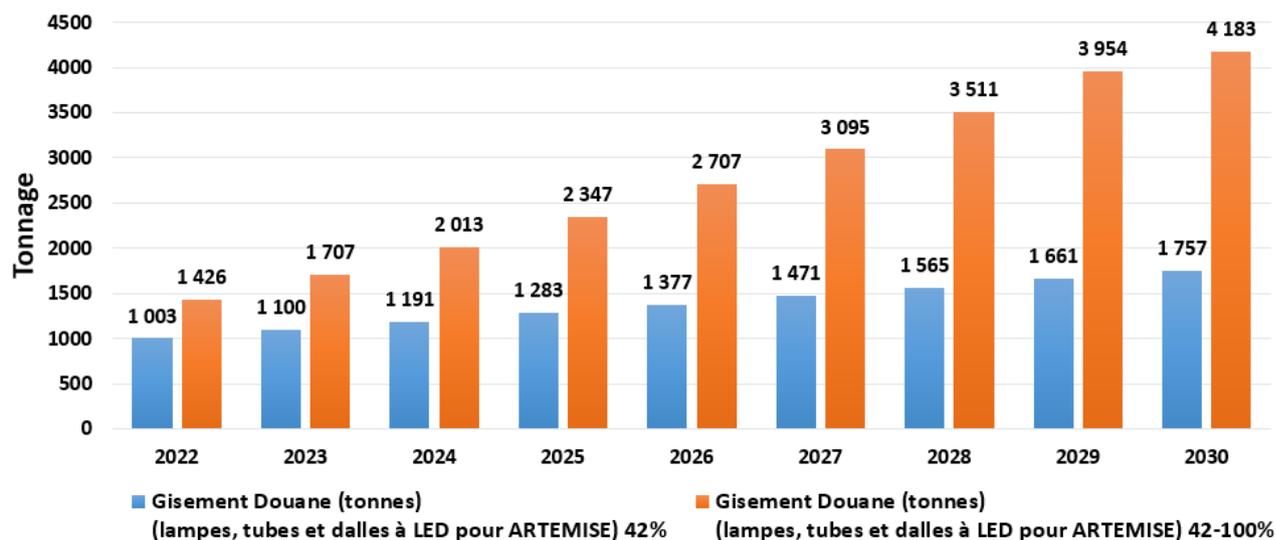


Figure 2-34 : Gisement global à LED pour ARTEMISE
(Taux de collecte constant à 42% et croissant de 42% à 100%)

Dans le cas du scénario 1, le gisement total de LEDs, alloué à ARTEMISE, serait évalué à plus de 1700 tonnes annuelles, à la fin de la décennie, alors qu'il atteindrait plus de 4000 tonnes, selon l'hypothèse du scénario 2.

Dans cette partie, nous considérons les bilans des matériaux et des composants électroniques de l'ensemble des systèmes d'éclairage à technologie LED (lampes, tubes et dalles). Ainsi, nous obtenons un bilan de valorisation global des fractions entre 2022 et 2030, pour les deux scénarii. Celui-ci est récapitulé dans le Tableau 2-25 et sur la Figure 2-35.

Un potentiel de valorisation global relatif aux tonnages totaux est déduit. Ce dernier est déterminé en fonction des prix de rachat des fractions communiqués par l'entreprise CORNEC [21] et validés

par la société ARTEMISE en juillet 2021. L'entreprise ARTEMISE aura ainsi un premier aperçu sur la valorisation des fractions. En conséquence, le dimensionnement des lignes de traitement industrielles des équipements à LED, en fonction des valeurs marchandes des matières premières secondaires [26] [27], sera optimisé afin d'améliorer et pérenniser la rentabilité de la société.

Scénario	Année	Gisement ARTEMISE	Drivers	Puces + support	PC	PBT	Plastique Noir	PS	Silicone	Câbles avec gaine	Acier	Aluminium	Verre
1	2022	1003	91	93	150	99	1	0	70	6	28	388	59
	2023	1100	100	95	186	103	1	1	66	6	31	401	93
	2024	1191	109	94	225	107	1	2	61	7	34	409	130
	2025	1283	118	92	267	109	0	4	55	7	37	414	171
	2026	1377	127	88	313	111	0	5	47	7	42	416	216
	2027	1471	136	94	336	118	0	6	50	8	45	445	230
	2028	1565	144	100	358	126	0	6	53	8	48	475	244
	2029	1661	153	106	380	133	0	6	56	9	51	504	259
	2030	1757	161	112	403	141	0	7	60	9	54	534	273
2	2022	1426	129	132	214	140	2	0	99	9	40	551	85
	2023	1707	156	147	289	160	1	2	103	10	48	622	144
	2024	2013	185	159	380	180	1	4	103	11	57	691	219
	2025	2347	216	168	488	200	1	7	100	13	67	757	312
	2026	2707	250	173	616	218	0	10	92	14	83	819	424
	2027	3095	285	198	706	249	0	12	106	16	95	937	484
	2028	3511	323	224	803	282	0	13	120	19	108	1064	548
	2029	3954	363	252	906	317	0	15	135	21	121	1200	616
	2030	4183	384	266	960	335	0	16	142	22	128	1271	650

Tableau 2-25 : Gisement ARTEMISE global pour les deux scénarii : Matériaux et composants des lampes, tubes et dalles à LED (valeurs en tonne)

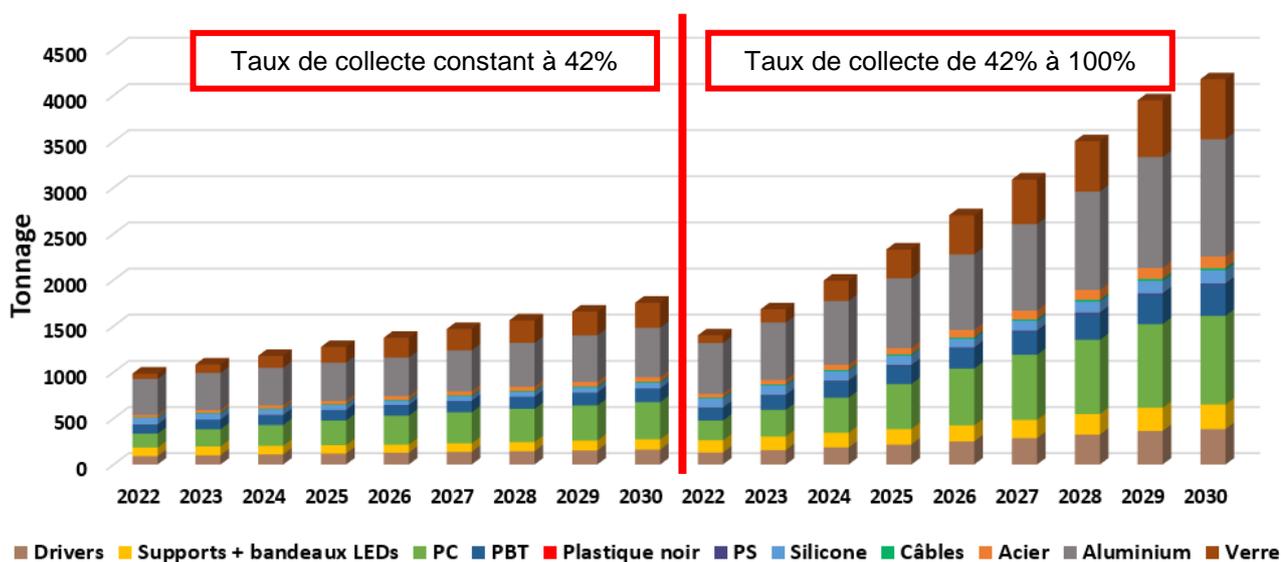


Figure 2-35 : Répartition des fractions de matériaux et composants des lampes, tubes et dalles à LED, pour les deux scénarii (gisement ARTEMISE)

D'après la Figure 2-35, à la fin de la décennie l'aluminium devrait être le matériau le plus abondant avec au minimum 534 tonnes (scénario 1) et au maximum 1271 tonnes (scénario 2). Il serait suivi par le PC avec un gisement compris entre 403 et 960 tonnes, notamment par son utilisation dans les dispositifs dalles à LED, pour une diffusion optimale du flux lumineux.

La fraction de verre serait également importante, avec des quantités comprises entre 273 et 650 tonnes. Ce matériau est usité dans les systèmes optiques des lampes à puces LEDs à filaments. Rappelons que ces dernières seront valorisées dans la ligne de traitement actuelle des lampes fluo-compactes de l'entreprise ARTEMISE. En somme, elles pourraient être traitées dans la future ligne industrielle des lampes à LED métalliques et plastiques, seulement si nous considérons l'aspect abrasif du verre qui a tendance à fortement détériorer les systèmes mécaniques de types poulies et roulements des convoyeurs.

Les composants électroniques (drivers et puces à LED avec leur support), constituant la valeur ajoutée des dispositifs à LED, varieraient entre 273 et 650 tonnes. Ces quantités sont non négligeables, malgré la maîtrise des matériaux semi-conducteurs qui induirait un besoin moindre de puces à LED pour des performances équivalentes. Etant donné leur richesse en métaux précieux et terres rares [28] [29] [30] [31] [32] (or, argent, palladium, gallium et indium), l'unité de traitement industrielle devra être en mesure de récupérer ces composants et de préserver leur intégrité physique, pour les valoriser en minimisant les pertes. Cet aspect sera abordé dans le chapitre 3.

Le gisement de PBT serait compris entre 141 et 335 tonnes. Cette matrice plastique est utilisée dans les culots des lampes, spots et tubes, dans les corps des lampes et spots mais également dans les boîtiers de protection des drivers des dalles à LED.

Les quantités de silicone et d'acier seraient comprises respectivement entre 60 et 142 tonnes et entre 54 et 128 tonnes. Les fractions estimées des mousses diélectriques siliconées, répartitrices de chaleur, sont dues à la nécessité de maturité de la technologie des dalles à LED [22], au cours de la décennie, avant de décrétement potentiellement leurs fractions.

Les câbles d'alimentation seraient faiblement quantifiés entre 9 et 22 tonnes, malgré l'intérêt que leur portent les entreprises de recyclage [21].

Le PS varierait entre 7 et 16 tonnes. Il est usité dans les systèmes optiques des dalles, en remplacement des tubes à LED, en support au PC pour une diffusion homogène de la lumière. Les matrices en plastique noir enrobant les drivers, quant à elles, décroîtraient et ne seraient plus utilisées dans les dispositifs à LED. La composition des matrices plastiques est étudiée dans le cadre de cette thèse, afin de déterminer la teneur en retardateurs de flamme bromés (en moyenne 7,98%, soit 79 800 ppm, cf. chapitre 4). Ainsi, nous pourrions évaluer les taux de valorisation matière, en respectant le taux réglementaire.

A partir de ces fractions de matériaux et de composants électroniques constituant les systèmes d'éclairage à technologie LED et en fonction de la valeur boursière des matériaux, ARTEMISE pourra spéculer, auprès des entreprises valorisant les matières premières secondaires.

Le Tableau 2-26 présente la valeur marchande des matériaux et composants issue du recyclage entre janvier et juillet 2021. Ces données nous ont été communiquées par l'entreprise CORNEC [21] (spécialisée dans le recyclage des DEEE).

Le potentiel de valorisation global annuel des dispositifs à LED a été évalué pour ARTEMISE pour l'année 2022. Celui-ci est compris entre 285 k€ (scénario 1) et 403 k€ (scénario 2). Cette analyse est basée sur les prix des fractions de juillet 2021. La faible fluctuation des prix des matériaux métalliques (câbles 10%, acier 0% et aluminium 17%), observée sur les 6 premiers mois de l'année 2021, renforce la fiabilité de cette estimation.

Par ailleurs, le chiffrage de la ligne de traitement industriel (présentée dans le chapitre 4), par l'entreprise IMPULSTEC, s'élève à 1,5 M€. En supposant que le cours des fractions resterait stable dans la première moitié de la décennie, ARTEMISE amortirait son outil de traitement à partir de 2026 (scénario 1) et 2024 (scénario 2). Dans le cas du scénario 2, les quantités ainsi que le taux de collecte devraient augmenter, par conséquent, le retour sur investissement se ferait sur une plus courte période.

Fraction	Prix €/tonne [21]		Valorisation k€ en 2022	
	Janvier 2021	Juillet 2021	Scénario 1	Scénario 2
Drivers	450	450	41	58
Puces avec support	450	450	42	60
PC ou PS	65	65	10	14
PBT ou plastique noir ou silicone	-540	-540	-91	-129
Câbles + gaine	900	1000	6	9
Acier	100	100	3	4
Aluminium	600	700	272	385
Verre	27	27	2	2
Total	-	-	285	403

Tableau 2-26 : Prix des fractions en janvier, juillet 2021 et leur valorisation en 2022

Nous constatons que l'accroissement des quantités d'aluminium, durant la décennie, est très favorable à la pérennité économique de l'entreprise. Les tonnages élevés estimés vont favoriser les négociations avec les spécialistes du recyclage.

Les composants électroniques ont un fort potentiel de valorisation financière, notamment grâce à la raréfaction des métaux stratégiques et des contraintes géopolitiques mondiales qui sont renforcées par la crise sanitaire de la COVID-19 [28] [29] [30] [31] [32].

Les puces à LED seront valorisées, compte tenu de la richesse en métaux précieux et terres rares stratégiques qu'elles contiennent. Cependant le marché étant inexistant aujourd'hui, les recycleurs estiment leur valeur en seconde vie, au moins équivalente à celle des drivers. Des recherches académiques sont actuellement menées dans le cadre de la Chaire Mines Urbaines [31] soutenue par ECOSYSTEM [3] et encouragée par les politiques nationale et européenne [33] [34]. L'objectif est de favoriser l'économie circulaire pour permettre le développement d'une croissance durable et innovante, ainsi que la sécurisation des approvisionnements en matières premières. Ces recherches visent à développer de nouvelles filières destinées à produire des matières premières secondaires, à partir du recyclage des puces à LED, issues des systèmes d'éclairage et des DEEE, à des fins de substitution de la matière vierge.

Les matières premières recyclées doivent répondre aux attentes des fabricants en termes de prix, de qualité, d'environnement et aux problématiques sociétales [31]. Le développement du marché de valorisation des puces à LED est, de ce fait, émergent et serait optimisé, à une échelle industrielle, à partir de la seconde moitié de la décennie. Si bien que, l'entreprise ARTEMISE devra stocker l'ensemble des puces à LED récupérées, afin de spéculer sur les cours des matières recyclées et de les vendre au meilleur prix, au moment opportun. Ainsi, les bénéfices des recherches entreprises, dans le cadre de la thèse, ne seront pas immédiats mais seront appréciés à moyen terme.

Rappelons également que les matrices plastiques contenant des retardateurs de flamme bromés (RFBs) sont incinérées en tant que déchets dangereux. Le coût de leur traitement s'élève à hauteur de 540 € la tonne, sans possibilité de récupération d'énergie [17] [18]. Elles constituent une charge et donc des pertes financières pour la société ARTEMISE. Pour remédier à cette situation, il est

nécessaire d'identifier et de proposer une voie de valorisation de l'ensemble des plastiques par élimination des RFBs. Cet aspect est traité dans le chapitre 4, dédié à l'analyse des flux de matières.

2.6. Conclusion

Le gisement des systèmes d'éclairage à technologie LED en fin de cycle de vie est en forte augmentation depuis 2016. Aujourd'hui, au sein de l'entreprise ARTEMISE huit big-bags, de lampes et spots, sont triés en moyenne par semaine. Cette tendance devrait augmenter avec une prédominance des systèmes d'éclairage traditionnels durant la première moitié de la décennie, jusqu'en 2025, pour ensuite s'inverser en faveur des systèmes d'éclairage à LED, durant la seconde moitié. La caractérisation du gisement nous a permis d'identifier les principaux modèles qui sont les lampes E27, E14 et B22 ainsi que les spots GU10 et GU5.3. Trois typologies (E27, E14 et GU10) constituent la majorité du gisement total (88-92%) [2]. Ce qui minimisera le besoin de tri. Par ailleurs, ce constat va orienter les études qui seront entreprises dans le chapitre suivant, concernant les expérimentations réalisées avec l'outil SELFRAG Lab, en mode batch à l'échelle laboratoire.

Comme déjà expliqué, aujourd'hui ces dispositifs sont collectés par l'éco-organisme ECOSYSTEM puis triés et seulement stockés dans les usines, telle que l'entreprise ARTEMISE, en attendant de trouver des solutions technologiques de traitement (étudiées dans le chapitre 3). Ceci permettra de les valoriser en fin de vie, dans une approche d'économie circulaire. Au début de la thèse, nous avons une interrogation relative au potentiel de valorisation des dispositifs à LED. L'étude du gisement ainsi réalisée, nous a permis d'apprécier cet aspect en se projetant jusqu'à la fin de la décennie. Nous avons abouti à un gisement potentiel, de matériaux et de composants électroniques, évalué pour ARTEMISE, en tenant compte de la revente des fractions et des fluctuations sur les 6 premiers mois de l'année 2021. Dès lors, l'outil de traitement industriel a pu être caractérisé en fonction de la diversité et de la richesse du gisement.

A ce stade de nos recherches et analyses, le développement des solutions finales de traitement des systèmes d'éclairage à technologie LED, au sein de l'usine ARTEMISE, devra être dimensionné et optimisé pour traiter en 2030 un gisement annuel maximal, pour les lampes et spots à LED, évalué à 2600 tonnes, soit un débit horaire de 650 kg/h. Concernant les tubes, le tonnage annuel maximal est estimé à 1600 tonnes, soit un débit horaire de 400 kg/h. L'investissement dans l'outil industriel se fera d'une part en fonction des quantités qui seront disponibles et d'autre part en fonction de la capacité de la machine à valoriser les produits. Ces données sont indispensables pour le choix des technologies qui seront identifiées puis adaptées, afin de traiter la fin de vie de l'ensemble du gisement des dispositifs à LED.

L'outil devra être orienté pour permettre à l'entreprise d'optimiser le traitement des fractions de métaux à haute valeur ajoutée [26] [27], ceci pour accroître son bilan économique en minimisant les pertes matières. La valorisation des puces à LED est actuellement étudiée, afin de maximiser l'optimisation du recyclage des métaux précieux et des terres rares stratégiques usités. Ces matériaux constituent un gisement complexe, dispersé et hétérogène, dont la qualité et la quantité évoluent au rythme des avancées technologiques et des contraintes géopolitiques mondiales [28] [31].

Cette analyse, des gisements potentiels des dispositifs à LED que devraient traiter ARTEMISE jusqu'en 2030, nous conduit à étudier les techniques de déconstruction des systèmes d'éclairage à LED dans le chapitre suivant.

Références bibliographiques

- [1] Gilles Lerondel, Anna Romyantseva, Christophe Couteau et Youcef Bouzidi, « Recyclage de lampes à LED », Descriptif détaillé du projet RECYLED, 2017
- [2] Mizanur Rahman, S.M., Kim J., Lerondel G., Bouzidi Y., Clerget L., 2019. Value Retention Options in Circular Economy: Issues and Challenges of LED Lamp Preprocessing. *Sustainability* 11 (17), 4723. <https://doi.org/10.3390/su11174723>
- [3] Xavier Lantoinette et Romain Lesage, « Tri et traitement des lampes LED », Appel à projet, RECYLUM, 4 décembre 2017
- [4] La technologie COG, « <https://zoneled.fr/ampouleledfilamente27/> », L'ampoule LED à filaments, 17 mai 2021
- [5] Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants (POP). Les 9 Nouveaux POP. 2010
- [6] Kumar A., Kuppusamy V.K., Holuszko M., Song S., Loschiavo A., 2019. LED lamps waste in Canada: Generation and characterization. *Resources, Conservation & Recycling* 146 (2019) 329-336. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.04.006>
- [7] Lang R., Zataari R., Blumenthal K., Wirthmann A., Magpantay E., Gray V., Teltscher S., Bourassa F., De Panizza A., Fondeur S., Fredriksson T., Korke D., Faye M., Kern M., Baldé K., Huisman J., Kuehr R., E-waste statistics Guidelines on classification, reporting and indicators 2015. United Nations University (UNU), Institute for the Advanced Study of Sustainability (IAS)
- [8] Otmar Deubzer et al. « Recycling of Critical Resources from LED Products », Proceedings of EcoDesign 2015 International Symposium, 9th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 2-4 December, Tokyo, Japan, 2015
- [9] Le chiffre du commerce extérieur. Direction générale des douanes et des droits indirects « http://lekiosque.finances.gouv.fr/site_fr/NC8/Resultat_nc.asp?lanc=85395000 », nomenclature NC8 85395000 : lampes et tubes à diodes émettrices de lumière (DEL), 03 juin 2021
- [10] Nouveaux objectifs de collecte et de recyclage pour la filière DEEE « https://www.actu-environnement.com/ae/news/bilan_DEEE_recyclage_objectifs_directive_9653.php4 », 30 juin 2021
- [11] Directive 2002/96/CE du parlement européen et du conseil du 27 janvier 2003 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), Journal officiel de l'Union européenne
- [12] ECOSYSTEM, rapport d'activités 2017 « <https://www.ecosystem.eco/fr/article/rapports-annuels-activites> », 21 juin 2019
- [13] ADEME, Erwann Fangeat. In Extenso Innovation Croissance, Alice Deprouw, Marion Jover, Mathilde Borie, Océane Tonsart. 2020. Rapport annuel du registre des déchets d'équipements électriques et électroniques. Ouvrage disponible en ligne « www.ademe.fr/mediatheque. »
- [14] LEROY MERLIN, magasin de bricolage « <https://www.leroymerlin.fr/> », 22 juin 2021
- [15] Abhishek Kumar Awasthi, Gabriel Ionut Zlamparet, Xianlai Zeng and Jinhui Li. Evaluating waste printed circuit boards recycling: Opportunities and challenges, a mini review. *Waste Management & Research* 2017, Vol. 35(4) 346-356. <https://doi.org/10.1177/0734242X16682607>
- [16] Dzombak, R.; Padon, J.; Salisbury, J.; Dillon, H. Assessment of end-of-life design in solid-state lighting. *Environmental Research Letters*. 2017, 12, 084013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa7ab1>

- [17] Marianne Fleury, Arnaud Parenty, Thomas Etien, Magali Palluau et Charlotte Hugrel. Webinar de l'étude « RECYCLAGE CHIMIQUE DES PLASTIQUES - Application aux plastiques issus des DEEE » menée par les cabinets Bleu Safran, Lavoisier Circular Transition et Procetech pour ECOSYSTEM, 18 juin 2021
- [18] Flore Rebischung, Marianne Fleury et François David. Rapport INERIS-DRC-17- 164547-01461C « Tri et classement des plastiques des Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques », octobre 2017
- [19] Cooper, Daniel.R.; Gutowski, Timothy.G. The environmental impacts of reuse: A review. *Journal of Industrial Ecology*. 2015, 21, 38-56. <https://doi.org/10.1111/jiec.12388>
- [20] Reike, D.; Vermeulen, W.J.; Witjes, S. The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options. *Resour. Conserv. Recycl.* 2018, 135, 246-264. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.027>
- [21] CORNEC, industriel disposant d'un broyeur à marteau type BECKER 500 chevaux, spécialisé dans la valorisation des métaux ferreux et non ferreux et dans le recyclage des DEEE, 18 rue Jacquard 77400 Lagny-sur Marne (France). Tél : +33 (0)1 64 02 29 10
- [22] Angel Barroso, « Optimisation des systèmes d'éclairage des bâtiments de l'Université Paul Sabatier basé sur un réseau novateur de type bus continu/basse tension ». Thèse de doctorat, soutenue le 13 janvier 2017 à l'Université de Toulouse 3 Paul Sabatier
- [23] Narendran, N.; Bullough, J.D.; Maliyagoda, N.; Bierman, A. What is useful life for white light LEDs ? *Journal of the Illuminating Engineering Society*. 2001, 30 :1, 57-67. <https://doi.org/10.1080/00994480.2001.10748334>
- [24] Umicore, acteur mondial de la technologie des matériaux par recyclage des cartes électroniques des DEEE « <https://www.umicore.fr/fr/> », 01 juillet 2021
- [25] Morphosis, leader de l'extraction et l'affinage des métaux rares et précieux issus principalement des équipements électriques et électroniques en Europe « <https://www.morphosis.fr/page/accueil.html> », 01 juillet 2021
- [26] Buchert, M.; Manhart, A.; Bleher, D.; Pingel, D. Recycling critical raw materials from waste electronic equipment. *Freibg. Öko-Inst. eV* 2012, 49, 30-40
- [27] Chancerel, P.; Meskers, C.E.; Hagelüken, C.; Rotter, V.S. Assessment of precious metal flows during preprocessing of waste electrical and electronic equipment. *J. Ind. Ecol.* 2009, 13, 791-810. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2009.00171.x>
- [28] Lim, S.R.; Kang, D.; Ogunseitan, O.A.; Schoenung, J.M. Potential environmental impacts from the metals in incandescent, compact fluorescent lamp (CFL), and light-emitting diode (LED) bulbs. *Environ. Sci. Technol.* 2012, 47, 1040-1047. <https://doi.org/10.1021/es302886m>
- [29] Pilotto Cenci, M., Christ Dal Berto, F., Schneider, E-L., Veit, H-M., 2020. Assessment of LED lamps components and materials for a recycling perspective. *Waste Management* 107 (2020) 285-293. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.028>
- [30] Pilotto Cenci, M., Christ Dal Berto, F., Silva Silveira Camargo, P., Veit, H-M., 2021. Separation and concentration of valuable and critical materials from wasted LEDs by physical processes. *Waste Management* 120 (2021) 136-145. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.11.023>
- [31] Chaire Mines Urbaines. « <http://mines-urbaines.eu/fr/la-recherche/missions-et-objectifs/metaux-strategiques/> », Métaux stratégiques : développement de nouvelles technologies à haute valeur ajoutée, 04 juillet 2021
- [32] Mizanur Rahman, S.M., Bertrand Laratte, Stéphane Pompidou, Thècle Alix, 2021. Waste LED lamp characterization: A call for more consistent and well-documented study. doi: 10.20944/preprints202107.0427.v1

[33] Lighting Europe - The voice of the lighting Industry. « <https://www.lightingeurope.org/news-publications/position-papers> », 04 juillet 2021

[34] KIC EIT Raw Materials, commission européenne de recherche et développement « <https://eitrawmaterials.eu/> », 11 mai 2021

CHAPITRE 3

Techniques de déconstruction des dispositifs LEDs

3.1. Introduction

De nos jours, les développements économique et durable sont intimement liés. L'économie circulaire apparaît comme l'un des vecteurs de la croissance future de notre société. Elle exige de chacun des acteurs, qu'il soit un particulier ou une entreprise, de réconcilier croissance et environnement par une réutilisation intelligente, économique et propre des matériaux, et ce, en préservant les ressources naturelles et en limitant la consommation de matières premières, d'énergie et d'eau. Cette démarche exige de dépasser les politiques conventionnelles de gestion des déchets, pour nous placer dans une nouvelle exigence : celle de la valorisation produit et matière. Ce double défi nécessite de dé-complexifier les produits pour autoriser, in fine, leur valorisation par une réutilisation de certaines parties, tels que les composants électroniques, et par un recyclage des matériaux en matière première secondaire.

Pour répondre au scénario III²³, nous avons pensé au désassemblage manuel des dispositifs à LED. Cette voie n'étant pas viable économiquement, étant donné le coût prohibitif de la main d'œuvre, a donc été abandonnée [1]. Nous avons ensuite envisagé l'utilisation d'un broyeur conventionnel spécifique aux DEEE, comme le propose l'entreprise UNTHA, spécialisée dans la fabrication de broyeurs industriels, tel que le broyeur RS50-100 [2]. En plus d'être énergivore, l'inconvénient majeur de cette technologie est qu'elle ne permet pas de préserver l'intégrité des composants électroniques, puisque tous les éléments constitutifs sont déchiquetés à différentes granulométries. Cette technologie est, par contre, adaptée dans le cadre du scénario II de broyage et de déchiquetage (cf. partie 1.3.2). Notre réflexion s'est alors portée sur des technologies plus appropriées, afin de récupérer des composants électroniques intègres, pour pouvoir les réutiliser et/ou les valoriser, auprès des entreprises de recyclage, telles que Umicore [3] et/ou Morphosis [4].

Pour les lampes et les spots à LED, nous avons identifié la technologie de fragmentation par les hautes tensions (High Voltage Fragmentation Technology : HVFT), issue de l'industrie minière [5] [6] [7] [8]. Dans le cas des tubes à LED, un démontage purement mécanique et automatisé a été retenu, à partir d'une machine de découpe et de broyage des tubes fluorescents, disponible chez ARTEMISE, qui semble plus simple à mettre en œuvre.

Avec la technologie de fragmentation par les hautes tensions, nous utilisons une solution de récupération, de dépollution et de valorisation des déchets en exploitant uniquement le phénomène physique, représenté par un arc électrique et son onde de choc. L'électricité est au service du recyclage avec des électrons par milliers pour séparer les constituants élémentaires de nos lampes et spots à LED, sans aucun apport en produit chimique. Cette technologie permet de séparer les éléments au niveau des joints inter-matériaux. La démarche, qui relève de la responsabilité de toute entité, s'inscrit dans celle plus globale d'une gestion durable et s'accompagne indéniablement d'un gain en termes de compétitivité et de préservation de nos ressources naturelles. Cette technologie par les hautes tensions permet de faire le pari d'un avenir serein pour les générations à venir et de concilier les impératifs économiques, environnementaux, techniques, réglementaires et sociétaux.

3.2. Utilisations actuelles de la technologie de fragmentation par les hautes tensions

Cette technologie apporte aux industriels des solutions de séparation des matériaux en leur permettant de recycler et de valoriser leurs sous-produits ou déchets de production. Différents essais ont été réalisés dans ce sens.

²³ Le désassemblage des lampes et des tubes à LED, pour la réutilisation des composants électroniques notamment des puces à LED.

Ceux de la société XCRUSHER ont été menés avec succès dans plusieurs domaines, tels que l'extraction des diamants de la kimberlite, la séparation du verre et du plastique issus des pare-brises automobiles, la séparation des métaux et des plastiques provenant des circuits électroniques, la séparation de l'acier et du béton, la récupération d'or et d'autres métaux à partir de minerais, la récupération de fibres de carbone à partir des chutes d'ailes d'avions AIRBUS A380, la fragmentation sélective de smartphones, la séparation et le recyclage des produits bitumineux d'étanchéité des bâtiments, etc [9] [10].

IMPULSTEC a expérimenté le recyclage des panneaux solaires photovoltaïques [11] [12], des téléphones portables, des cartes mères d'ordinateurs et de téléviseurs, des batteries lithium-ion et des pommeaux de douches en acier inoxydable [13].

SELFrag a étudié la fragmentation des roches [8], la récupération des métaux précieux des cartes mères [14], des métaux dans les minerais [15] [16] et le recyclage des panneaux solaires photovoltaïques [17].

Le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), disposant d'une machine laboratoire : le SELFRAG Lab, a également engagé des campagnes d'essais sur l'extraction de fibres métalliques des bétons armés [5], le recyclage du ciment et des granulats issus du béton armé [6] et la récupération de l'or, du cuivre et du fer dans les minerais [7].

La technologie de fragmentation par les hautes tensions est communément appelée fragmentation électrodynamique (SELFrag [5] [6] [7]), mais également sous de nombreuses autres appellations : high voltage breakage [8], technologie des puissances pulsées (XCRUSHER [9]), fragmentation électrohydraulique (IMPULSTEC [11] [12]), high voltage pulse power technology [15], désintégration électrique (electrical disintegration) [18], high voltage electrical pulses breakage [19], electrical pulses [20], etc.

Elle repose sur le principe de la restitution d'une énergie électrique dans un temps très bref (quelques nanosecondes), pour obtenir des puissances de l'ordre du MégaWatt. Cette puissance est convertie en une énergie mécanique sous la forme d'ondes de choc sonore et subsonique, d'une avalanche électronique et d'un champ électromagnétique, qui appliqués aux produits à traiter permettent une séparation en constituants élémentaires [9].

Cette technologie, de traitement en fin de cycle des produits, présente de nombreux avantages par rapport aux technologies traditionnelles chimiques ou de broyage :

- Absence de contact, ce qui évite l'utilisation de pièces mécaniques mobiles (cas des broyeurs mécaniques), de boulets, barres ou autres pièces d'usures (broyeurs à boulets, barres, cônes). La technologie est donc très économe en coût de maintenance car elle préserve l'outillage [9] [21] ;
- Respectueuse de l'environnement, puisqu'elle ne nécessite aucun additif chimique hautement toxique ni aucun réactif inorganique, qui sont généralement nécessaires pour le traitement des minerais [9] ;
- La libération, la fragmentation, la séparation ainsi que la pulvérisation se produisent dans des temps très brefs grâce au temps de commutation des éclateurs. Ces derniers déclenchent la décharge des condensateurs et permettent donc de restituer l'énergie stockée rapidement (puissances pulsées très élevées), dans le réacteur contenant les produits à traiter et/ou à valoriser. Ceci pour une consommation énergétique très faible [9] [15] ;
- Absence de fumées néfastes et de produits polluants [15] [21] ;
- Taux de récupération élevé et conservation des propriétés des matériaux récupérés [9] ;
- Meilleure maîtrise du concassage sélectif des matériaux avec une meilleure récupération des métaux précieux et stratégiques (Cu, Ag, Pb, Sn et Al) [21].

Pour des applications industrielles, les processus physiques et chimiques générés par les décharges électriques dans l'eau présentent plusieurs intérêts majeurs :

- L'eau soumise à des champs électriques très élevés peuvent agir sur des cellules ou des micro-organismes (stérilisation du milieu) [21] ;
- Les décharges streamers, qui se développent dans l'eau, émettent à la fois des rayonnements UV et des ondes de choc [21] ;
- Des électrons énergétiques sont créés, favorisant l'ionisation, la dissociation et l'excitation des molécules d'eau. Il se forme ainsi des radicaux très réactifs (O, OH, H, etc.). A plus long terme, ces radicaux se recombineront pour former des molécules oxydantes (O_3 , H_2O_2) et/ou réagissant avec les molécules présentes [21].

Cette technologie peut s'appliquer à différents domaines, en fonction des processus physiques mis en jeu : les champs électriques pulsés, les décharges streamers et les arcs électriques [21]. Dans la section suivante, nous allons expliquer le principe de la technologie de fragmentation par les puissances pulsées.

3.3. Principe de la technologie de fragmentation par les hautes tensions

3.3.1. Champs Electriques Pulsés (CEP)

L'utilisation des champs électriques est particulièrement présente dans l'industrie agroalimentaire. Les premiers travaux sur les champs électriques pulsés (CEP) ont été réellement développés, dans les années 1960 [22] [23]. Les deux applications principales sont :

- L'extraction de composés intercellulaires à partir de cellules végétales [24] : un champ électrique produit une polarisation de la membrane de la cellule se comportant à l'instar d'un condensateur. Une accumulation de charges de part et d'autre de la membrane est générée, créant un potentiel transmembranaire V_m . Si sa valeur est supérieure aux caractéristiques diélectriques de la membrane, celle-ci est perforée avec apparition de pores. Ces derniers ainsi formés sont soit réversibles soit irréversibles, selon l'intensité et la durée du champ électrique appliqué [21] ;
- La réduction microbienne des aliments : les champs électriques pulsés peuvent également agir sur le contenu intercellulaire. Les cellules traitées mettent en exergue un détachement de la membrane cellulaire par rapport à la paroi, ainsi qu'une désorganisation du contenu intercellulaire [25].

3.3.2. Décharge dans l'eau : streamer

La génération des streamers dans un liquide peut générer à leur extrémité des champs électriques très élevés, des électrons de haute énergie, de l'ozone, d'autres espèces chimiquement actives et des rayons ultraviolets [26] [27]. Ces éléments peuvent être utilisés pour stériliser des micro-organismes et/ou décomposer les molécules et les matériaux [21].

Des effets physiques et chimiques sont observés lorsque le streamer est généré directement dans l'eau. La Figure 3-1 illustre les phénomènes observés [28] :

- Pendant le temps écoulé entre l'application de la tension et l'apparition de l'impulsion de courant, le liquide est soumis à un champ électrique très élevé qui peut détruire les micro-organismes et ainsi induire la stérilisation du milieu ;
- Une impulsion de courant corrélée à une impulsion de lumière émise (de l'UV au visible) et à des ondes de choc ;
- Des électrons énergétiques produisent l'ionisation, la dissociation et l'excitation des molécules d'eau. Il se forme ainsi des radicaux très réactifs : O, OH, H, H₂O, etc ;
- A plus long terme, les radicaux se recombinent pour former des molécules oxydantes (H₂O₂ par exemple) et/ou réagissant sur les molécules présentes.

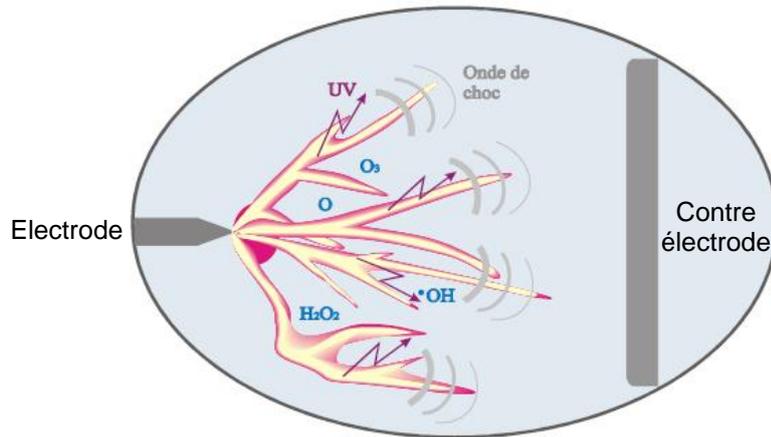


Figure 3-1 : Illustration des différents effets produits par une décharge « streamer » dans l'eau [28]

- **Processus physique** : Lors de la propagation du streamer dans l'eau, une partie importante de l'énergie fournie est consommée pour former les canaux gazeux. Ces canaux, de forme ramifiée, émettent de la lumière, puis vont subir un phénomène de cavitation (phase d'expansion et de contraction) pendant laquelle les espèces primaires (O, OH, H, H₂O), formées, dans les canaux par impacts d'électrons, vont réagir [28].
- **Processus chimique** : Différents processus, se produisant dans la décharge, peuvent se classer en fonction des différents types de collision possibles. Le Tableau 3-1 synthétise les processus chimiques.

Processus chimique	Ordre d'énergie (eV)
Elastique	Très faible
Excitation rotationnelle et vibrationnelle	0,1-1
Excitation	1-10
Dissociation	>5
Ionisation	>10

Tableau 3-1 : Energie des processus électroniques [28]

Lors d'une décharge dans l'eau, en utilisant une impulsion de tension très brève, l'étude de Sun [26] a montré que l'énergie moyenne des électrons du streamer est de l'ordre de 5-20 eV. Cela corrobore l'existence de tous les processus chimiques, ci-dessus.

Nous allons nous intéresser aux résultats portant sur l'influence de la durée d'application de la tension sur le niveau de la tension de claquage, dans un milieu diélectrique liquide. La Figure 3-2 montre la variation de la tension de claquage en fonction du temps dans l'eau [29]. La tension, en champ homogène (distance inter-électrodes de 1 cm), varie de quelques kilovolts à plusieurs centaines de kilovolts, lorsque la tension évolue de quelques microsecondes à 100 ns. Par conséquent, il apparaît deux pentes représentant deux modes de décharge bien distincts dont la frontière se situe autour de la microseconde [21] :

- En décharge subsonique ou « lente », la durée d'application de l'onde de tension est supérieure à la microseconde, la vitesse de propagation est de l'ordre de la dizaine de m/s et la tension de claquage est relativement faible.
- En décharge supersonique ou « rapide », la durée d'application de l'onde est inférieure à la microseconde et la vitesse de propagation est de l'ordre de la dizaine de km/s, associée à une tension de claquage très élevée.

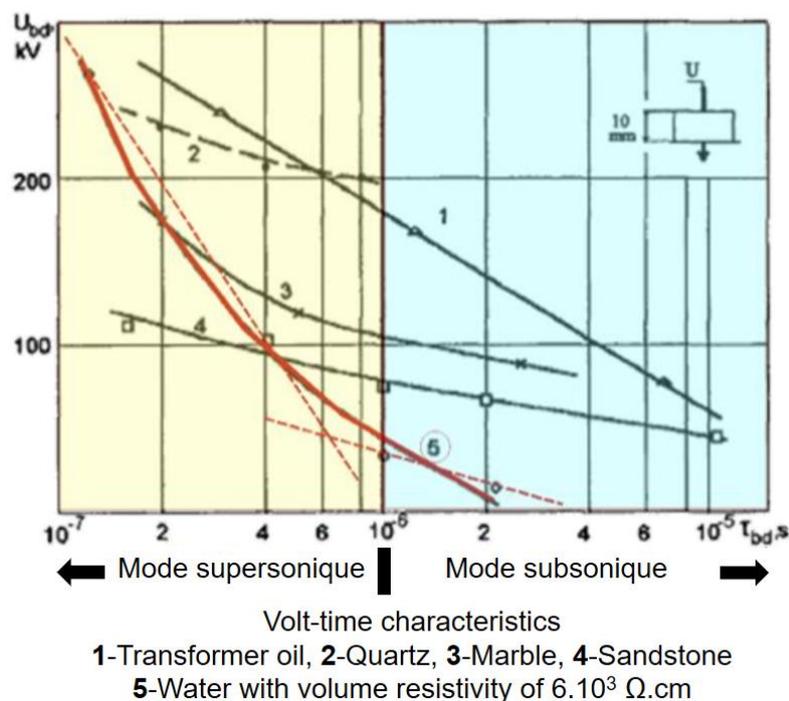


Figure 3-2 : Evolution de la tension de claquage en fonction de la durée d'application [29]

3.3.2.1. Tension de claquage

La tension de claquage, d'un liquide ou d'un gaz, dépend de la forme de l'onde de tension appliquée, de la polarité, de la géométrie de l'intervalle, des conditions de température et de pression. Pour une configuration identique, la diversité de comportement des streamers dans les liquides entraîne de très gros écarts entre les tensions de claquage. Chaque liquide possède des caractéristiques intrinsèques. Dès lors, il nous est impossible de prédire convenablement le comportement d'un liquide de formulation voisine à un autre liquide.

Les tensions de claquage d'un liquide et d'un gaz suivent des règles identiques : augmentation avec la distance inter-électrodes et avec la pression statique. Nous remarquons une différence importante entre les ruptures diélectriques des liquides et des gaz, qui porte sur la notion de durée d'application de l'onde de tension, en particulier pour l'eau [21].

Deux cas de figure se présentent :

- La décharge subsonique
- La décharge supersonique

3.3.2.2. Le mode de décharge subsonique

L'aspect des décharges subsoniques dans l'eau ressemble aux streamers dits en forme de « buisson », observés également dans les hydrocarbures. La Figure 3-3 illustre cette forme observée [30]. L'apparition de bulles de gaz, siège de la décharge, a été mise en exergue par de nombreux auteurs [31] [32] [33].

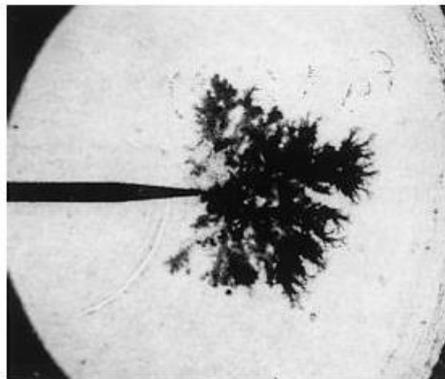


Figure 3-3 : Photographie par ombroscopie d'un streamer négatif buisson [30]

Touya [32] a mis en évidence ce phénomène. Ses résultats montrent clairement l'apparition d'un volume de bulles de gaz qui se développe depuis la pointe haute tension. La lumière n'est émise par la décharge qu'après la formation de ces bulles de gaz. Une phase de vaporisation de l'eau par effet Joule est donc à l'origine de l'initiation et de la propagation de la décharge électrique. Le principe de développement d'une décharge subsonique est présenté par l'auteur sur la Figure 3-4.

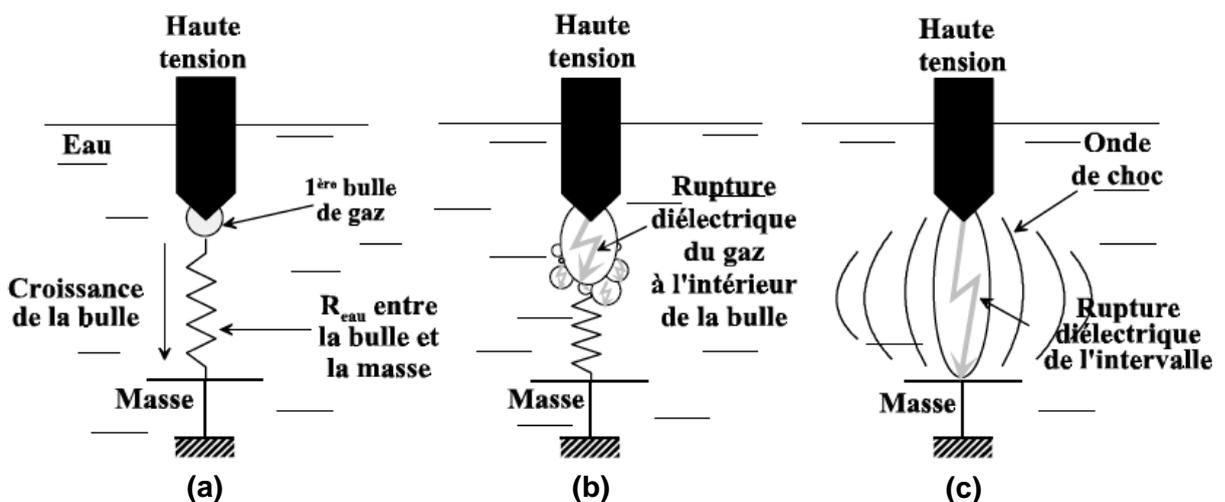


Figure 3-4 : Schématisation de la propagation sous polarité positive d'une décharge électrique subsonique dans l'eau ($\sigma = 200 \mu\text{S/cm}$) [32]

Par effet Joule, une première bulle de gaz est créée au niveau de la pointe (Figure 3-4-a), avec un échauffement local de l'eau. Une décharge électrique se développe ensuite dans la bulle (renforcement du champ électrique dans la bulle dû à la différence de permittivité entre l'eau et le gaz). Le potentiel électrique est reporté à l'extrémité de la bulle provoquant le développement d'autres bulles (Figure 3-4-b). Lorsque le volume de la bulle occupe tout l'espace inter-électrodes, il y a rupture diélectrique de l'intervalle (Figure 3-4-c) [21]. Les constantes de temps thermiques étant relativement lentes et les énergies de vaporisation importantes, ce type de décharge est associé à l'application d'une tension pendant des temps longs et à des énergies commutées importantes. La notion de champ électrique n'est pas un critère de premier ordre pour les décharges subsoniques. A partir du moment où la tension est maintenue pendant une durée suffisamment importante, il est envisageable de court-circuiter un intervalle, et ce, à l'aide de faibles niveaux de tensions (quelques kilovolts) [21].

3.3.2.3. Le mode de décharge supersonique

Contrairement à la décharge subsonique, la notion de champ électrique est primordiale dans le cas du mode de décharge supersonique. La valeur des champs électriques requise pour la génération de décharges supersoniques dans l'eau excède de loin celle requise pour le gaz [34]. Les champs de claquage pour l'eau varient de 250 kV/cm à plus d'1 MV/cm, suivant les caractéristiques de l'eau [35].

Touya [32] a travaillé sur le développement d'une décharge supersonique dans l'eau en polarité positive (Figure 3-5). Ce type de décharge est constitué de filaments (streamers) partant de la pointe de l'électrode jusqu'au plan de masse. Dans ses travaux, l'auteur montre qu'aucune phase vapeur n'a pu être détectée optiquement. Dans ce mode de décharge, il est difficile d'extrapoler, compte tenu des temps mis en jeu (inférieurs à la microseconde), du mécanisme de formation des bulles par vaporisation et cela d'autant plus qu'il est possible d'initier des décharges supersoniques sans fournir d'énergie au système [21].

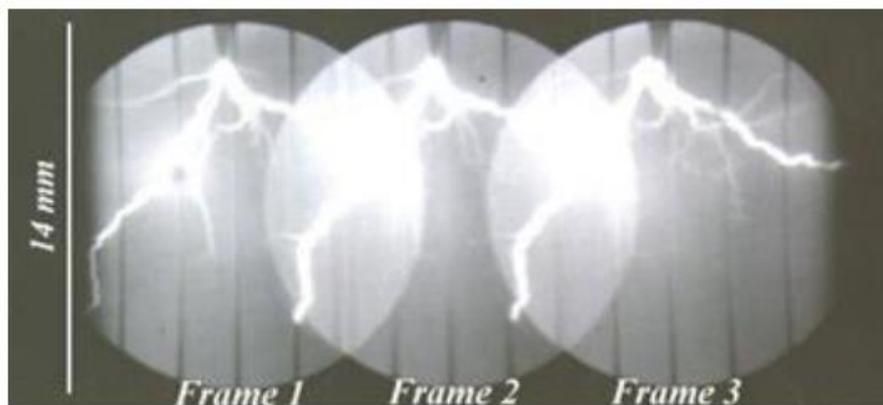


Figure 3-5 : Convertisseur d'images d'une décharge électrique supersonique dans l'eau (polarité positive) $\sigma = 200 \mu\text{S/cm}$ et temps d'exposition 200 ns [32]

Nous devons donc tenter de trouver une explication basée sur des phénomènes plus rapides. La plupart des auteurs cherchent à justifier un changement de phase de façon à pouvoir se rattacher à des résultats connus de la théorie des décharges dans les gaz. Deux théories se dégagent des travaux de Kolb [36] et Schoenbach [37] :

« Direct impact ionization model » : Nikuradse [38] et Peek [39] expliquent que la décharge supersonique est créée par une ionisation directe du liquide. Cette explication est reprise par d'autres auteurs Lewis [40] [41] et Katsuki [34] (approche émanant de laboratoires d'électronique moléculaire et biomoléculaire). Ils développent dans les liquides diélectriques, des ruptures de liaisons inter-moléculaires dues à la température. Ils introduisent des modifications locales de la configuration moléculaire qui peuvent créer des cavités microscopiques.

« Bubble theory » : Guntherschulze [42] et Edler [43] supposent l'intervention d'une phase gazeuse, qui sert de support pour le développement de l'avalanche électronique. Les décharges électroniques dans les liquides sont, en conséquence, considérées comme des décharges de gaz enveloppées [21]. Jones et Kunhardt [35] [44] contredisent l'hypothèse selon laquelle une avalanche d'électrons peut croître directement dans l'eau et qu'il est possible de déclencher une décharge supersonique avec des champs aussi faibles que 200 kV/cm. Ces auteurs introduisent la notion de « faible densité » car ils considèrent que le mécanisme de création des bulles par thermalisation du volume d'eau est trop lent. Ils cherchent à montrer que la création d'un chauffage localisé (rapide) dans des zones de faible densité s'apparente à des microbulles se créant au voisinage de l'électrode, via des aspérités et de l'effet de champ. D'autres auteurs ont également repris cette théorie [45] [46] [47] [48]. Ainsi, ils disposent d'une bulle et d'électrons libres et peuvent développer leur théorie, semblable à celle des décharges électriques dans les gaz. La chronologie du procédé est la suivante [21] :

- Nucléation près de l'électrode (formation de sites de faible densité) ;
- Croissance et expansion de ces sites jusqu'à une valeur critique de la densité permettant l'ionisation (par impacts électroniques) ;
- Croissance d'une avalanche électronique et apparition d'un front d'ionisation ;
- Propagation du front d'ionisation avec chauffage par injection d'électrons, baisse de la densité du liquide diélectrique et croissance d'avalanches.

La communauté scientifique n'est pas unanime sur l'explication des phénomènes de génération et de propagation des décharges supersoniques dans l'eau. Toutefois, l'ensemble des acteurs réfute l'hypothèse selon laquelle des phénomènes thermiques seraient mis en jeu, car considérés trop lents pour ce type de décharge [21].

3.3.3. Régime d'arcs électriques

Pendant la durée de l'arc, un fort courant pouvant atteindre plusieurs centaines de kiloampères circule entre les deux électrodes, en créant un canal gazeux à température élevée et de résistance très faible [28]. Cette phase conduit également à la formation d'une onde de pression d'amplitude bien plus élevée que celle obtenue en phase streamer [21]. La pression dans le canal diminue, du fait de la durée plus importante du canal d'arc (3-4 μ s) par rapport au canal de streamer (0,8 μ s). Le volume de gaz chauffé et le volume de liquide environnant, dans lesquels les espèces réactives vont réagir, seront donc bien plus importants que dans le cas de la décharge streamer. Rappelons, par ailleurs, qu'une grande partie de l'énergie injectée sert à chauffer le canal, ce qui entraîne une forte émission de lumière et la génération d'ondes de choc [28].

La technologie de fragmentation par les hautes tensions est basée sur la restitution rapide de fortes énergies électriques stockées par des condensateurs. Cette technique permet la création d'une onde de choc et par conséquent de prévoir des applications de fracturation, de séparation, de fragmentation ou de forage. Dans le cas du désassemblage des lampes et spots à LED, nous distinguons deux principes de fragmentation. Le premier principe est dit localisé, la décharge se produisant directement au niveau du ou des matériaux (Figure 3-6-a) : c'est la fragmentation

électrodynamique (EDF). Le second, dit délocalisé, consiste à transmettre une onde de choc sur le ou les matériaux, par l'intermédiaire d'un milieu liquide diélectrique (Figure 3-6-b) : c'est la fragmentation électrohydraulique (EHF).

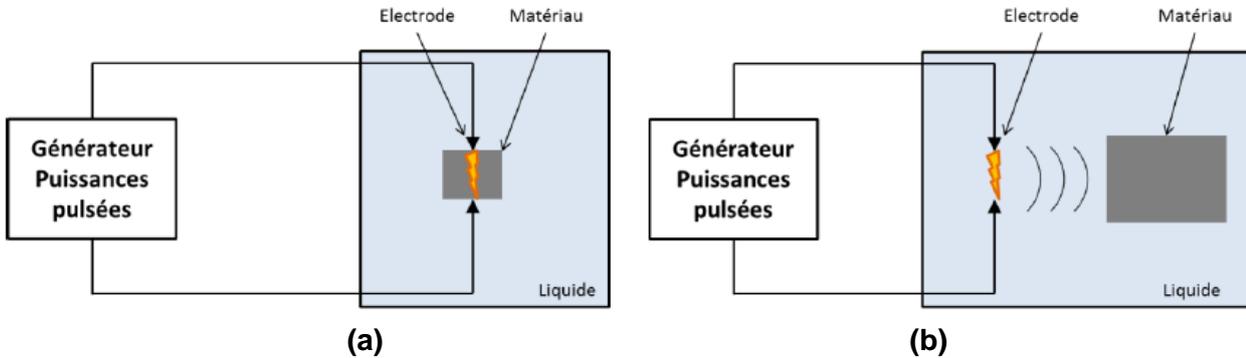


Figure 3-6 : Schémas de principe de la fragmentation par les hautes tensions : Fragmentation électrodynamique (a) et fragmentation électrohydraulique (b) [21]

La montée de la tension dans le cas de la fragmentation électrodynamique (EDF) est très rapide (inférieure à 500 ns), c'est le mode supersonique avec des tensions appliquées de l'ordre de 50 à 200 kV. Dans le cas de la fragmentation électrohydraulique (EHF), cette augmentation de la tension est lente (supérieure à 500 ns), c'est le mode subsonique avec des tensions de l'ordre de quelques dizaines de kilovolts (30-50 kV). La Figure 3-7 présente ces deux modes [12]. La décharge électrique provoque un arc électrique, entre les deux électrodes (EDF). Puis la diffusion de l'arc électrique, dans le réacteur, produit une onde de choc qui se propage au sein de l'échantillon (EHF). Notons, qu'il est difficile de dissocier la frontière entre les deux phénomènes [5].

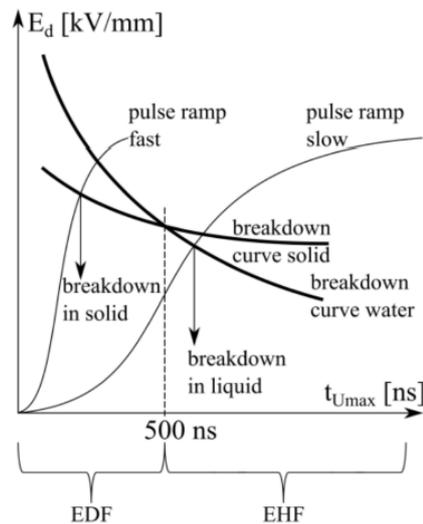


Figure 3-7 : Courbes de tensions en fonction de la durée de montée des impulsions [12]

L'énergie du générateur (en Joule) mise en jeu, dans les deux cas de figure, est calculée via l'expression ci-dessous (2) [5] :

$$E_{gen} = n \frac{1}{2} C U^2 \quad (2)$$

Soit :

- n : nombre de décharges électriques appliquées
- C : capacité des condensateurs en Farad (F)
- U : tension entre les électrodes en Volt (V)

3.3.3.1. Fragmentation électrodynamique (EDF)

Le principe de la fragmentation électrodynamique consiste à placer le produit à fragmenter entre deux électrodes. L'ensemble est immergé dans un liquide dont la rigidité diélectrique est très élevée, tel que l'eau pour les applications industrielles²⁴. Les deux électrodes sont connectées à un générateur de hautes tensions (puissances pulsées), appelé communément générateur de Marx, délivrant une impulsion de quelques centaines de kilovolts au système d'électrodes. Un arc est alors généré à travers le matériau. L'onde de pression résultant de l'expansion du canal d'arc, fragmente le matériau à proximité du lieu de la décharge. En répétant ce processus, le matériau peut être entièrement décheté. La fragmentation électrodynamique repose sur le principe d'explosion du produit, grâce à l'application d'une force de traction, au sein de l'échantillon (Figure 3-8), qui va séparer les sous-produits au niveau des joints inter-matériaux [21].

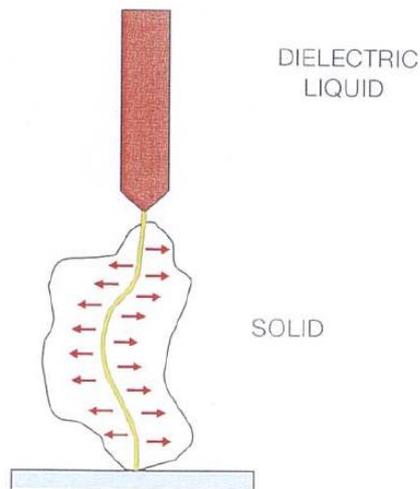


Figure 3-8 : Schématisation du principe de la fragmentation par explosion à travers l'arc électrique : SELFRAG (higher voltages) [17] [18]

Le développement du générateur de hautes tensions a été inventé, en 1924 par Erwin Otto MARX [17] [18]. Cependant, ce n'est qu'à l'ère de la guerre froide que les scientifiques russes ont réalisé son potentiel dans le traitement des minéraux, après une découverte fortuite. Les décharges à hautes tensions dans l'eau génèrent des ondes de choc suffisamment puissantes pour écraser des roches. Le dispositif repose sur un transformateur qui alimente le générateur de Marx pour produire des impulsions et les décharger dans la cuve de traitement, via un système d'électrodes.

La société Suisse SELFRAG, fondée en 2007, a développé et commercialise une unité de traitement reposant sur le principe de la fragmentation électrodynamique : le SELGRAG Lab, dont le schéma de principe est présenté sur la Figure 3-9. La cuve est positionnée sur une table élévatrice qui la déplace verticalement, en fonction de la distance inter-électrodes appliquée. Aujourd'hui, elle propose des unités de traitement dans de nombreux domaines d'application, tels que l'exploitation minière, la séparation, la fracturation et le recyclage. La cuve de traitement peut être utilisée en configuration fermée ou en plein air. La Figure 3-10 expose l'outil SELFRAG

²⁴ L'eau joue le rôle d'un isolant électrique (diélectrique) pour empêcher les décharges électriques de quitter le matériau et pour les focaliser exclusivement sur l'échantillon à traiter [5].

PWTS²⁵. Dans le circuit fermé la zone de traitement est hermétique entre les deux électrodes, par opposition à la configuration ouverte dans laquelle l'électrode inférieure est essentiellement un tamis. La configuration ouverte permet, à une granulométrie souhaitée, un traitement en flux continu à haut débit (jusqu'à 10 t/h), avec une consommation énergétique efficace. Une perte liée à l'énergie de désintégration peut ainsi être évitée avec des broyats au-delà de la taille du crible [8].

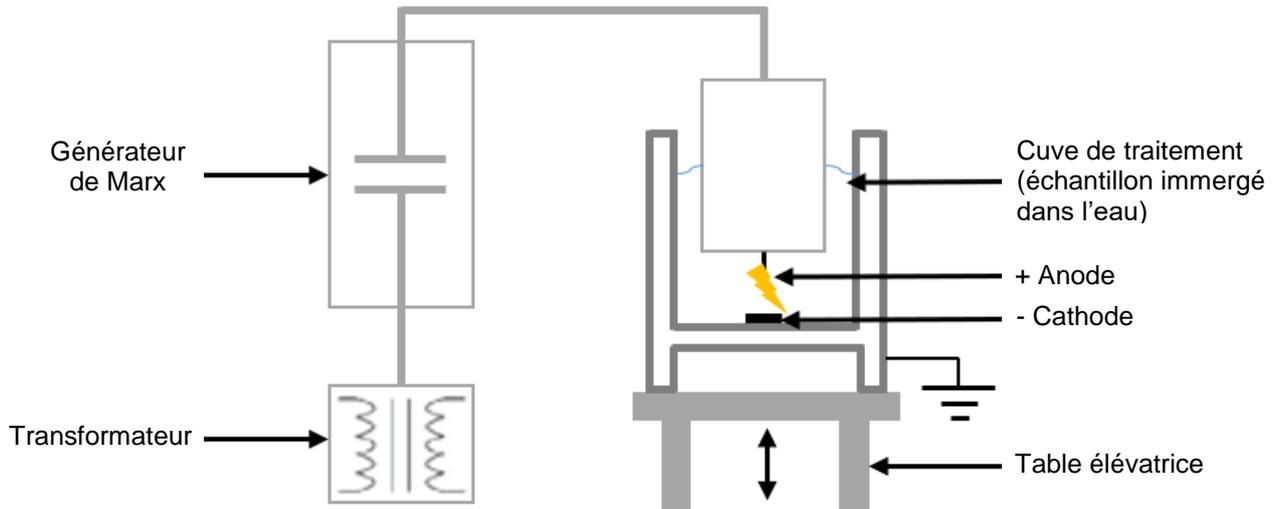
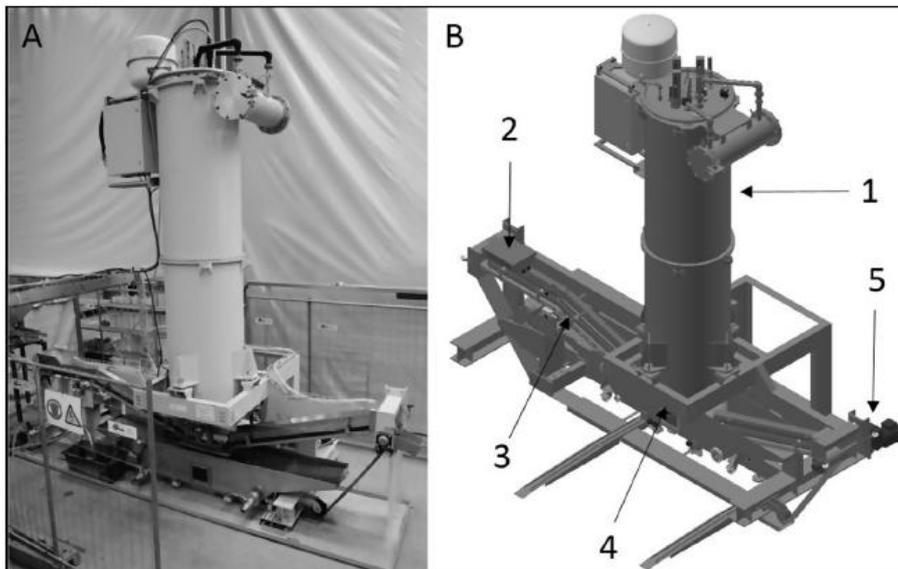


Figure 3-9 : Schéma de principe de l'unité de traitement SELFRAG Lab [8]



A : SELFRAG PWTS

B : 1-Générateur de puissances pulsées; 2-Trémie d'alimentation; 3-Convoyeur; 4-Zone de traitement; 5-Sortie des fractions

Figure 3-10 : Illustration du réacteur SELFRAG PWTS disponible sur le site de Kerzers (Suisse) [5]

La Figure 3-11 illustre la zone de traitement du SELFRAG PWTS avec le générateur d'impulsions, l'électrode supérieure en forme de disque, la contre-électrode (convoyeur à plaques métalliques) et les guides latéraux d'isolation du convoyeur. Les échantillons sont immergés, en flux continu, dans une cuve contenant le liquide diélectrique (eau). Puis, le convoyeur les transporte jusqu'à la zone de traitement, dans laquelle ont lieu les décharges électriques via le générateur, à travers les matériaux positionnés sur le convoyeur. Les polarités des électrodes et la vitesse du convoyeur

²⁵ Pre-Weakening Test Station.

peuvent être paramétrées. La variation de la vitesse du convoyeur a une influence sur le temps de séjour du matériau dans la zone de traitement. Cette variation a donc une influence sur le nombre d'impulsions qui sont déchargées à travers l'échantillon, par conséquent sur l'énergie spécifique emmagasinée par ce dernier [5].

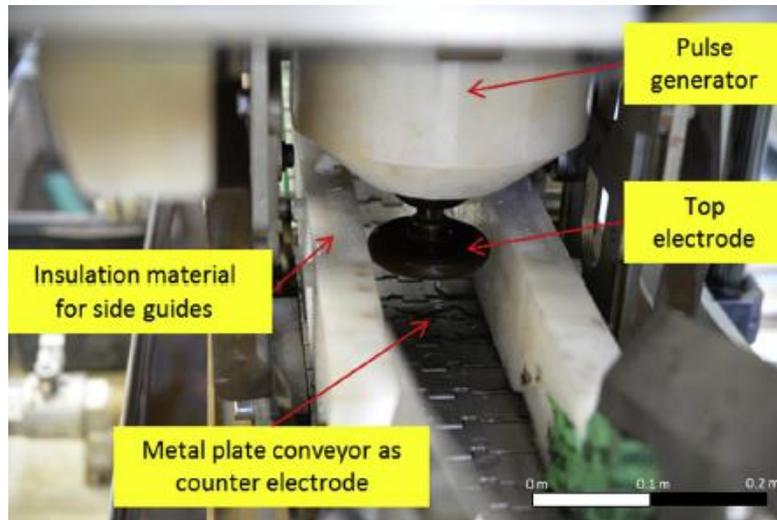


Figure 3-11 : Zone de traitement SELFRAG PWTS [7] [49]

Les matériaux sont immergés dans le réacteur contenant un liquide diélectrique (eau). La montée de la tension est inférieure à 500 ns. L'eau joue le rôle d'un isolant électrique (diélectrique) pour concentrer les décharges électriques sur les matériaux et optimiser ainsi leur fragmentation sélective. L'électrode (anode) est immergée dans la partie supérieure du réacteur, tandis que le fond du réacteur constitue la contre-électrode (cathode). L'appareil produit des décharges électriques, de courte durée et de très hautes tensions (50-200 kV), entre les deux électrodes. Les mécanismes de fragmentation, obtenus par les décharges d'impulsions électriques, sont utilisés sous l'action d'une décharge électrique, sur l'ensemble de l'échantillon constitué de solides polyphasés. La Figure 3-12 schématise les mécanismes de la fragmentation sélective dans le réacteur SELFRAG Lab.

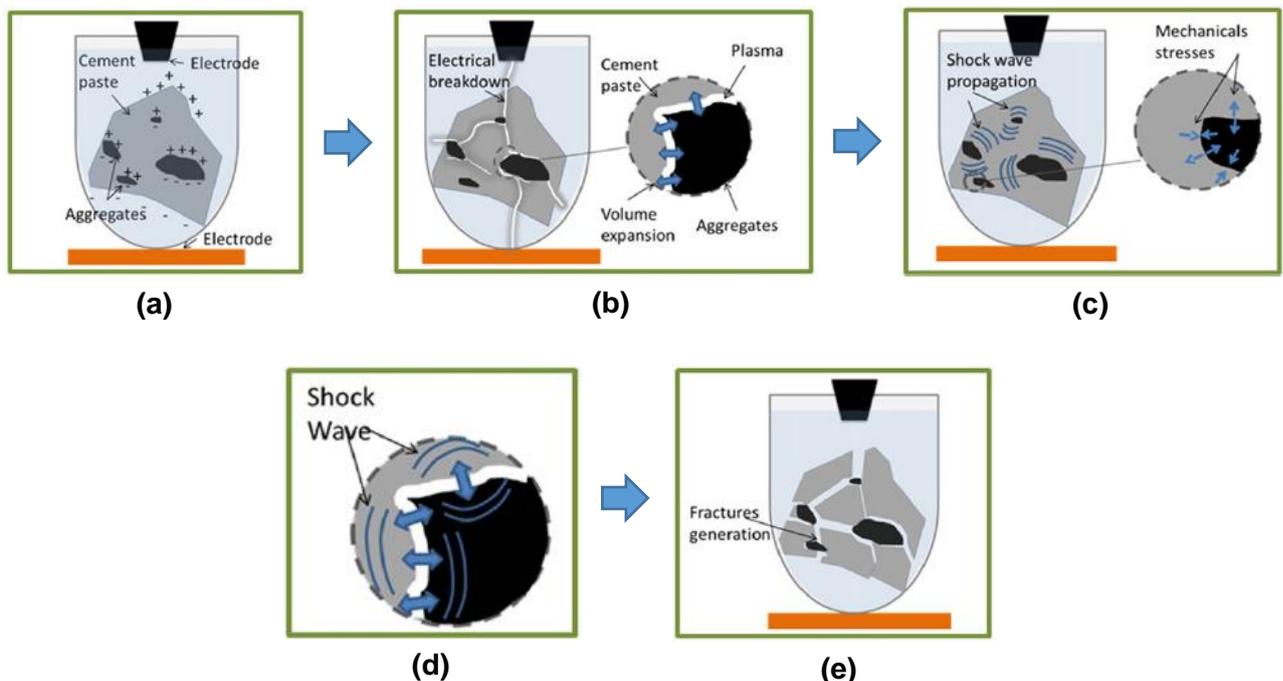


Figure 3-12 : Schématisation du principe de la comminution par EDF du SELFRAG Lab [6]

Lorsqu'un échantillon est soumis à un champ électrique élevé, les différents constituants du matériau se polarisent (Figure 3-12-a). L'intensité et l'emplacement de cette polarisation dépendent des propriétés électriques intrinsèques des matériaux constitutifs de l'échantillon.

Un déséquilibre des charges électriques est généré aux interfaces (joints de grains) (Figure 3-12-b). Dans un champ électrique intense, la différence de charge entre les matériaux crée localement une décharge (plasma) (Figure 3-12-c).

La création de ce plasma s'accompagne d'une dilatation thermique, ce qui provoque une onde de choc radiale, au sein de l'échantillon (Figure 3-12-d). Ces mécanismes ont lieu presque instantanément, avec une durée de l'ordre de quelques nanosecondes.

La fragmentation électrique exploite tous ces mécanismes pour séparer les matériaux de manière sélective. Lorsqu'un matériau multiphasé (constituants aux propriétés électriques différentes) est soumis à un champ électrique intense, l'expansion thermique, suivie de l'onde de choc, provoque des fractures aux interfaces, entre les constituants. Les fractures qui se produisent le long des joints de grains encouragent la fragmentation sélective du matériau (Figure 3-12-e).

3.3.3.2. Fragmentation électrohydraulique (EHF)

Le principe de la fragmentation électrohydraulique repose sur un système capacitif déchargé à travers un jeu d'électrodes, délivrant des puissances pulsées, avec des impulsions de l'ordre de quelques dizaines de kilovolts (30-50 kV). Un arc électrique est alors créé entre les deux électrodes, à travers le liquide diélectrique. L'expansion du canal d'arc conduit, par la suite, à la génération d'une onde de pression qui se propage dans le liquide jusqu'au matériau à traiter [50]. La fragmentation électrohydraulique repose sur le principe d'explosion du produit, grâce à l'application d'une force de compression au sein de celui-ci (Figure 3-13), qui va séparer les sous-produits au niveau des joints inter-matériaux. La Figure 3-14 illustre le schéma de principe du circuit de décharge de la configuration de fragmentation électrohydraulique.

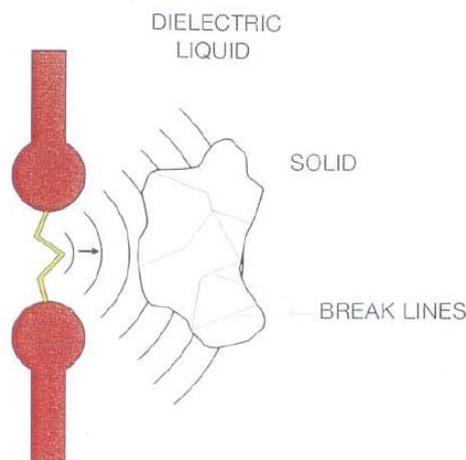


Figure 3-13 : Schématisation du principe de la fragmentation par compression à travers l'onde de choc : IMPULSTEC (lower voltages) [17] [18]

La distance entre les électrodes influence la fragmentation sélective des produits à travers cinq paramètres [8] :

Le **volume** disponible dans la cuve de traitement. Ce volume dépend non seulement des produits de tailles différentes, mais aussi de leur mouvement. Un faible espace entre les électrodes peut

restreindre le mouvement des échantillons, les uns par rapport aux autres. Ainsi, certains échantillons reçoivent la majeure partie de l'énergie, tandis que d'autres sont peu ou pas affectés.

Le **débit** et le **gradient de tension** sont déterminés par le volume disponible entre les électrodes. L'espace inter-électrodes a une influence directe sur le gradient de tension et donc sur la décharge électrique et l'onde de choc. En augmentant ce gradient de tension, la probabilité que la décharge électrique ait lieu se rapproche de 100%. Un gradient de tension minimum d'environ 7 kV/mm doit être appliqué, pour atteindre de manière fiable les décharges électriques.

La **fréquence** influence le comportement de comminution. Plus elle est élevée, plus les décharges électriques se produisent sur une période beaucoup plus courte et plus le temps de traitement de l'échantillon est réduit. A de hautes fréquences, des bulles résiduelles présentes dans la zone de traitement persistent. La résistance à la rupture des phases gazeuses dans ces bulles est inférieure à celle de l'eau, ce qui facilite le transfert des décharges électriques à travers ces bulles et les ondes de choc jusqu'à l'échantillon. Une fréquence adaptée améliore la probabilité de fragmentation.

La **taille des échantillons** influence l'énergie de transfert. Plus leur taille est importante plus la décharge électrique inter-électrodes est emmagasinée dans l'échantillon. Si bien que, les pertes d'énergie dans le processus de transfert sont faibles. A l'inverse, les petites tailles d'échantillons ne pourront pas combler complètement l'écart entre les électrodes. Donc des arcs électriques supplémentaires peuvent être nécessaires, pour franchir les particules entre elles, et ce, plusieurs fois. Ils impliquent une plus longue distance totale de voyage des décharges électriques et des ondes de choc à travers l'eau. Une plus grande partie de l'énergie peut donc être perdue dans l'eau avec ce phénomène. Par conséquent, moins d'énergie servira pour la fragmentation sélective des produits.

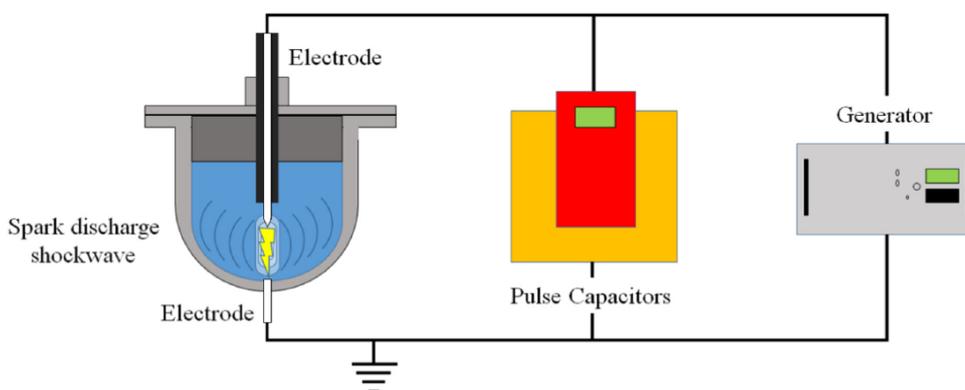


Figure 3-14 : Schéma de principe d'un circuit de décharge de configuration EHF (IMPULSTEC) pour la génération d'ondes de choc [11]

La société Allemande IMPULSTEC, fondée en 2006, leader en Allemagne de la technologie de fragmentation par les hautes tensions, propose un ensemble de systèmes de comminution par le traitement des ondes de choc électriques, avec la technologie EHF pour la séparation sélective des matériaux solides. Les projets sont menés depuis la planification, en passant par la conception, et jusqu'à la mise en service sur le site client. Des exemples de réacteurs industriels EHF IMPULSTEC sont illustrés sur les Figures 3-15 et 3-16. Les échantillons sont déposés dans une trémie d'alimentation réglée à une vitesse définie, en fonction du type d'application. Les produits sont acheminés ensuite au niveau de la cuve du réacteur EHF, dans laquelle ils sont fragmentés sélectivement. Les sous-produits ainsi séparés, étant humides, sont envoyés vers un dispositif de séchage puis vers un système de tamis vibrant, afin de ne récupérer que les fractions déstructurées à une granulométrie déterminée. Ceux qui n'ont pas été séparés à la bonne dimension sont réintroduits dans la boucle de traitement. Les sous-éléments conformes sont extraits de la ligne de traitement industrielle, puis sont récupérés dans un bac ou un fût.

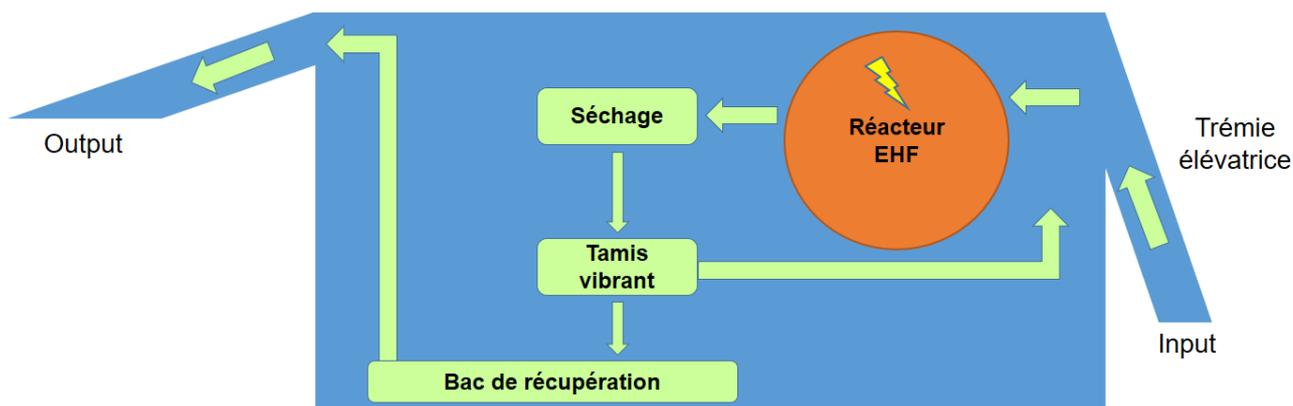


Figure 3-15 : Schéma du principe de l'installation industrielle IMPULSTEC de recyclage, en flux continu, des matériaux semi-conducteurs



Figure 3-16 : Installation industrielle de recyclage IMPULSTEC en flux continu

3.4. Méthodologie des études de traitement des dispositifs à LED

Dans le cadre de la thèse, nous avons réalisé trois études paramétriques dont deux à l'échelle laboratoire et une à l'échelle pré-industrielle, pour comprendre les phénomènes de déconstruction des dispositifs à LED, avec la technologie de fragmentation sélective par les puissances pulsées. La première a été menée avec l'entreprise XCRUSHER, reposant sur la fragmentation électrohydraulique, et la deuxième avec le BRGM qui dispose d'une unité SELFRAG Lab, reposant sur la fragmentation électrodynamique. Ces deux études laboratoires, réalisées en mode batch, ont été complétées par des essais pré-industriels, avec la société IMPULSTEC, afin de confirmer la capacité de cette technologie à traiter le gisement des dispositifs à LED en fin de vie, en flux continu et en circuit fermé.

Cela permettra à l'entreprise ARTEMISE de disposer de données sur l'utilisation des ondes pulsées pour la fragmentation sélective des dispositifs à LED, tels que les paramètres optimaux, les coûts énergétiques, la classification statistique de libération des éléments, etc. Subséquemment, elle sera en mesure de choisir la technologie de fragmentation la plus efficace, pour traiter son gisement, tout en optimisant le potentiel de valorisation matériaux et composants électroniques.

3.5. Etude via le dispositif XCRUSHER

L'étude menée avec l'entreprise XCRUSHER, dont le titre est : « Etude et dimensionnement de la technologie des ondes pulsées pour le traitement des lampes et tubes à LED », a permis de réaliser différents tests de déconstruction des dispositifs à LED (lampes, spots et tubes), afin de démontrer la faisabilité technique et la capacité de la technologie à déstructurer ces produits à technologie LED.

3.5.1. Contexte de l'étude

L'étude fut menée en deux phases successives, entre les mois d'octobre 2019 et de février 2020, sur un big-bag de 283 kg, trié en octobre 2019 dans l'usine ARTEMISE, avec un triple objectif :

- Séparer les parties considérées comme étant des déchets dangereux (corps et culots en PBT) des parties pouvant être valorisées (systèmes optiques en PC), pour une meilleure bonification des éléments constitutifs et afin d'atteindre le taux de valorisation matière de 80% imposé par les pouvoirs publics ;
- Extraire des produits d'éclairage à LED, les puces et les cartes électroniques intègres qui constituent la valeur ajoutée de ces dispositifs à LED, afin de les valoriser et ainsi accroître leur rentabilité économique ;
- Dimensionner un outil industriel de traitement continu des lampes et des tubes à LED avec la technologie des ondes pulsées.

Les phases de cette étude avec le dispositif EHF XCRUSHER sont :

- Faisabilité de la technologie des puissances pulsées :
 - Qualité des résidus et des produits après traitement ;
 - Evaluation du débit et dimensionnement de l'énergie correspondante.
- Dimensionnement d'un réacteur pré-industriel avec les spécificités suivantes :
 - Le réacteur devra être dimensionné pour traiter, en flux continu, des lampes et des tubes à LED jusqu'à 60 cm de longueur ;
 - La machine fonctionnera en circuit fermé ;
 - Le chargement et le déchargement du flux seront automatisés ;
 - Les éléments constitutifs des lampes et des tubes à LED devront être complètement désassemblés à l'issue du traitement.

Remarquons que lors du lancement du projet RECYLED, nous avons également prévu de considérer le traitement des tubes à LED par la technologie des puissances pulsées. Ce choix a finalement été abandonné, afin de proposer un dispositif purement mécanique et automatisé pour cette catégorie d'équipements à LED (cf. partie 3.8).

La Figure 3-17 représente les différentes typologies de lampes et de spots à LED qui ont été classifiées, dans l'étude du gisement réalisée dans le chapitre 2, par catégorie de culots E27, E14, B22, GU10 et GU5.3. Pour réaliser les premiers tests exploratoires, la société XCRUSHER a disposé d'un big-bag représentatif en poids et en typologies des produits de lampes et spots à LED, illustré sur la Figure 3-18 (cf. chapitre 2). Afin de comprendre les phénomènes de déstructuration des lampes et des spots à LED, par les ondes de choc, différentes typologies des dispositifs à LED ont été introduites dans le réacteur, sans considération de taille, de géométrie et de composition. La Figure 3-19 présente l'échantillon initialement identifié et les sous-produits récupérés, à l'issue du traitement de fragmentation sélective, dans le dispositif EHF XCRUSHER.

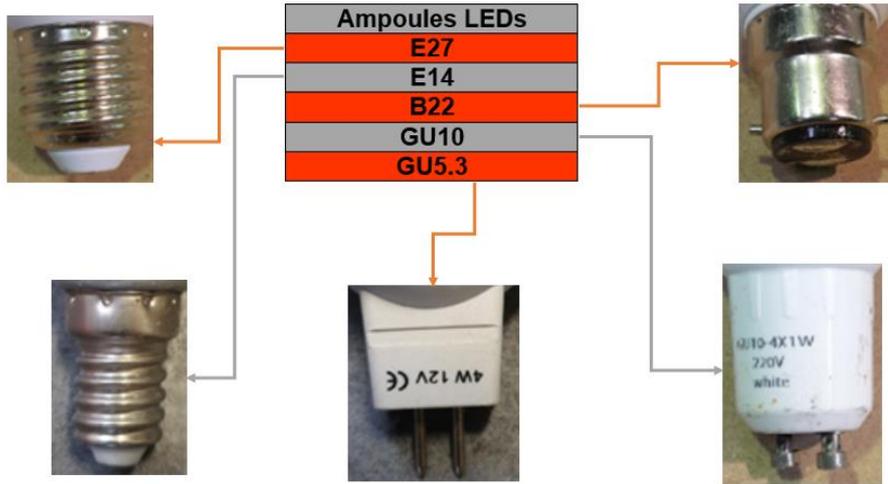


Figure 3-17 : Typologies des culots du gisement de lampes et de spots à LED

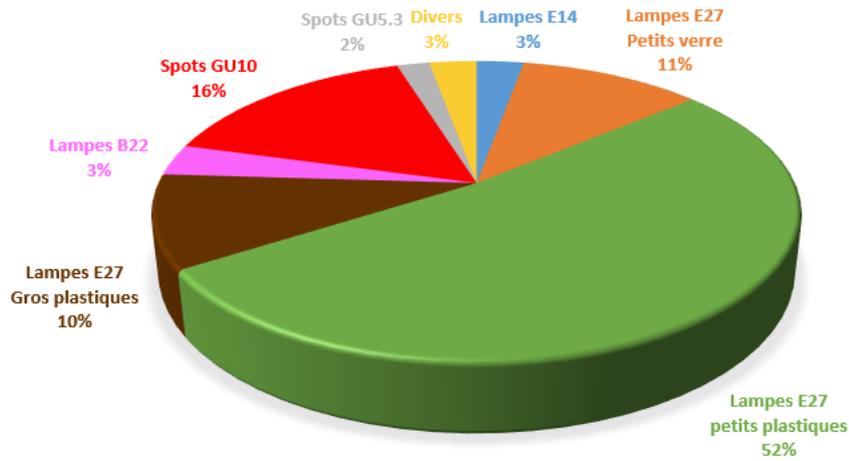


Figure 3-18 : Composition du big-bag de lampes et de spots à LED, représentatif du gisement

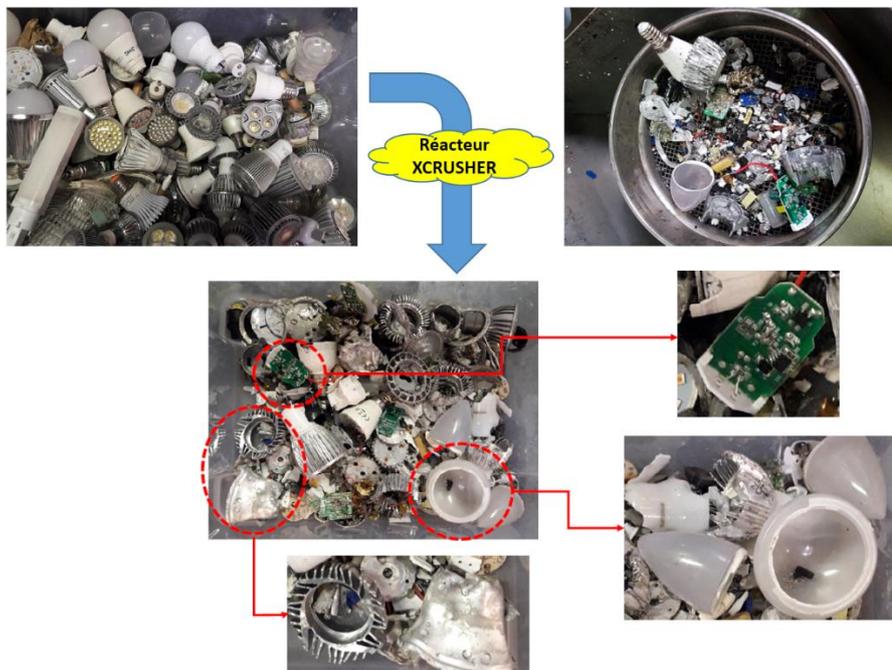


Figure 3-19 : Tests de déconstruction dans le réacteur EHF XCRUSHER, sans classification des LEDs

Au regard de ces premiers résultats de tests préliminaires, illustrés sur la Figure 3-19, l'intégrité physique de certains composants électroniques est préservée, les systèmes optiques sont complètement dissociés des corps. Tous ces sous-ensembles peuvent être triés après le traitement. Nous concluons que la technologie de fragmentation électrohydraulique, proposée par la société XRUSHER, permet la séparation des différents constituants élémentaires des dispositifs à LED :

- Systèmes optiques ou bulbes ;
- Plateaux à LED ;
- Cartes électroniques ;
- Corps ;
- Culots.

Néanmoins, ces équipements à LED réagissent différemment au traitement de fragmentation sélective par les ondes de choc. En fonction de leur typologie et donc de leur structuration mécanique, les désassemblages sont différents. C'est pourquoi, pour éviter de déchiqueter les parties les plus fragiles et à haute valeur marchande de ces dispositifs (cartes électroniques, plateaux et puces à LED), des essais plus poussés ont été entrepris. La classification des produits est basée sur la fragilité mécanique des différentes parties à réagir au comportement des ondes de choc. Elle est réalisée en fonction des types de matériaux constitutifs :

- Des systèmes optiques (déchets non dangereux) ;
- Des corps et des culots (déchets dangereux).

3.5.2. Tests sur les lampes à LED en matières plastiques

Le gisement de lampes et spots LEDs est réparti de la manière suivante : 55% composés d'un système optique en plastique PC de forme arrondie (E27, E14 et B22), 25% en plastique PC de forme plate (GU10 et GU5.3), 16% en verre de forme arrondie (E27) et 4% de formes diverses (E40, GX53, G9, etc.), cf. partie 2.2.1.

3.5.2.1. Lampes avec système optique en plastique PC

Les essais réalisés sur les lampes à LED E27, E14 et B22 avec des systèmes optiques arrondis, en plastique PC, ont été concluants. La séparation entre les bulbes et les corps est complète, comme illustré sur la Figure 3-20. Le traitement par les ondes pulsées est très efficace et ne nécessite que très peu d'énergie, estimée à 8 kWh/t, qu'importent la géométrie et la taille du système optique. L'ensemble des paramètres est résumé dans le Tableau 3-2. Ces essais permettront de faciliter le tri des matériaux plastiques constituant les sous-produits, notamment afin de séparer les matrices plastiques en PC non bromées, de celles en PBT incorporées par des retardateurs de flamme bromés (en moyenne 7,98%, soit 79 800 ppm, cf. chapitre 4). Par ailleurs, nous avons remarqué que les bulbes flottent à la surface de l'eau, dans le réacteur EHF et les corps, quant à eux, sont immergés au fond de la cuve. De ce fait, le tri des matériaux plastiques peut être assuré par un système de flottaison. Cette technologie, étant simple et peu coûteuse à mettre en œuvre, permettra à l'entreprise d'améliorer la revente des fractions non bromées. En addendum, nous remarquons que l'intégrité physique des corps est préservée. Ces derniers contiennent toute la partie électronique des dispositifs à LED que nous souhaitons valoriser. Dès lors, les prochains tests exploratoires sont réalisés sur cette partie des lampes, afin de récupérer les puces à LED et les cartes électroniques potentiellement fonctionnelles.



Figure 3-20 : Tests de séparation des lampes à LED avec des bulbes en plastique

En 10 secondes, des lots de 5 kg peuvent être traités sur la base de 3 tirs/sec.

Paramètre	Valeur
Volume réacteur (m ³)	0,022
Masse lot (kg)	5
Nombre de tirs par lot	30
Energie par tir (J)	4240
Consommation électrique (kWh)	0,04
Energie spécifique (kWh/t)	8

Tableau 3-2 : Caractéristiques des tests de séparation des lampes à LED avec des bulbes en plastique

3.5.2.2. Lampes avec corps en plastique PBT

Des essais ont été menés sur des lampes à LED avec des corps en plastique PBT, en y incorporant des modèles dont les systèmes optiques sont constitués en verre. Ce traitement permet une nette séparation des plateaux de puces à LED (puces sur leur support en aluminium), des cartes électroniques, des corps de lampes en aluminium enveloppés par une matrice plastique et des culots, avec une énergie spécifique appréciée à 40 kWh/t. La Figure 3-21 illustre les échantillons avant et après traitement dans le réacteur EHF XCRUSHER. Le Tableau 3-3 synthétise l'ensemble des paramètres appliqués. Par ailleurs, nous remarquons sur la Figure 3-21, que la déstructuration par la fragmentation électrohydraulique n'a induit aucune destruction des composants électroniques et aucun broyage des matériaux plastiques, revêtement des corps de ces lampes. En conséquence, ces tests sont concluants et la technologie EHF est capable de fragmenter sélectivement les lampes à LED avec des corps en plastique, afin de valoriser les composants électroniques, par leur vente aux entreprises spécialisées.



Figure 3-21 : Tests de séparation des lampes à LED avec des corps en plastique

En 10 secondes, des lots de 1 kg peuvent être traités sur la base de 3 tirs/sec.

Paramètre	Valeur
Volume réacteur (m ³)	0,022
Masse lot (kg)	1
Nombre de tirs par lot	30
Energie par tir (J)	4240
Consommation électrique (kWh)	0,04
Energie spécifique (kWh/t)	40

Tableau 3-3 : Caractéristiques des tests de séparation des lampes à LED avec des corps en plastique

3.5.3. Tests sur les spots à LED en aluminium

Les bilans massiques réalisés, sur les lampes et spots à LED, ont montré d'importantes fractions du matériau aluminium : 43% en 2013 et 21% en 2020 (cf. chapitre 2). Certains spots GU10 et GU5.3 sont constitués de corps en aluminium, dont la fragilité mécanique diffère de celle des ampoules avec des corps en matrice plastique. La Figure 3-22 représente deux spots GU10 et GU5.3 avec des corps en aluminium. Les durées de séjour dans le réacteur EHF sont adaptées selon la nature des matériaux constitutifs. Nous avons donc expérimenté ce type de produits métalliques, afin de les confronter aux produits plastiques et ainsi mieux comprendre leur déstructuration. Les résultats des tests réalisés démontrent la capabilité de la technologie de fragmentation électrohydraulique pour désassembler sélectivement les spots à LED avec des corps métalliques. L'énergie spécifique pour cette typologie est évaluée à 50 kWh/t. La Figure 3-23 illustre

les résultats du traitement par le réacteur EHF XCRUSHER. Le Tableau 3-4 récapitule les paramètres appliqués pour ces tests. En analysant les sous-ensembles, sur la Figure 3-23, nous récupérons les systèmes optiques en PC (de forme plate), les corps en aluminium, les puces à LED appariées sur leur support et les cartes électroniques. La déstructuration sélective n'a entraîné aucun broyage des composants électroniques. Ces derniers pourront être vendus pour une réutilisation ultérieure ou, à défaut, pour une valorisation matière spécifique.

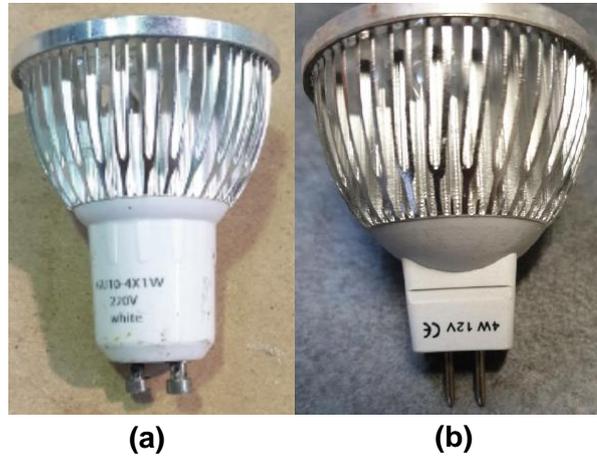


Figure 3-22 : Spots GU10 (a) et GU5.3 (b) avec des corps en aluminium



Figure 3-23 : Tests de séparation des spots à LED GU10 et GU5.3 avec des corps en aluminium

En 60 secondes, des lots de 0,8 kg peuvent être traités sur la base de 3 tirs/sec.

Paramètre	Valeur
Volume réacteur (m ³)	0,0046
Masse lot (kg)	0,8
Nombre de tirs par lot	200
Energie par tir (J)	800
Consommation électrique (kWh)	0,04
Energie spécifique (kWh/t)	50

Tableau 3-4 : Caractéristiques des tests de séparation des spots à LED avec des corps en aluminium

En outre, des tests ont été réalisés sur les tubes à LED. Rappelons que le gisement des tubes à LED en 2019 était composé comme suit (cf. chapitre 2) : 40% de tubes en aluminium, 40% de tubes en plastique et 20% de tubes en verre (source entreprise ARTEMISE). Le verre étant abrasif, la société XCRUSHER n'a réalisé les essais que sur les fractions aluminium et plastique. La Figure 3-24 représente les échantillons types, de tubes à LED avec des socles en aluminium et en plastique, qui ont été découpés à des longueurs comprises entre 20 cm et 60 cm, afin de pouvoir les positionner dans le dispositif EHF XCRUSHER. Cette étude devrait pouvoir être complétée par les caractéristiques et les dimensions du réacteur des puissances pulsées, tenues confidentielles par la société XCRUSHER.

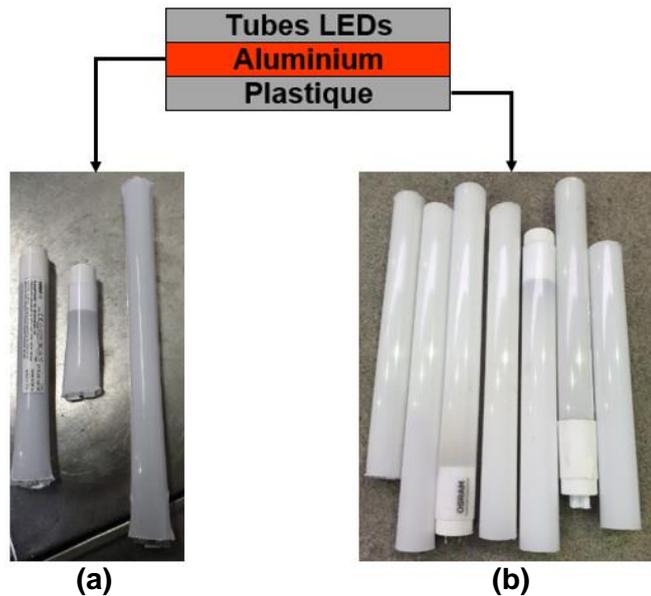


Figure 3-24 : Tubes à LED avec socles en aluminium (a) et en plastique (b)

3.5.4. Tests sur les tubes à LED en aluminium

Comme illustré sur la Figure 3-25, l'outil de fragmentation électrohydraulique XCRUSHER est efficace sur cette typologie de tube LED, pour désassembler les socles en aluminium des systèmes optiques en PC, avec une énergie spécifique évaluée à 50 kWh/t. Les culots en plastique PBT ont aussi été dissociés du reste des tubes, lors des tests. L'intégrité physique des rubans de puces à LED est préservée. Cependant, ces rubans sont toujours positionnés sur leur renfort en aluminium. La technologie EHF n'a pas réussi à dissocier ces deux sous-produits. L'ensemble des paramètres appliqués pour ces expériences est résumé dans le Tableau 3-5.



Figure 3-25 : Tests de séparation des tubes à LED en aluminium

En 15 secondes, des lots de 0,2 kg peuvent être traités sur la base de 3 tirs/sec.

Paramètre	Valeur
Volume réacteur (m ³)	0,0046
Masse lot (kg)	0,2
Nombre de tirs par lot	45
Energie par tir (J)	800
Consommation électrique (kWh)	0,01
Energie spécifique (kWh/t)	50

Tableau 3-5 : Caractéristiques des tests de séparation des tubes à LED en aluminium

3.5.5. Tests sur les tubes à LED en plastique

Similairement aux tubes à LED en aluminium, ceux constitués de socles en matériau plastique ont également été découpés, pour répondre aux contraintes du réacteur laboratoire des puissances pulsées EHF XCRUSHER. La Figure 3-26 montre les échantillons avant et après leur traitement de fragmentation sélective avec l'outil XCRUSHER.

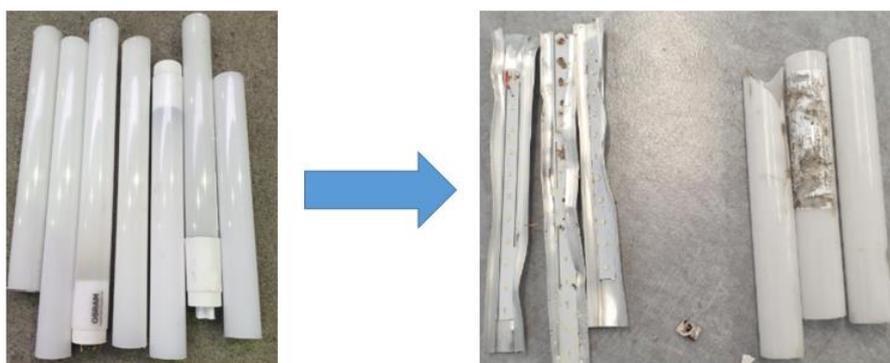


Figure 3-26 : Tests de séparation des tubes à LED en plastique

Nous constatons à l'issue des essais, sur la Figure 3-26, que la technologie de fragmentation électrohydraulique XCRUSHER est efficace pour déconstruire les tubes en plastique en déstructurant les systèmes optiques (en PC), les culots (en PBT) et les glissières métalliques (aluminium) enveloppées par la matrice plastique des systèmes optiques. Pareillement, l'énergie spécifique est appréciée à 50 kWh/t. L'intégrité physique des rubans de puces à LED est également préservée, mais ces derniers sont toujours disposés sur leur support en aluminium. Le Tableau 3-6 synthétise l'ensemble des paramètres appliqués pour ces essais.

En 15 secondes, des lots de 0,2 kg peuvent être traités sur la base de 3 tirs/sec.

Paramètre	Valeur
Volume réacteur (m ³)	0,0046
Masse lot (kg)	0,2
Nombre de tirs par lot	45
Energie par tir (J)	800
Consommation électrique (kWh)	0,01
Energie spécifique (kWh/t)	50

Tableau 3-6 : Caractéristiques des tests de séparation des tubes à LED en plastique

Nous concluons par ces expérimentations que la technologie de fragmentation électrohydraulique, développée par l'entreprise XCRUSHER, permet de désassembler les typologies de tubes à LED en aluminium et en plastique, en dissociant leurs culots et leur socle du système optique. Cependant, la séparation des bandeaux de puces à LED sur leur support (renfort) aluminium reste difficile à appréhender à cette dimension. Une opération de découpe préalable des renforts pourrait faciliter cette séparation. Dans la section suivante, nous abordons le traitement des puces à LED sur leur support.

3.5.6. Tests sur les puces à LED et leur support

Les traitements de séparation des puces à LED soudées et/ou collées sur les supports en aluminium (provenant des lampes et des spots) ou soudées sur les circuits imprimés (provenant des tubes) ont été menés avec le réacteur de fragmentation électrohydraulique XCRUSHER. Les résultats sont récapitulés dans le Tableau 3-7. Nous constatons que l'énergie nécessaire pour traiter la faible masse de ce type de déchets est très élevée : 400 tirs et 800 J, correspondant à une énergie totale de 320 000 J. Cela correspond à une énergie spécifique estimée à 529 kWh/t. Nous soupçonnons que cette énergie élevée soit liée aux types de soudures des puces à LED sur leur support. Si ARTEMISE décidait de séparer ces composants électroniques de leur support, nous lui proposerions de réaliser cette opération par des voies thermiques (tunnel chauffant, décapeur thermique, etc.), afin de réduire les coûts énergétiques.

Paramètre	Valeur
Volume réacteur (m ³)	0,0046
Masse lot (kg)	0,170
Nombre de tirs par lot	400
Energie par tir (J)	800
Consommation électrique (kWh)	0,09
Energie spécifique (kWh/t)	529

Tableau 3-7 : Caractéristiques des tests de séparation des puces à LED sur leur support

3.5.7. Proposition d'un dimensionnement industriel XCRUSHER

A partir de cette étude, XCRUSHER a proposé un dimensionnement d'une ligne de traitement industrielle reposant sur la technologie de fragmentation électrohydraulique, pour déstructurer sélectivement les lampes et les spots à LED.

Les Figures 3-27 et 3-28 illustrent l'outil proposé. La machine de traitement XCRUSHER repose sur un système de carrousel, avec deux réacteurs EHF et six cuves qui fonctionnent en parallèle et en flux discontinu. En effet, l'outil présente trois phases : le chargement des produits, leur traitement et le déchargement des sous-ensembles séparés sélectivement. Ceci entraîne le mouvement de nombreuses pièces. Si bien que, l'usure des pièces mécaniques et les risques de panne sont proportionnellement plus élevés, qu'un outil de production fonctionnant exclusivement en flux continu, tel que le proposent les sociétés SELFRAG et IMPULSTEC. Notons que XCRUSHER ne précise pas le fonctionnement du circuit d'alimentation du liquide diélectrique, dont la gestion doit être uniquement en circuit fermé. En addendum, le dimensionnement de ce système industriel occupe une grande surface au sol, pour traiter la fin de vie des équipements d'éclairage à LED.

Par conséquent, ARTEMISE a considéré que ce dimensionnement industriel ne correspondait pas à ses attentes actuelles et donc à son cahier des charges. Ipso facto, l'entreprise a décidé de ne pas retenir l'outil de traitement industriel proposé par XCRUSHER.

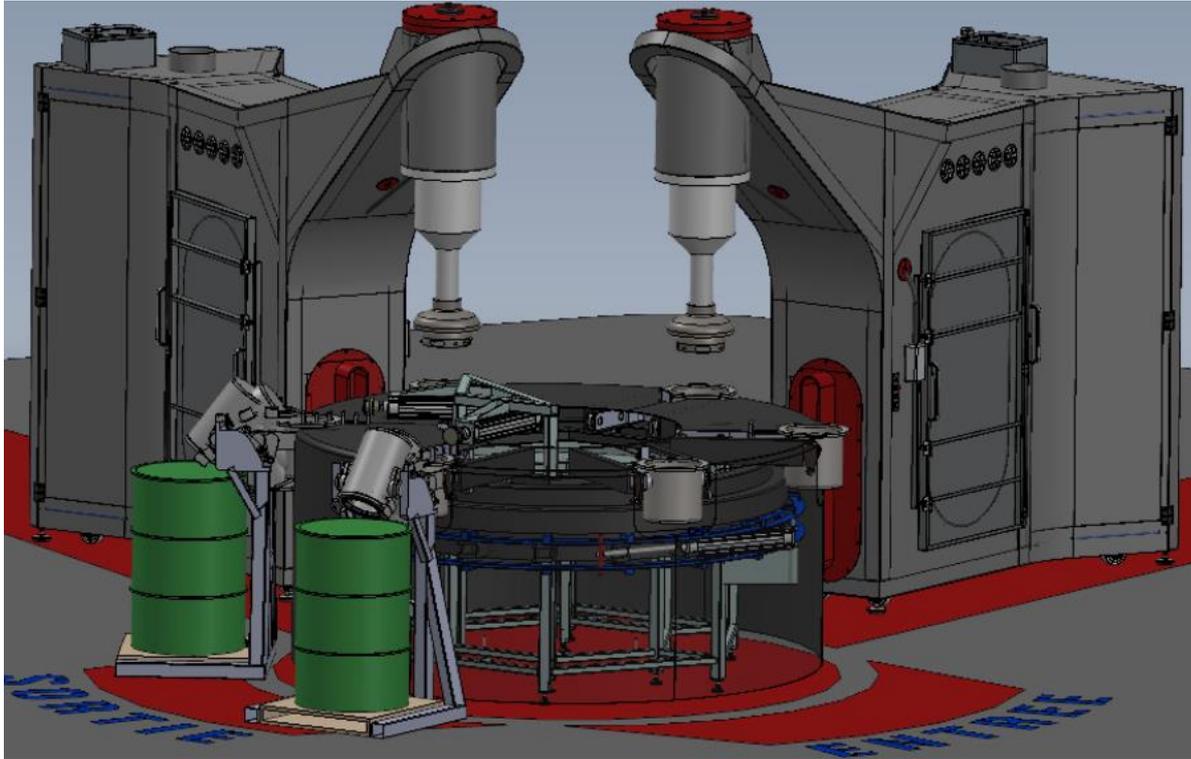


Tableau 3-27 : Outil de traitement industriel des lampes et spots à LED, proposé par XCRUSHER

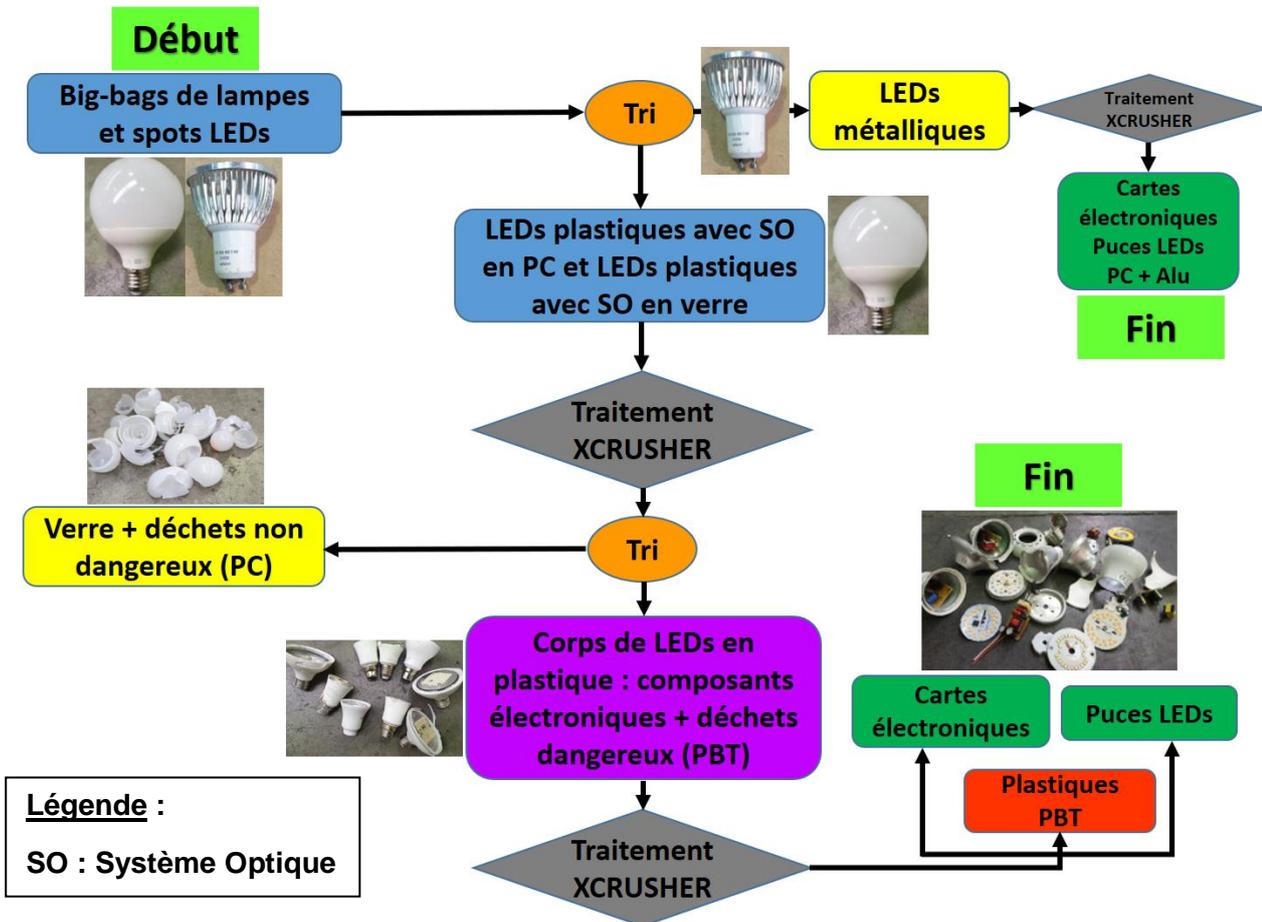


Tableau 3-28 : Synoptique de l'outil de traitement industriel des lampes et spots, proposé par XCRUSHER

3.5.8. Bilan de l'étude XCRUSHER

Cette étude paramétrique de la technologie de fragmentation électrohydraulique, avec le réacteur des puissances pulsées XCRUSHER, est très prometteuse pour traiter la fin de vie des lampes et des spots à LED. Elle a permis la séparation sélective et la récupération des déchets dangereux (plastiques en PBT) et des déchets non dangereux (plastiques en PC), pour une meilleure bonification des éléments constitutifs, et ce, afin de maximiser le taux de valorisation matière et d'atteindre le taux de 80% imposé par les pouvoirs publics. En outre, les composants électroniques (puces à LED et cartes électroniques), contenus dans les corps des lampes et des spots, ont également été séparés et récupérés, en préservant leur intégrité physique. La déstructuration par la technologie EHF n'a entraîné aucun broyage de ces composants électroniques. Ces derniers pourront, par conséquent, être vendus pour une réutilisation ou une valorisation matière spécifique. Par ailleurs, la séparation des puces à LED sur leur support est très énergivore. De ce fait, cette technologie n'est pas adaptée pour traiter ce type de déchets. La capacité de la technologie est néanmoins probante, à ce stade de l'étude. Ainsi, ARTEMISE pourrait traiter une partie du gisement de lampes et de spots à LED avec un réacteur de puissances pulsées reposant sur la fragmentation électrohydraulique. Effectivement, une catégorie de lampes à LED n'a pas été expérimentée dans cette étude, notamment celles contenant des systèmes optiques en verre du fait du caractère fortement abrasif de ce matériau, qui détériorerait prématurément les systèmes mécaniques de la ligne industrielle. Rappelons que ce type de produit sera traité par l'outil de production disponible actuellement chez ARTEMISE, qui valorise les lampes traditionnelles et qui est compatible pour traiter les équipements à LED en verre (cf. chapitre 2). Par ailleurs, les lampes contenant des mousses diélectriques en silicone, répartitrices de chaleur, n'ont également pas été testées dans le réacteur XCRUSHER. Cette technologie est ancienne et serait vouée à disparaître grâce à la maîtrise des matériaux semi-conducteurs (cf. chapitre 2). C'est pourquoi, nous avons décidé de ne pas approfondir cette voie.

Concernant les tubes à LED en aluminium et en plastique, la technologie EHF permet une déstructuration des systèmes optiques en PC, des renforts en aluminium et des culots en PBT. Cependant, les bandeaux de puces à LED sont difficilement dissociables sur leur support en aluminium. La bonification des tubes à LED, dans cette étude, est de ce fait partielle. Une opération supplémentaire de découpe des renforts aluminium faciliterait leur séparation. Notons par ailleurs, que les tubes à LED en verre n'ont pas été expérimentés, étant donnée la grande fragilité mécanique de ce type de matériau. La déstructuration des tubes à LED, par la technologie des puissances pulsées, n'étant pas concluante va conforter notre choix d'une séparation purement mécanique et automatisée de ces équipements d'éclairage.

Par ailleurs, ARTEMISE souhaite développer une ligne de valorisation industrielle exclusivement en flux continu, pour traiter son gisement de dispositifs à LED. Le dimensionnement de l'outil industriel proposé par XCRUSHER n'est pas efficient et n'a pas convaincu la société ARTEMISE. Aussi, il aurait été appréciable d'avoir des données sur la granulométrie des sous-produits issus de la comminution, en fonction des paramètres du réacteur, pour une meilleure compréhension de la déstructuration des dispositifs à LED et des phénomènes mécaniques impliqués. Pour approfondir cette étude préliminaire et mieux appréhender le désassemblage des équipements d'éclairage à LED, nous avons mené une étude exhaustive et collaborative avec le BRGM, qui dispose d'un réacteur laboratoire de fragmentation électrodynamique (EDF), de type SELFRAG Lab.

3.6. Etude via le dispositif SELFRAG Lab

Le BRGM a fait l'acquisition en 2019 d'un dispositif SELFRAG Lab, afin de mener ses propres expérimentations dans le cadre des projets de recherche en géologie minière. Une étude a été

menée en collaboration avec cet établissement public de recherche, pour compléter et affiner l'étude menée par XCRUSHER. Dès lors, nous avons réalisé une campagne d'essais pour tester les dispositifs d'éclairage à LED, en plastique, de types E27 et GU10, représentant respectivement 38% et 22% du gisement (cf. chapitre 2).

3.6.1. Caractéristiques du SELFRAG Lab

Le SELFRAG Lab est une machine destinée à être usitée dans les laboratoires de recherche afin de fragmenter sélectivement et donc désintégrer des matériaux, en séparant les différents éléments constitutifs. La Figure 3-29 schématise ce dispositif expérimental. Une haute tension électrique est utilisée durant le procédé de fragmentation pour émettre des arcs électriques grâce à la présence de deux électrodes, situées au-dessus et en dessous des produits à décomposer. Ces éclairs artificiels génèrent des contraintes au sein des échantillons, afin de les dissocier en différents composants élémentaires.

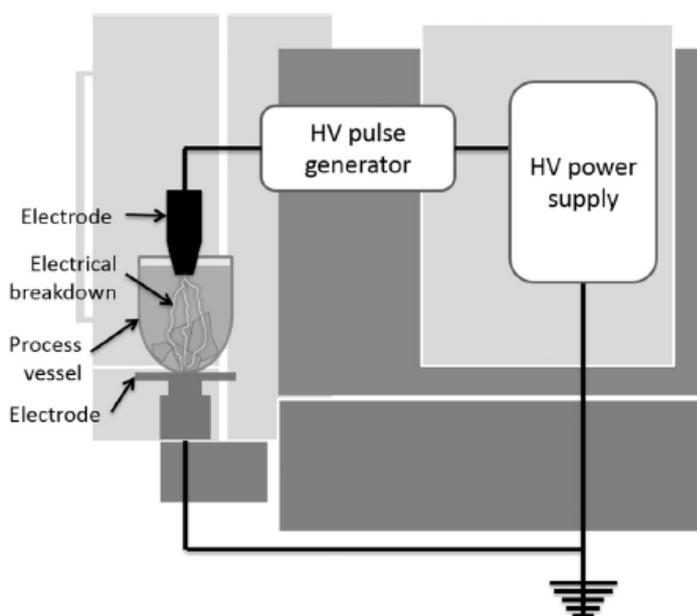


Figure 3-29 : Schéma du dispositif expérimental du réacteur de puissances pulsées SELFRAG Lab [5]

Le réacteur SELFRAG Lab dispose de caractéristiques lui permettant de faire varier différentes grandeurs physiques, résumées dans le Tableau 3-8.

Paramètres	Ajustables				Non ajustables			
	Tension (kV)	Fréquence (Hz)	Gap électrodes (mm)	Nombre de pulses	Température eau réacteur (°C) [19]	Volume réacteur (L)	Poids max échantillon (kg)	Taille maximale échantillon (mm)
Intervalle	90-200	1-5	10-40	1-1000	12-32	2,78	1	80 (d) x 40 (h)

Tableau 3-8 : Caractéristiques du SELFRAG Lab [5]

En faisant varier les paramètres du réacteur, nous cherchons à optimiser la technologie des puissances pulsées pour des niveaux d'énergie minimums et des fragmentations sélectives optimales. L'objectif est de développer pour ARTEMISE une stratégie industrielle fiable

techniquement et rentable économiquement, pour le traitement en fin de vie des dispositifs d'éclairage à technologie LED. Ceci d'une part en atteignant un taux de recyclage de 80% (plateaux à LED, cartes électroniques, plastiques non bromés, métaux ferreux et métaux non ferreux) et d'autre part en isolant et massifiant les composants LEDs, en vue de récupérer les terres rares, les métaux précieux et stratégiques. La Figure 3-30 illustre la composition d'une puce à LED sur son support métallique. Les fils d'alimentation en or suscitent des convoitises du monde académique et industriel. Ces éléments seraient extraits par la technologie d'hydrométallurgie. Ce procédé est en cours d'élaboration et d'optimisation universitaire, par l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Paris, dans le cadre de la Chaire Mines Urbaines [51].



Figure 3-30 : Puce à LED et ses éléments constitutifs [52]

3.6.2. Protocole expérimental pour les dispositifs E27 en plastique

Les essais expérimentaux des dispositifs E27 ont été réalisés de la manière suivante :

1. Le récipient est placé dans l'outil SELFRAG Lab, au niveau de l'électrode inférieure. Puis, il est rempli d'un volume d'eau déminéralisée de 2,78 L (Figure 3-31) ;
2. La lampe E27, préalablement pesée puis percée à deux endroits au niveau du bulbe, est positionnée dans le récipient. Elle est maintenue immergée dans l'eau au fond du récipient (Figure 3-32) ;
3. Les paramètres process : distance inter-électrodes (mm), nombre de décharges électriques, fréquence (Hz) et tension (kV) sont renseignés. Puis l'expérimentation est lancée : « Start processing » (Figure 3-33) ;
4. Des arcs électriques sont ensuite produits dans le récipient, entraînant la fragmentation sélective de la lampe ;
5. L'expérimentation est arrêtée lorsque toutes les décharges sont appliquées sur la lampe : « Finish processing » ;
6. Le récipient est retiré du SELFRAG Lab et les constituants élémentaires sont récupérés (Figure 3-34) ;
7. Les sous-produits sont séchés à 80°C durant 15 minutes, pour être ensuite pesés.

Les lampes E27 en plastique, de dimensions 110 mm (hauteur) x 40 mm (diamètre), ont été fragmentées unitairement, en mode batch, avec une distance inter-électrodes maintenue constante à 40 mm durant la totalité de l'étude. En effet, les dimensions des échantillons E27 ne permettaient pas d'expérimenter une distance inférieure à 40 mm. Le SELFRAG Lab n'est pas dimensionné pour recevoir des échantillons volumineux²⁶. Rappelons qu'il s'agit d'un outil d'expérimentation usité dans les laboratoires de recherche. L'entreprise SELFRAG dispose de dispositifs permettant de traiter des échantillons plus volumineux en grande quantité, en circuit fermé et en flux continu (plusieurs tonnes/heure), tel que le dispositif PWTS (Pre-Weakening Test Station) [5] [53].

²⁶ Taille maximale des échantillons : 80 mm (d) x 40 mm (h).

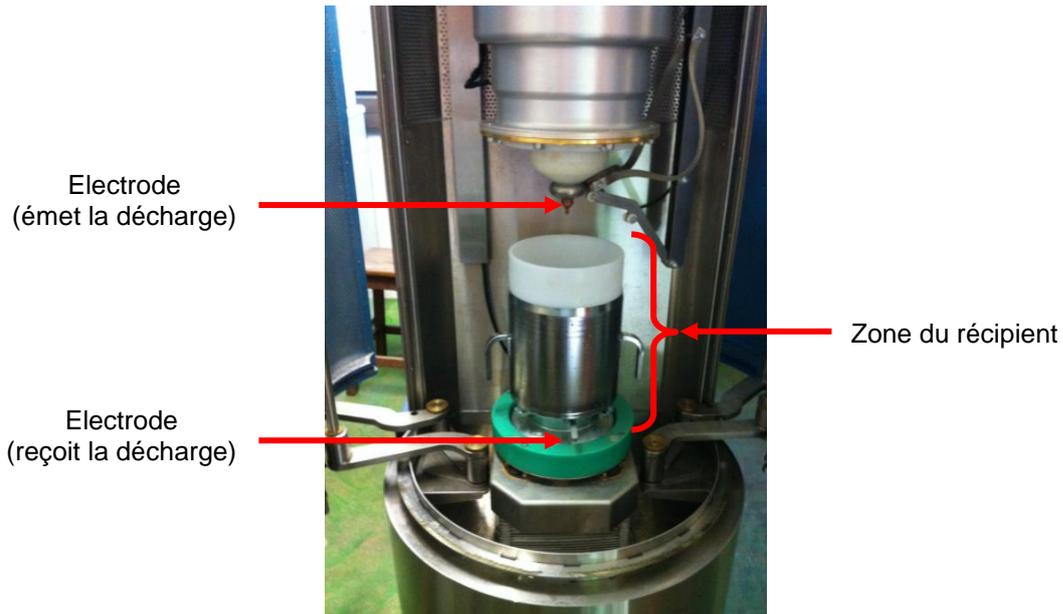


Figure 3-31 : Photographie du récipient dans le SELFRAG Lab

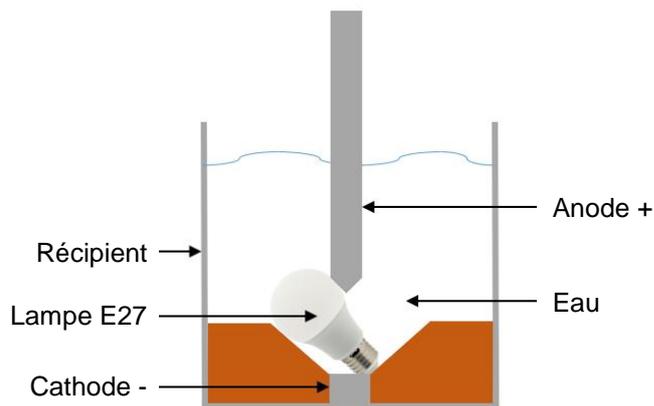


Figure 3-32 : Schéma de la disposition de la lampe E27 dans le récipient

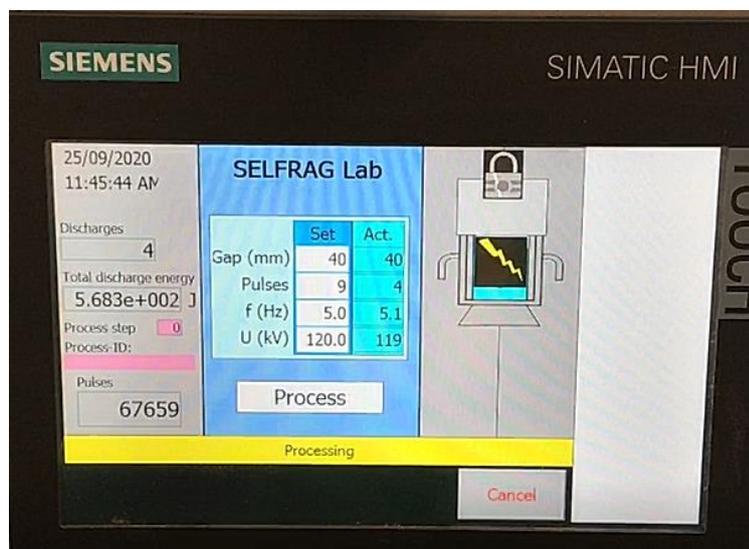


Figure 3-33 : Ecran de contrôle du dispositif SELFRAG Lab



Figure 3-34 : Exemples de photographies de la récupération des constituants élémentaires des lampes E27 en plastique, après le traitement au SELFRAG Lab

Le plan d'expérience, adopté durant l'étude avec le dispositif SELFRAG Lab, est présenté sur la Figure 3-35 ci-dessous.

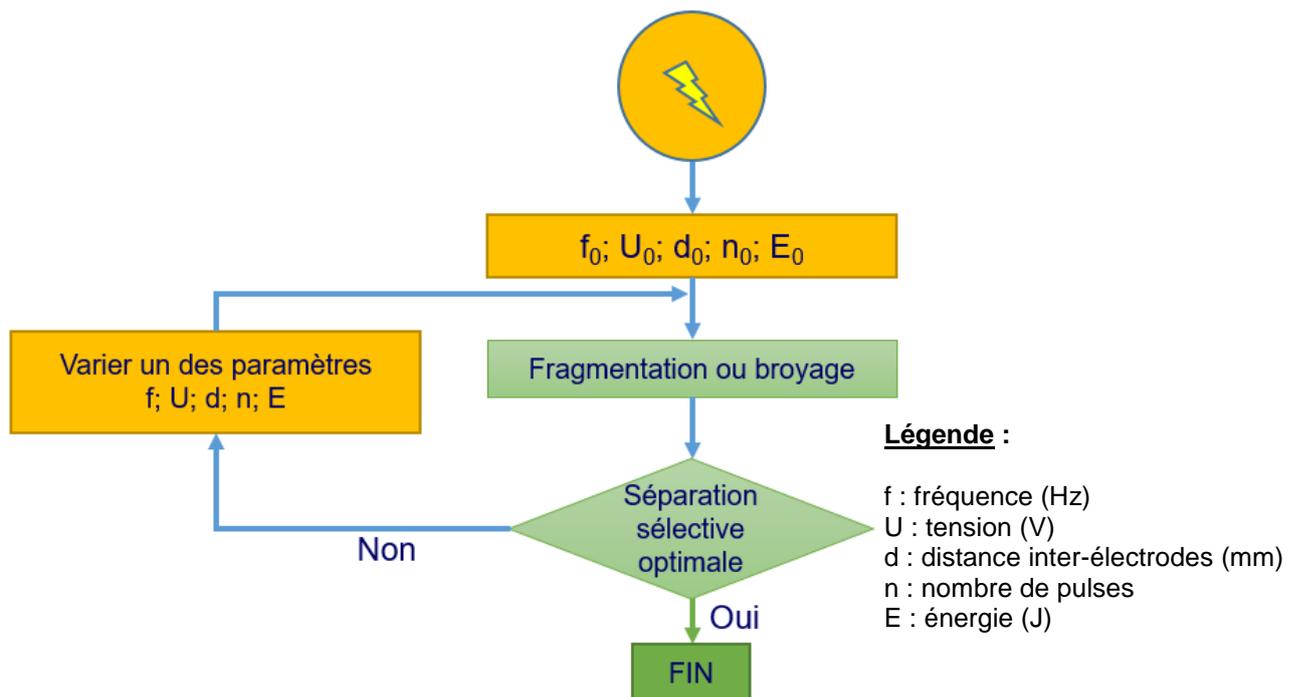


Figure 3-35 : Algorithme de l'étude paramétrique de fragmentation sélective des équipements à LED avec le SELFRAG Lab

Si l'essai induit une fragmentation sélective favorable, les paramètres sus-cités seront validés. A contrario, des itérations seront réalisées afin d'optimiser ces grandeurs. Cette approche empirique, avec ce dispositif laboratoire, nous a permis d'étudier la variation des paramètres suivants : la tension, le nombre de pulses et donc l'énergie (cf. partie 3.3.3). Ce protocole expérimental a rendu possible l'identification des couples (U et n) induisant une fragmentation sélective concluante pour un faible coût énergétique et un temps de traitement optimal, à l'aide du réacteur SELFRAG Lab. Par conséquent, ces séries d'expériences ont mis en exergue la performance technologique optimale du dispositif pour une fragmentation sélective favorable des échantillons de lampes à LED.

3.6.3. Résultats et caractérisation des essais de lampes E27 en plastique

Cette campagne d'essais réalisée à l'échelle laboratoire, avec le dispositif SELFRAG Lab, a permis de fragmenter sélectivement **164 lampes** de type E27 en plastique, représentant un total de **7,7 kg**, soit une masse moyenne de **47,0 ± 11,6 g** par échantillon. Nous avons fait varier différents paramètres, tels que : la tension, le nombre de décharges électriques et la fréquence. Par ailleurs, nous n'avons pu tester que des lampes E27 en plastique, avec des bulbes de diamètre standard (40 mm), en les positionnant en oblique dans le récipient. La Figure 3-32 illustre la disposition d'une lampe E27 dans le récipient. Les lampes E27 en plastique avec des bulbes de grands diamètres (supérieurs à 40 mm) n'ont pas pu être étudiées. Cependant, les paramètres de cette étude pourraient être appliqués à l'ensemble des dispositifs, de structuration mécanique d'assemblage similaire, constitués de bulbes en plastique et de corps en aluminium, enrobés par une matrice en plastique. Ces dispositifs sont les catégories de lampes E27, B22 et E14, représentant environ 55% du gisement (cf. chapitre 2).

La plage de tension appliquée se situe entre 90 kV et 180 kV, avec des décharges électriques allant de 1 à 30 pulses et des fréquences de 5 Hz. Une énergie spécifique moyenne et un écart-type moyen estimés à **6,3 ± 3,4 kWh/t** ont été obtenus pour toute l'étude. Quelques essais à 2,5 Hz ont aussi été expérimentés. Toutefois, ils se sont avérés non concluants, vu la qualité des fragmentations sélectives observées : non séparation du couple bulbe-corps, détérioration importante des drivers et des puces à LED sur les plateaux en aluminium.

Sur la totalité de l'étude, nous avons récupéré **34,2 g** de puces à LED, **1231,1 g** de plateaux à LED et **923,6 g** de cartes électroniques. En appliquant les coefficients de fractions matières obtenus par Marcelo Pilotto Cenci et al., 2020 [54], sur les composants électroniques, nous estimons les quantités en métaux précieux, disponibles dans les échantillons traités. Le Tableau 3-9 et la Figure 3-36 présentent les quantités en constituants élémentaires récupérées dans les drivers, les plateaux et les puces à LED.

Élément	Puces LEDs		Plateaux LEDs		Drivers		Masse totale (g)
	*% massique	Masse (g)	*% massique	Masse (g)	*% massique	Masse (g)	
Argent (Ag)	0,482	0,17	0,004	0,05	0,005	0,04	0,26
Aluminium (Al)	0,252	0,09	54,728	673,97	5,412	49,99	724,05
Cuivre (Cu)	54,647	18,70	2,963	36,16	15,413	142,36	197,22
Fer (Fe)	0,741	0,25	0,380	4,68	10,421	96,25	101,18
Gallium (Ga)	0,381	0,13	-	-	0,061	0,56	0,69
Nickel (Ni)	0,183	0,06	0,038	0,47	0,064	0,59	1,12
Plomb (Pb)	-	-	0,001	0,01	-	-	0,01
Or (Au)	0,052	0,02	0,028	0,34	0,020	0,18	0,54
Etain (Sn)	10,957	3,75	5,827	71,76	13,028	120,33	195,84
Titane (Ti)	0,019	0,01	0,079	0,97	0,058	0,54	1,52
Cérium (Ce)	0,009	0,003	-	-	-	-	0,003
Yttrium (Y)	0,683	0,23	-	-	-	-	0,23
Fibre de verre + résine époxy	31,590	10,81	35,951	442,73	55,519	512,78	966,32
Total	99,99	34,22	99,72	1231,14	100	923,62	2188,98

Tableau 3-9 : Bilan matières des puces LEDs, plateaux LEDs et cartes électroniques des lampes E27 en plastique, pour la totalité des essais (*Pilotto Cenci et al., 2020) [54]

Le nombre de chiffres significatifs a été choisi pour représenter l'ensemble des éléments constitutifs, y compris ceux présents en très faible quantité

Dans son étude, l'auteur a caractérisé unitairement **73 lampes** à LED E27 de différentes marques commercialisées au Brésil (6 x T., 6 x O., 6 x L., 15 x K., 25 x F. et 15 x B.), correspondant à une masse totale de **5,3 kg**. Les corps de ces produits à LED sont constitués d'aluminium et sont enrobés par une matrice en plastique, avec des bulbes de diamètre standard. Puis, par voie chimique et en appliquant des coefficients de pondération à son échantillonnage, il a déduit les pourcentages en métaux précieux et stratégiques [54]. Nous supposons que nos échantillons sont équivalents à ceux de cette étude brésilienne. C'est pourquoi, nous avons choisi d'appliquer des coefficients de métaux précieux identiques.

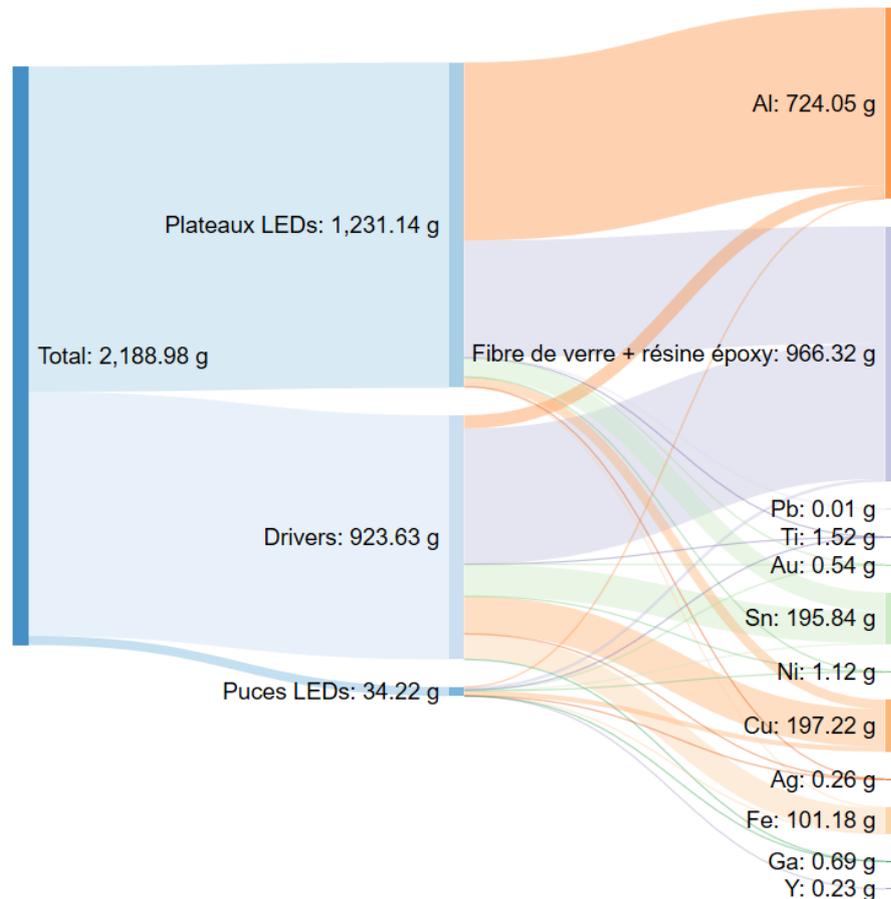


Figure 3-36 : Diagramme de Sankey des métaux précieux et stratégiques récupérés dans les plateaux LEDs, les drivers et les puces LEDs des lampes E27 en plastique, pour la totalité des essais

La cartographie des essais est répertoriée en bleu sur la Figure 3-37, représentant l'ensemble des domaines expérimentés. Ceci a permis de déterminer les zones favorables de fragmentation sélective, illustrées en orange. Une fragmentation sélective est considérée concluante pour la typologie E27 plastique, si nous observons :

- Une séparation totale du bulbe avec le corps de la lampe ;
- Une séparation totale du plateau à LED, avec plus de 50% des puces à LED encore positionnées sur leur support en aluminium ;
- Une séparation totale du driver à la fois au niveau du plateau à LED (soudé ou emboîté) et du culot (soudé) ;
- Un culot encore apparié avec le corps de la lampe.

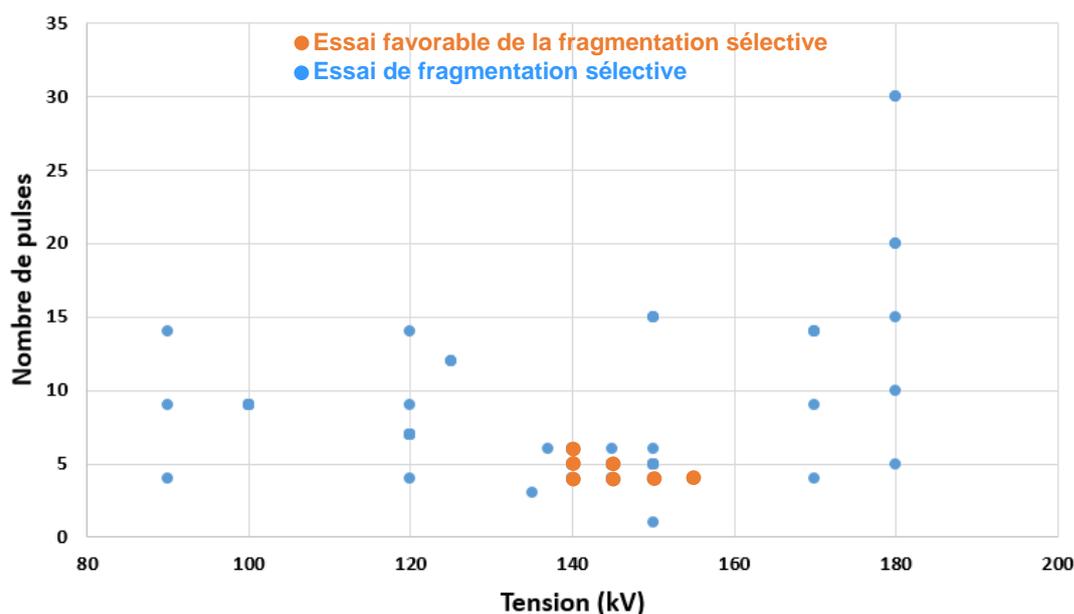


Figure 3-37 : Cartographie de l'ensemble des essais de fragmentation sélective des lampes E27 en plastique, au SELFRAG Lab

En somme, afin de juger de la validité d'un essai de fragmentation, nous devons considérer la notion de reproductibilité des expérimentations. C'est pourquoi, pour les couples de tension-nombre de pulses dont la fragmentation sélective est la plus favorable, des séries de huit expériences ont été effectuées.

Notre choix s'est porté sur huit essais, car nous étions limités dans le temps. Le BRGM nous a gracieusement prêté le dispositif SELFRAG Lab, pendant deux semaines. Durant la première semaine, nous avons établi la cartographie générale et durant la seconde, nous avons validé par des itérations les essais des couples favorables (cf. Figure 3-37). Au total, **sept séries d'essais se sont avérées concluantes**, avec une énergie spécifique moyenne et un écart-type moyen estimés à $5,2 \pm 0,6$ kWh/t.

Le Tableau 3-10 récapitule l'ensemble des paramètres appliqués pour les **56 essais** des couples favorables, comprenant les calculs des écart-types (σ) des énergies. La Figure 3-38 illustre les fragmentations sélectives des séries favorables A à G. Remarquons, par ailleurs, que durant toute cette étude, les essais ont été réalisés avec la même lampe de référence E27 en plastique.

Série	Nombre d'essais	Tension (kV)	Nombre de pulses	Energie machine moyenne (J)	σ (J)	Durée essai (s)	Puissance moyenne (W)	Energie spécifique moyenne (kWh/t)	σ (kWh/t)
A	8	145	5	917	209	1,0	830	5,7	1,3
B	8	140	6	995	155	1,2	740	6,2	1,0
C	8	140	5	863	163	1,0	730	5,5	1,0
D	8	140	4	732	190	0,8	830	4,6	1,2
E	8	145	4	800	112	0,8	890	5,0	0,7
F	8	150	4	760	54	0,8	830	4,8	0,4
G	8	155	4	769	94	0,8	830	4,9	0,5

Tableau 3-10 : Récapitulatif des 7 séries d'essais de couples favorables (tension-nombre de pulses), de la fragmentation sélective des lampes E27 en plastique



Figure 3-38 : Exemples de photographies des 7 séries d'essais A à G, des fragmentations sélectives favorables pour les lampes E27 en plastique

En analysant la Figure 3-38, nous remarquons nettement, pour ces sept séries d'essais, une séparation totale des bulbes du reste des corps des lampes, des plateaux de LEDs (avec plus de 50% des puces encore appariées sur leur support) et des drivers (initialement soudés et/ou emboîtés entre les plateaux à LED et les culots). Certains culots restent sertis aux corps des lampes, mais peuvent présenter une séparation totale et/ou partielle. Cela n'est aucunement rédhibitoire car ces derniers seront triés, puis broyés mécaniquement pour une valorisation matière. Le comportement à la fragmentation sélective reste reproductible pour les sept séries favorables, avec une conductivité électrique stable, en moyenne $10,5 \pm 0,9 \mu\text{S/cm}$, et une énergie de libération relativement homogène, en moyenne $0,863 \pm 0,164 \text{ kJ}$. Le Tableau 3-11 récapitule les conductivités électriques et les énergies moyennes des fragmentations obtenues au SELFRAG Lab, pour les sept séries favorables.

Série	Tension (kV)	Conductivité moyenne ($\mu\text{S/cm}$)	Energie machine moyenne (kJ)
A	145	10,3	0,902
B	140	9,4	1,119
C	140	10,8	0,843
D	140	12,1	1,030
E	145	10,0	0,694
F	150	9,7	0,748
G	155	10,9	0,705

Tableau 3-11 : Récapitulatif de la tension, de la conductivité et de l'énergie machine, pour les 7 séries de couples favorables, de la fragmentation sélective des lampes E27 en plastique

Les Figures 3-39 et 3-40 présentent une homogénéité des grandeurs physiques, avec des comportements semblables, entre les différentes séries réalisées. Cela reposerait sur la fracturation partielle et/ou la non-fracturation des composants électroniques (cartes électroniques et puces à LED), dont les métaux précieux et stratégiques qui les composent, n'auraient pas été extraits en leur sein. Ce qui aurait pour conséquence la faible variation de la conductivité électrique de la solution dans le réacteur. Dès lors, nous pouvons admettre que les composants électroniques, ainsi récupérés, pourraient être valorisés pleinement pour le scénario de réutilisation et/ou réparation et/ou feraient l'objet d'une valorisation matière spécifique, puisqu'ils sont encore relativement en bon état.

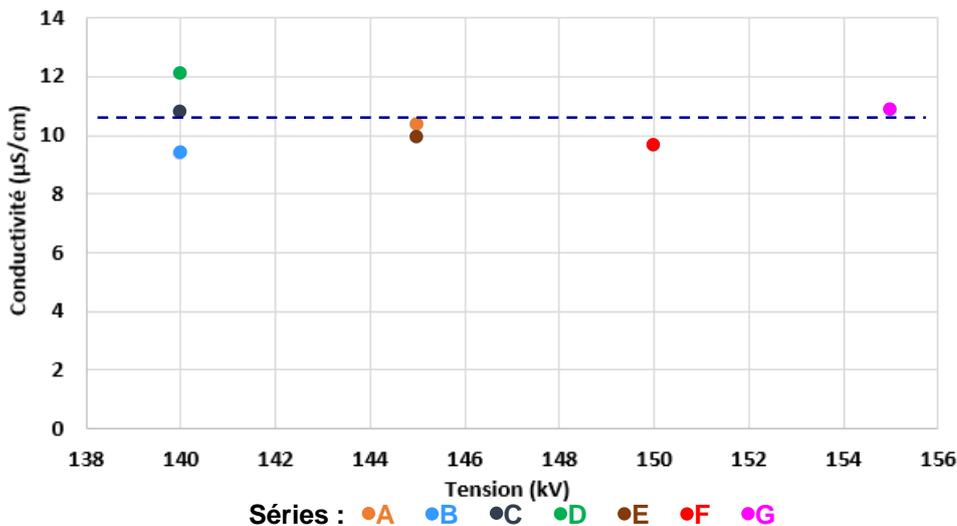


Figure 3-39 : Conductivité en fonction de la tension, pour les 7 séries favorables des couples tension-nombre de pulses

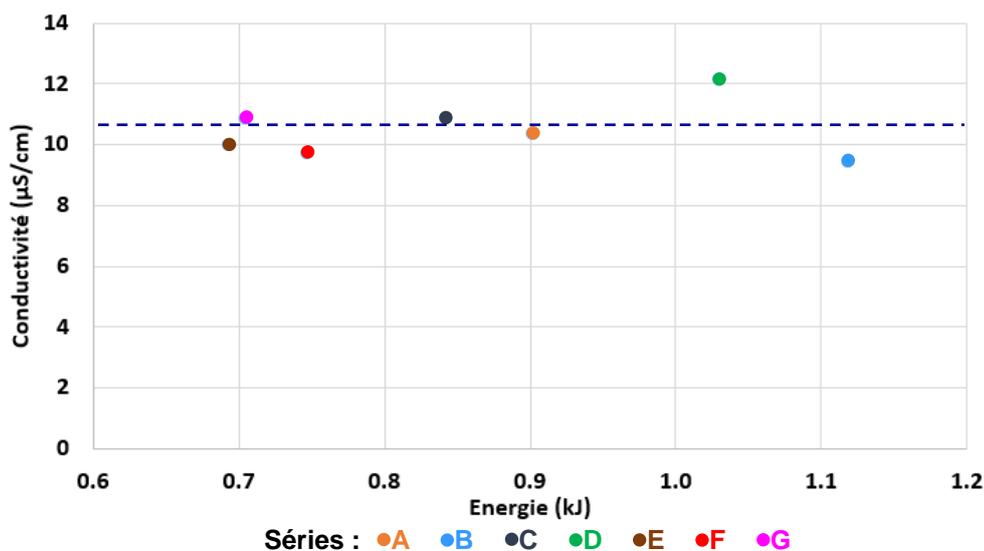


Figure 3-40 : Conductivité en fonction de l'énergie, pour les 7 séries favorables des couples tension-nombre de pulses

3.6.3.1. Libération sélective des éléments constitutifs

Le Tableau 3-12 et la Figure 3-41 montrent les libérations sélectives des éléments constitutifs des lampes E27, sur la base d'inspections visuelles. Pour chacune des séries favorables, le critère considéré est l'observation des séparations totales entre les sous-produits : les bulbes, les plateaux LEDs (avec au minimum 50% des puces appariées sur le support) et les drivers.

Série	% de fragmentation sélective			
	Bulbes	Supports LEDs	Drivers	Libération totale
A	60	70	80	70
B	88	100	100	96
C	25	50	100	58
D	63	38	38	46
E	38	50	75	54
F	75	50	75	67
G	63	63	38	54
Moyenne A-G	59	60	72	64
Moyenne étude totale	57	58	64	60

Tableau 3-12 : Récapitulatif des fragmentations sélectives des éléments constitutifs des lampes E27, pour les 7 séries favorables des couples tension-nombre de pulses

Dans l'ensemble, les résultats de ces sept séries LEDS expérimentales sont très encourageants. Nous constatons une libération globale moyenne estimée à **64%** correspondant à une énergie spécifique moyenne et un écart type moyen évalués à **5,2 ± 0,6 kWh/t** (cf. Tableau 3-10). La série B présente, par exemple, un pourcentage total moyen de libération apprécié à **96%** avec des composants électroniques en très bon état et avec une énergie spécifique moyenne évaluée à **6,2 ± 1,0 kWh/t**.

Sur la totalité des essais réalisés, la moyenne de libération est de l'ordre de **60%**. Les séries A, B et F sont au-dessus de cette valeur et la série D est, quant à elle, nettement en dessous de la moyenne générale de libération, avec un total de fragmentation estimé à 46%. Malgré quelques dispersions, nos essais restent très prometteurs, pour apprécier un futur prototype pré-industriel, pour traiter ce type de gisement, avec notamment un récipient de taille plus importante et donc plus adapté pour les déchets à LED. Cette solution potentielle permettrait, par ailleurs, d'augmenter et donc de mieux optimiser les distances entre les électrodes, pour garantir un chemin de décharge électrique optimal dans l'eau. De ce fait, elle développerait un arc électrique suffisant pour une fragmentation sélective efficace, en fonction des typologies de déchets à LED à traiter.

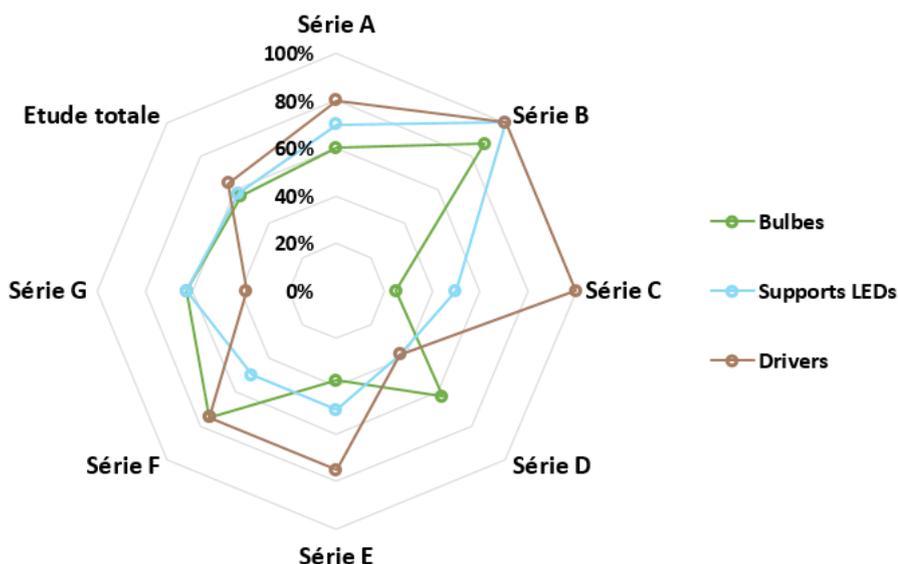


Figure 3-41 : Graphique récapitulatif des fragmentations sélectives des éléments constitutifs des lampes E27, pour les 7 séries favorables des couples tension-nombre de pulses

En considérant la totalité des 151 essais, dont 138 ont été réalisés avec un seul échantillon et 13 avec 2 échantillons, nous évaluons le pourcentage total moyen de fragmentation sélective de l'ordre de 60%, correspondant à une énergie spécifique moyenne de **6,3 ± 3,4 kWh/t**. Cette campagne d'essais a montré, avec l'outil SELFRAG Lab, le potentiel de la technologie de fragmentation électrodynamique à libérer **7,70 kg** puis à récupérer **7,68 kg** de constituants élémentaires, avec un pourcentage de pertes estimé à **0,26%**. La Figure 3-42 expose les quantités récupérées en matériaux et composants constitutifs, sur les différents niveaux d'énergie expérimentés, dans une approche de traitement unitaire, en mode batch, du produit à LED E27 en plastique. Cette catégorie représenterait plus de 30% du gisement des dispositifs au cours de la décennie (cf. chapitre 2).

La principale contrainte technique, pour le traitement de ce type de produit, est l'inclusion d'air dans les bulbes, formant ainsi une « chambre à air ». Pour pouvoir déconstruire ces dispositifs, à l'aide de la technologie des puissances pulsées, un traitement préalable est nécessaire. Sans une action préliminaire de perçage des systèmes optiques, les dispositifs E27 en plastique auront tendance à flotter à la surface de la chambre de réaction, rendant ainsi la trajectoire de l'arc électrique inefficace. Ceci provoquerait une situation de « court-circuit », dans laquelle le chemin de la décharge électrique n'impacterait que partiellement, voire pas du tout le produit. Toute l'énergie électrique serait alors concentrée au niveau de la contre-électrode. Dans une interprétation finale du processus, la fragmentation électrodynamique induirait une onde de choc (situation de fragmentation électrohydraulique) qui viendrait fragmenter les échantillons par génération de contraintes internes, telles que les forces de compression [6]. En raison de notre système type laboratoire, nous n'avons pas pu explorer cette voie, disponible notamment chez SELFRAG, sur le processus de traitement à flux continu PWTS.

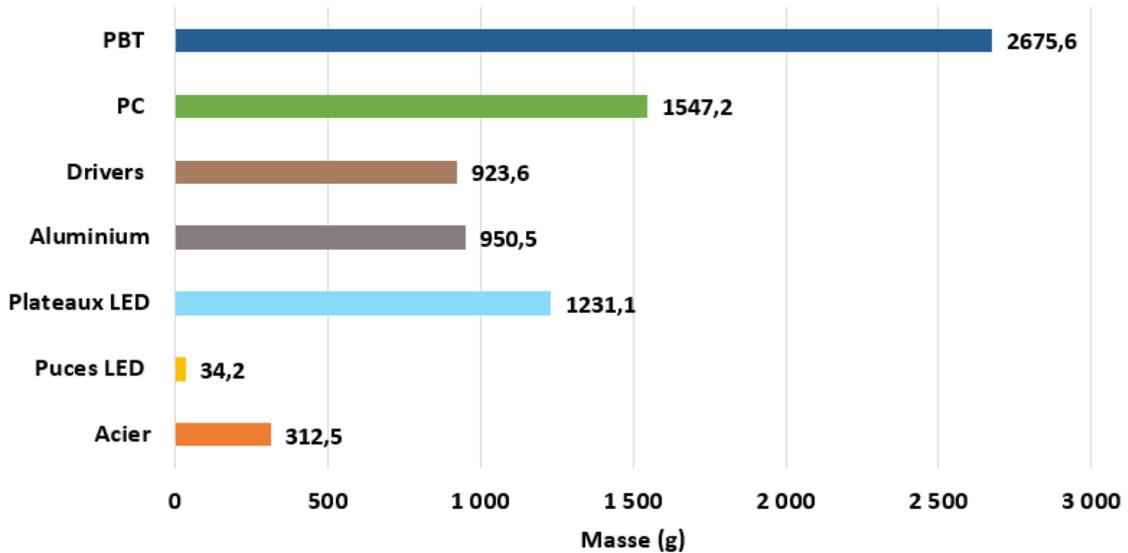


Figure 3-42 : Quantités des éléments constitutifs récupérés par la fragmentation sélective des E27, pour la totalité des essais

Nous avons également évalué la notion de reproductibilité, des sept séries d'essais favorables identifiées, concernant la libération totale des plateaux de LEDs (avec plus de 50% des puces encore disposées sur les plateaux) et des drivers. Les résultats sont récapitulés sur la Figure 3-43. La reproductibilité est estimée à $78 \pm 13\%$ pour les supports LEDs et à $64 \pm 17\%$ pour les cartes électroniques. Cette notion est primordiale pour juger de la validé ou non d'une série d'essais avec le SELFRAG Lab. En effet, nous avons constaté sur des essais, avec des modes opératoires et des paramètres strictement identiques, des variations importantes dans la libération de ces éléments constitutifs (supports LEDs libérés avec toutes les puces attachées ou détachées, supports LEDs non libérés avec les puces détachées ou parfois même fracturées, drivers séparés entièrement et relativement en bon état, drivers non séparés et toujours soudés ou emboîtés aux plateaux de LEDs et aux culots, drivers déchetés, etc.). C'est pour cela que nous avons, par voie de conséquence, comptabilisé toutes les puces qui sont restées appariées aux plateaux de LEDs, après la fragmentation sélective. Sur la totalité de l'étude, **65%** des puces à LED sont toujours disposées sur leur support en aluminium. En considérant les sept séries favorables, nous comptabilisons **75%** des puces encore disponibles après la fragmentation sélective, soit une optimisation de 10%.

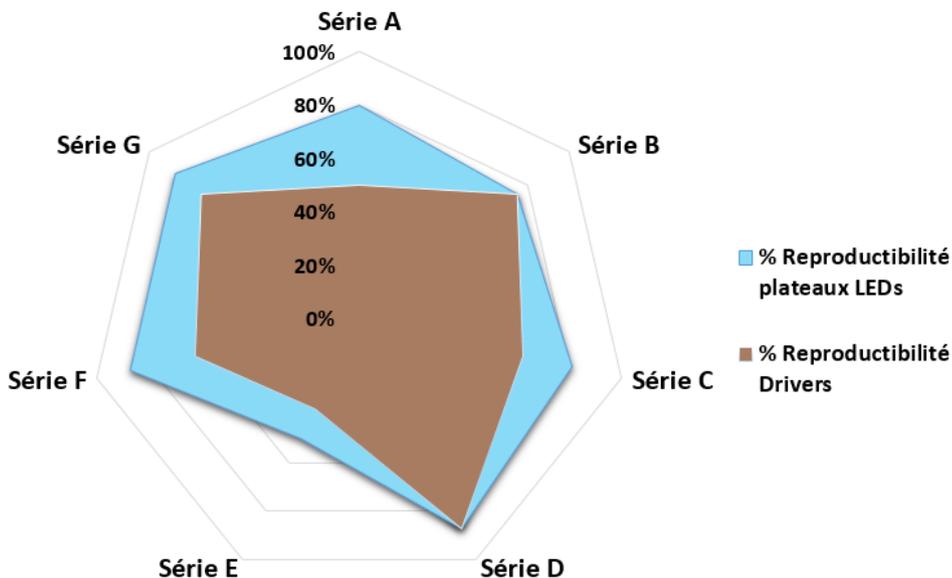


Figure 3-43 : Graphique récapitulatif de la reproductibilité des séries d'essais des fragmentations sélectives des E27, pour les 7 séries favorables des couples tension-nombre de pulses

Pour une meilleure valorisation dans le cadre des scénarii de réutilisation et/ou de recyclage, il serait préférable d'avoir les puces toujours appariées sur leur support. Ceci afin de faciliter l'étape de tri et donc d'augmenter potentiellement le taux de récupération. Nous évaluons un classement des séries grâce aux pourcentages de reproductibilité de libération, d'une part des plateaux LEDs et d'autre part des drivers : la série D avec des pourcentages identiques de **88%**, la série G avec 88% et 75% (moyenne **82%**), la série F avec 88% et 63% (moyenne **76%**), la série B avec des pourcentages similaires de **75%**, la série C avec 81% et 63% (moyenne **72%**), la série A avec 80% et 50% (moyenne **65%**) et enfin la série E avec 50% et 38% (moyenne **44%**).

Notre analyse a également porté sur la notion de fracturation des éléments constitutifs, par des inspections visuelles des sous-produits. Dès lors qu'une amorce de fracturation est observée sur un élément fragmenté, cette dernière est comptabilisée. Les analyses statistiques de ce critère sont synthétisées sur la Figure 3-44 et dans le Tableau 3-13. Nous constatons qu'aucun plateau LEDs n'est fracturé dans le cadre des sept séries favorables et seulement 1% le sont durant la totalité des essais. Les bulbes, les corps et les culots ont subi de nombreuses fracturations durant les essais. 59% des bulbes sont fracturés durant l'ensemble de l'étude, contre 63% pour les sept séries favorables. 100% des corps sont fracturés pour la totalité de l'étude menée, mais également pour les séries favorables. Concernant les culots, 65% sont fracturés pour tous les essais, contre 69% pour les couples des séries favorables. Mais ceci n'est aucunement préjudiciable, car ces derniers seront amenés à être valorisés seulement par le broyage mécanique puis par le recyclage, à la suite de la fragmentation sélective (cf. chapitre 4). En conséquence, ce sont les drivers qui attirent toute notre attention. Ces composants devront, autant que possible, subir le moins de détérioration lors de leur libération des dispositifs E27 en plastique, afin d'obtenir une meilleure valorisation matière et améliorer ainsi le potentiel de valorisation de l'entreprise.

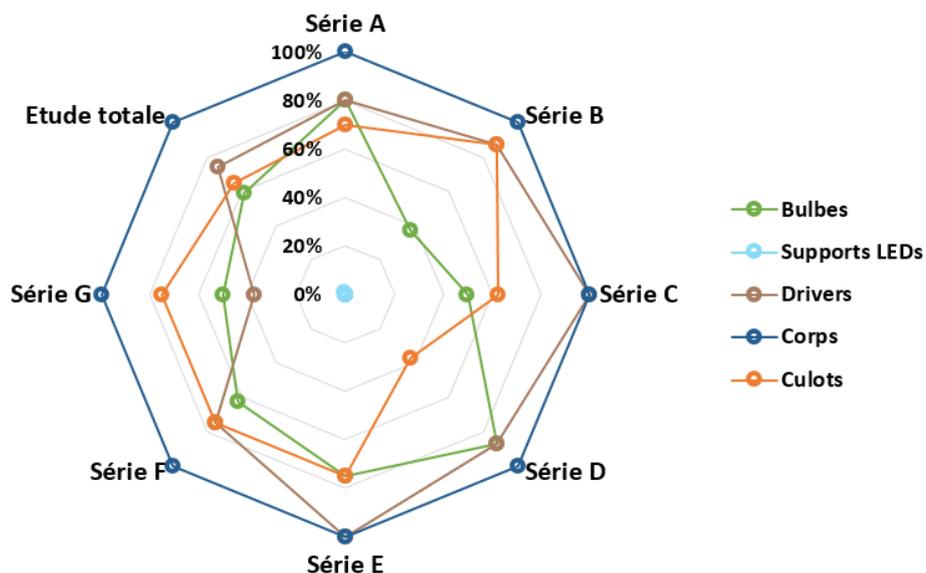


Figure 3-44 : Graphique récapitulatif de la fracturation des éléments constitutifs par la fragmentation sélective des E27, pour les 7 séries favorables des couples tension-nombre de pulses

En considérant les sept séries favorables, la plus faible fracturation des drivers observée est estimée à **38%** (série G). Nous avons, d'ailleurs, **100%** des drivers fracturés dans les séries C et E. En moyenne, **81%** des drivers ont été fracturés dans les séries favorables, contre **74%** dans la totalité de l'étude. Nous concluons de ce fait que le recyclage ne pourra être que l'unique scénario de valorisation des drivers. A partir de nos résultats, la réutilisation de ce type de composant électronique, pour la fabrication ou la réparation d'autres systèmes d'éclairage à LED, n'est pas envisageable à ce stade de notre étude exploratoire. Il aurait été intéressant d'expérimenter cette opportunité avec le dispositif de fragmentation sélective à flux continu PWTS, disponible chez SELFRAG, sur leur site de Kerzers en Suisse.

Série	% de fracturation des éléments				
	Bulbes	Supports LEDs	Drivers	Corps	Culots
A	80	0	80	100	70
B	38	0	88	100	88
C	50	0	100	100	63
D	88	0	88	100	38
E	75	0	100	100	75
F	63	0	75	100	75
G	50	0	38	100	75
Moyenne A-G	63	0	81	100	69
Moyenne étude totale	59	1	74	100	65

Tableau 3-13 : Récapitulatif de l'état de fracturation des éléments constitutifs par la fragmentation sélective des E27, pour les 7 séries favorables des couples tension-nombre de pulses

3.6.3.2. Etat des corps et des composants électroniques

Pour mener à bien une étude exhaustive, nous avons considéré l'état des corps en aluminium recouverts d'un revêtement en polymère (PBT). Une analyse visuelle a été apportée sur l'ensemble des corps des échantillons, dont les critères examinés sont l'enfoncement ainsi que le perçage, dus aux décharges électriques appliquées, lors du traitement dans le réacteur SELFRAG Lab. La Figure 3-45 expose des exemples d'échantillons de lampes E27 fragmentés.

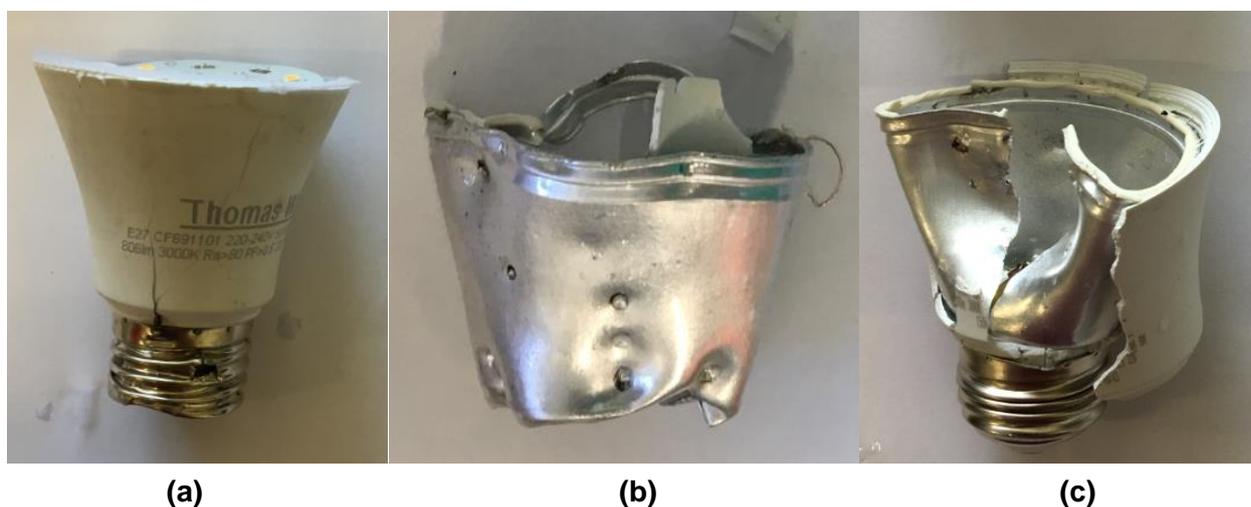


Figure 3-45 : Exemples de photographies de l'état des corps par la fragmentation sélective des E27 : Corps non détérioré (a), corps enfoncé-non percé (b) et corps enfoncé-percé (c)

Le Tableau 3-14 et la Figure 3-46 récapitulent les résultats des fragmentations sélectives des corps des produits E27. Dans le cas des séries de couples (tension-nombre de pulses) favorables, nous obtenons **97%** des corps qui ont été enfoncés (soit **3%** non déformés) et **76%** des corps qui ont été percés (soit **24%** non perforés). En considérant les corps dans la globalité de l'étude, **90%** ont été enfoncés et **68%** ont été percés. De ce fait, nous sommes en mesure d'affirmer que dans le cas des séries de couples favorables, les énergies de fragmentation ont été « optimisées », afin que

les décharges électriques traversent davantage les échantillons, pour l'obtention de séparations sélectives convenables, et ce, comparativement à la totalité de l'étude réalisée.

Série	% de fragmentation des corps			
	Enfoncé	Non enfoncé	Percé	Non percé
A	90	10	80	20
B	100	0	100	0
C	88	13	50	50
D	100	0	75	25
E	100	0	75	25
F	100	0	63	38
G	100	0	88	13
Moyenne A-G	97	3	76	24
Moyenne étude totale	90	10	68	32

Tableau 3-14 : Récapitulatif de l'état des corps par la fragmentation sélective des E27, pour les 7 séries favorables des couples tension-nombre de pulses

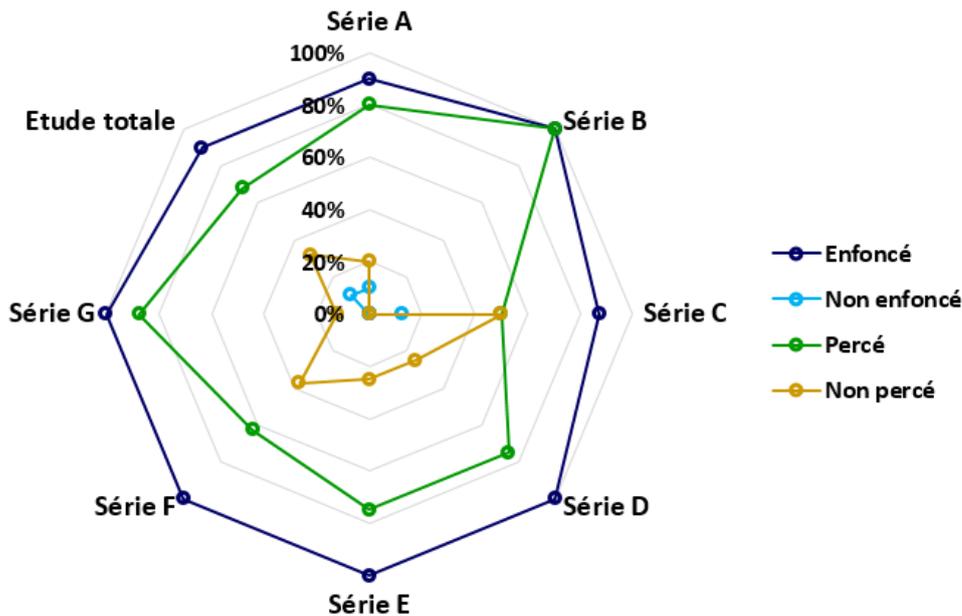


Figure 3-46 : Graphique récapitulatif de l'état des corps par la fragmentation sélective des E27, pour les 7 séries favorables des couples tension-nombre de pulses

Par ailleurs, nos observations ont été portées sur les composants électroniques qui constituent la valeur ajoutée de tels équipements. C'est pourquoi, nous avons analysé non seulement la fragmentation sélective des plateaux LEDs, mais aussi celle des drivers. Le Tableau 3-15 et la Figure 3-47 présentent les résultats obtenus pour les supports LEDs. Le Tableau 3-16 et la Figure 3-48 exposent ceux des drivers. La société ARTEMISE orientera son outil de traitement industriel des équipements à LED, en fonction de la capacité de la technologie des puissances pulsées à fragmenter sélectivement et à préserver l'intégrité physique de ces composants électroniques. Cette analyse est indispensable pour améliorer et optimiser le potentiel de valorisation de l'entreprise.

Série	% de fragmentation des plateaux LEDs			
	Très bon état 75-100%	Bon état 50-75%	Mauvais état 25-50%	Très mauvais état 0-25%
A	60	20	10	10
B	63	13	0	25
C	75	13	0	12
D	88	0	13	0
E	50	0	38	13
F	75	13	0	13
G	38	50	13	0
Moyenne A-G	65	15	10	10
Moyenne étude totale	56	13	10	21

Tableau 3-15 : Récapitulatif de l'état des plateaux LEDs par la fragmentation sélective des E27, pour les 7 séries favorables des couples tension-nombre de pulses

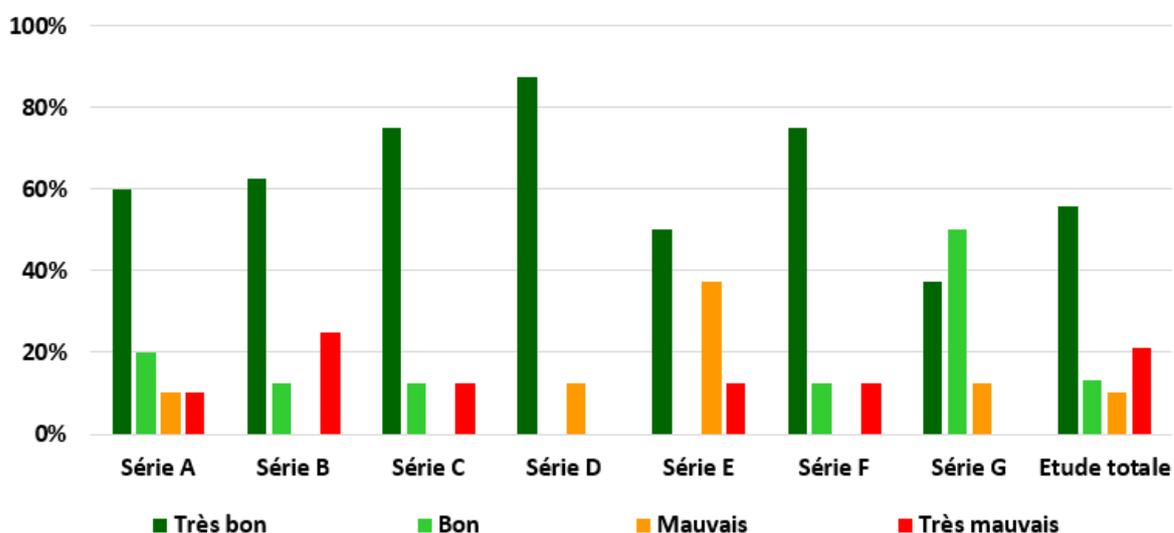


Figure 3-47 : Graphique récapitulatif de l'état des plateaux LEDs par la fragmentation sélective des E27, pour les 7 séries favorables des couples tension-nombre de pulses

Série	% de fragmentation des drivers			
	Très bon état Aucune fracturation	Bon état Faible fracturation	Mauvais état Importante fracturation	Très mauvais état Fracturation totale
A	40	10	10	40
B	25	50	0	25
C	38	25	25	13
D	38	50	0	13
E	0	38	25	38
F	25	38	0	38
G	50	25	13	13
Moyenne A-G	31	34	10	25
Moyenne étude totale	24	28	17	31

Tableau 3-16 : Récapitulatif de l'état des drivers par la fragmentation sélective des E27, pour les 7 séries favorables des couples tension-nombre de pulses

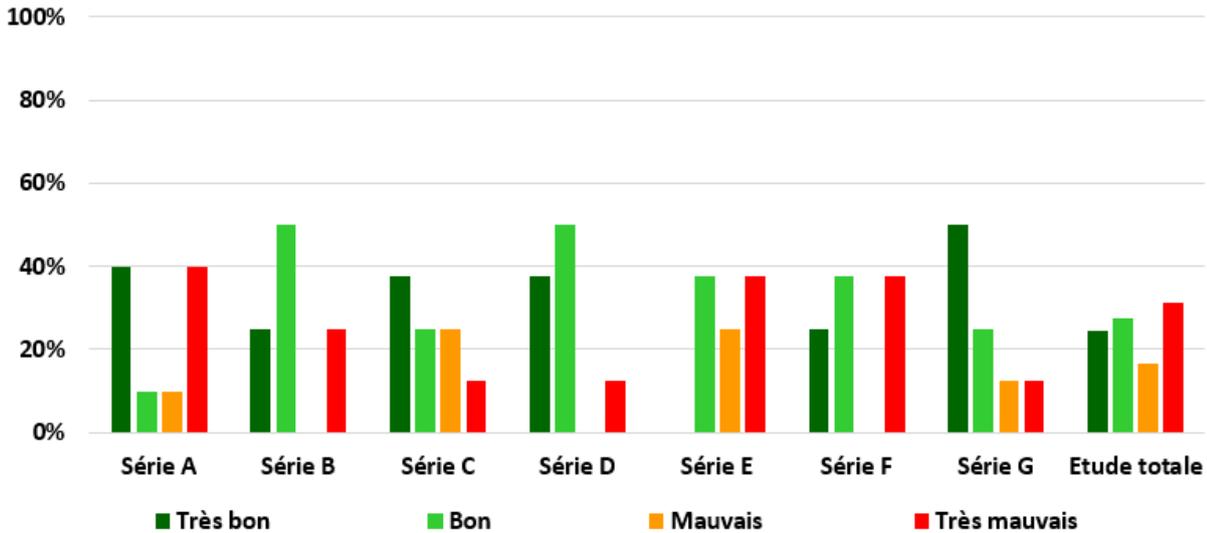


Figure 3-48 : Graphique récapitulatif de l'état des drivers par la fragmentation sélective des E27, pour les 7 séries favorables des couples tension-nombre de pulses

Dans ces deux analyses des séries de couples favorables (résumées dans le Tableau 3-10), les critères de fragmentation considérés sont les états des composants électroniques, à l'issue des tirs : très bon, bon, mauvais et très mauvais. Pour les plateaux LEDs, nous avons calculé le pourcentage des puces restées appariées sur leur support en aluminium. Il est considéré très bon, lorsque ce pourcentage est compris entre 75-100%, bon entre 50-75%, mauvais entre 25-50% et très mauvais avec moins de 25% des puces positionnées sur leur plateau. La Figure 3-49 montre des exemples de pourcentages de puces appariées sur leur plateau. Concernant les drivers, nous avons examiné visuellement l'état des composants électroniques (bobines, condensateurs, transformateurs, etc.) : très bon avec aucune fracturation, bon avec une faible fracturation, mauvais avec une importante fracturation et très mauvais avec une fracturation totale des drivers. La Figure 3-50 illustre des exemples des états de drivers, à l'issue des traitements dans l'outil SELFRAG Lab.

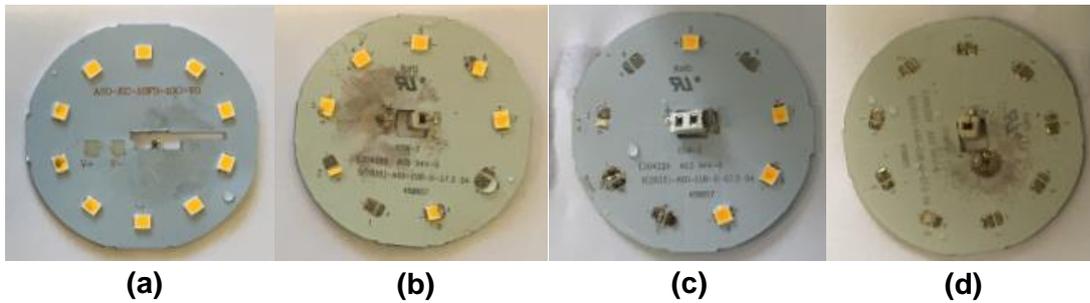


Figure 3-49 : Exemples de pourcentage des puces LEDs appariées sur les plateaux LEDs des E27 : 100% (a), 67% (b), 44% (c) et 0% (d)

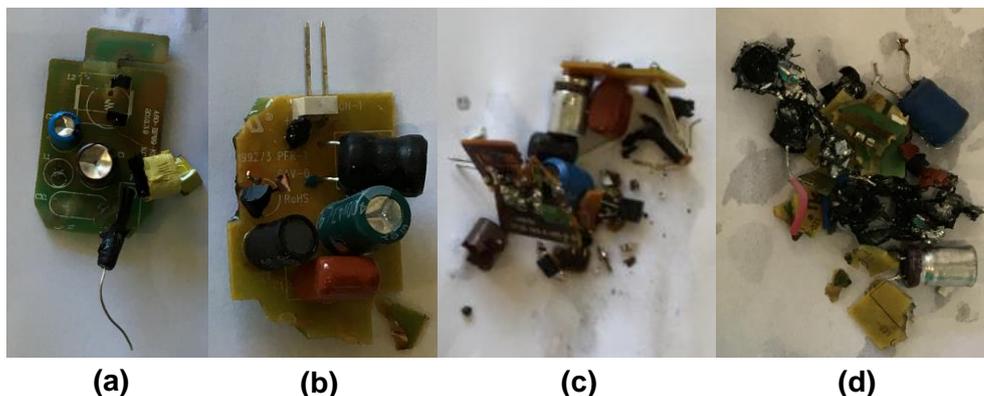


Figure 3-50 : Exemples des états de drivers des E27 : Très bon (a), bon (b), mauvais (c) et très mauvais (d)

L'état des plateaux LEDs, pour les séries favorables, est comptabilisé comme suit : **65%** en très bon état, **15%** en bon état, **10%** en mauvais état et **10%** en très mauvais état, contre respectivement pour l'ensemble de l'étude : **56%**, **13%**, **10%** et **21%**. En regroupant les critères, nous relevons que **80%** des plateaux LEDs sont en très bon et bon état pour les séries favorables, contre **69%** pour la totalité des essais. De la même manière, nous évaluons à **20%** les plateaux LEDs en mauvais et très mauvais état pour les séries favorables, contre **31%** des plateaux LEDs pour l'étude globale. Nous pouvons, dès lors, affirmer que les énergies ont été « optimisées » pour maximiser la libération des plateaux LEDs, et ce, en évitant leur détérioration, ce qui amplifiera leur potentiel de valorisation matière et/ou énergétique.

L'état des composants des drivers, pour les séries favorables, est observé de la manière suivante : **31%** en très bon état, **34%** en bon état, **10%** en mauvais état et **25%** en très mauvais état, contre respectivement pour l'ensemble de l'étude : **24%**, **28%**, **17%** et **31%**. De manière analogue, en regroupant les critères, nous estimons à **65%** les drivers en très bon et bon état pour les séries favorables, contre **52%** pour la totalité de la campagne d'essais. Nous évaluons à **35%** les drivers en mauvais et très mauvais état pour les séries favorables, contre **48%** des drivers pour l'étude globale. Si bien que, nous affirmons doublement, grâce à ces deux analyses, que les énergies des séries favorables maximisent la libération des composants électroniques, tout en minimisant leurs dégradations physiques.

Par ailleurs à l'issue des essais, nous avons remarqué que l'état des puces LEDs, appariées sur leur support en aluminium, pourrait favoriser deux scénarii : la réutilisation (pour la fabrication de nouveaux dispositifs d'éclairage à LED par exemple) et/ou la valorisation matière (recyclage). Néanmoins, l'état des drivers ne pourrait favoriser que leur recyclage. En effet, les dommages causés, par la fragmentation sélective électrodynamique du SELFRAG Lab, détériorent leurs composants électroniques, de telle manière que ces derniers ne soient aucunement réutilisables. Pour envisager un tel scénario de réutilisation des drivers ou de leurs composants, seule la séparation manuelle des dispositifs LEDs serait envisageable. Notre deuxième étude porte sur la fragmentation de la typologie GU10, représentant 22% du gisement (cf. chapitre 2).

3.6.4. Protocole expérimental pour les dispositifs GU10 en plastique

Le mode opératoire des essais expérimentaux des dispositifs GU10 en plastique est similaire à celui des lampes E27 en plastique, à l'exception des systèmes optiques des spots n'ayant pas été percés avant leur immersion dans le récipient. La Figure 3-51 schématise la disposition d'un spot GU10 dans ce dernier.

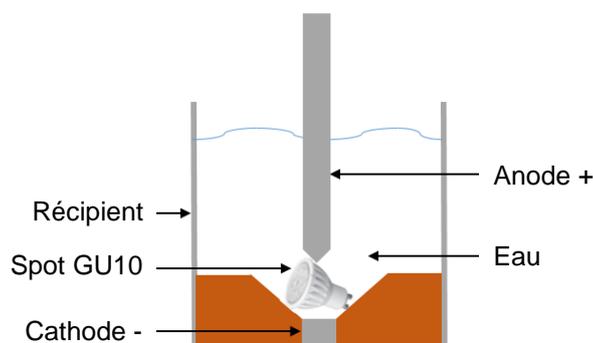


Figure 3-51 : Schéma de la disposition du spot GU10 dans le récipient

Par ailleurs, les dimensions des spots étant de 55 mm (hauteur) x 50 mm (diamètre), la distance inter-électrodes a également été maintenue constante à 40 mm, durant la totalité de la campagne d'essais. Les spots GU10 ont également été fragmentés unitairement, en mode batch, dans l'outil

SELFRAG Lab. Pour une meilleure appréciation des résultats, les conditions expérimentales de la fragmentation sélective des spots GU10 sont donc comparables à celles des lampes E27. Cette approche a été choisie pour détecter les limites de la technologie à libérer les composants électroniques et les éléments constitutifs, sur les deux typologies de dispositifs à LED. Cela permet de mieux appréhender et ainsi comprendre comment les variations mécaniques, des structures d'assemblage et des matériaux de ces dispositifs, peuvent affecter leur traitement de déconstruction.

3.6.5. Résultats et caractérisation des essais de spots GU10 en plastique

Cette seconde campagne d'essais avec l'outil laboratoire, a permis de fragmenter sélectivement **215 spots** GU10 en plastique correspondant à une masse totale de **10 kg**, soit une masse moyenne de **46,5 ± 10 g** par échantillon. Nous avons également fait varier la tension et le nombre de décharges électriques. En ce qui concerne la fréquence, elle a été maintenue constante à 5 Hz. Notons que les paramètres de cette étude pourront également s'appliquer à la catégorie des spots GU5.3, qui ne diffèrent des dispositifs GU10 que par la forme des vis de leur culot. En conséquence, environ 25% du gisement est concerné par cette étude (cf. chapitre 2).

La plage de tension appliquée se situe entre 90 kV et 180 kV, avec des décharges électriques réparties entre 5 et 20 pulses. Une énergie spécifique moyenne et un écart-type moyen estimés à **14,8 ± 8,6 kWh/t** ont été obtenus pour toute l'étude. La cartographie de l'ensemble des essais est répertoriée en bleu sur la Figure 3-52, représentant les domaines expérimentés. Ceci a permis de déterminer les zones favorables de déconstruction sélective, illustrées en orange. Une fragmentation est considérée concluante pour la typologie GU10 plastique, si nous obtenons :

- Une séparation totale du système optique avec le corps du spot ;
- Une séparation totale du plateau à LED, avec plus de 50% des puces à LED encore positionnées sur leur support en aluminium ;
- Une séparation totale du driver à la fois au niveau du plateau à LED (soudé ou emboîté) et du culot (soudé) ;
- Les vis du culot séparés du corps.

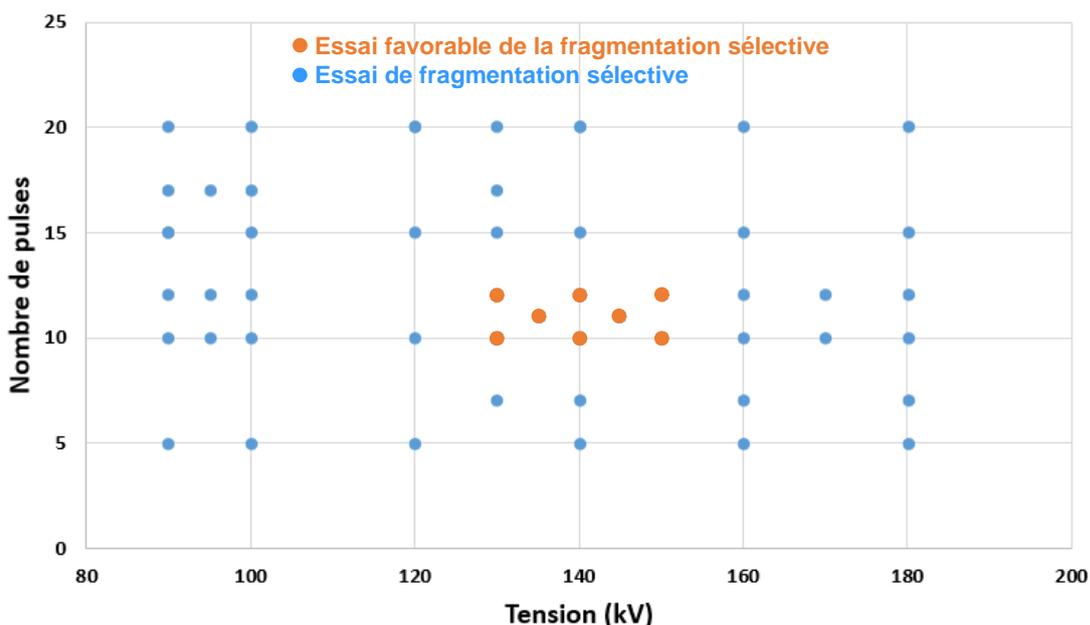


Figure 3-52 : Cartographie de l'ensemble des essais de fragmentation sélective des spots GU10 en plastique, au SELFRAG Lab

En outre, afin de juger de la validité d'un essai de fragmentation, nous devons aussi considérer la notion de reproductibilité des expérimentations. C'est pourquoi, pour les couples de tension-nombre de pulses dont la fragmentation sélective est la plus favorable, des séries de dix-sept²⁷ expériences ont été effectuées. Au total, **huit séries d'essais se sont avérées concluantes**, avec une énergie spécifique moyenne et un écart-type moyen estimés à **13,9 ± 2,5 kWh/t**. Le Tableau 3-17 récapitule l'ensemble des paramètres appliqués pour les **136 essais** des couples favorables, comprenant les calculs des écart-types (σ) des énergies. La Figure 3-53 illustre les fragmentations sélectives pour chacune des séries favorables A à H.

Série	Nombre d'essais	Tension (kV)	Nombre de pulses	Energie machine moyenne (kJ)	σ (kJ)	Durée essai (s)	Puissance moyenne (kW)	Energie spécifique moyenne (kWh/t)	σ (kWh/t)
A	17	130	10	1,7	0,5	2,0	0,857	10,8	3,5
B	17	140	10	2,1	0,5	2,0	1,069	14,6	4,5
C	17	150	10	2,5	0,6	2,0	1,228	16,8	4,7
D	17	130	12	2,4	0,4	2,4	0,980	15,2	4,9
E	17	140	12	2,3	0,7	2,4	0,954	13,9	4,2
F	17	150	12	2,8	0,7	2,4	1,167	17,1	7,4
G	17	135	11	1,9	0,4	2,2	0,879	10,7	2,4
H	17	145	11	2,4	0,4	2,2	1,092	12,4	3,4

Tableau 3-17 : Récapitulatif des 8 séries d'essais de couples favorables (tension-nombre de pulses), de la fragmentation sélective des spots GU10 en plastique

En analysant la Figure 3-53, pour ces huit séries d'essais de couples favorables, nous observons distinctement une séparation totale des systèmes optiques du reste des corps des spots, des plateaux de LEDs (avec plus de 50% des puces encore positionnées sur leur support) et des drivers (initialement soudés et/ou emboîtés entre les plateaux LEDs et les culots). Les deux vis des culots sont détachées des corps, mais peuvent parfois rester appariées aux drivers. Cela n'est aucunement dommageable pour leur traitement, car ces éléments seront triés puis valorisés avec les drivers, afin de recycler leurs matériaux constitutifs.



²⁷ Contrairement à l'étude sur les lampes E27, nous avons pu reproduire plus d'essais sur la même durée (deux semaines), car nous maîtrisons le dispositif SELFRAG Lab.



Figure 3-53 : Exemples de photographies des 8 séries d'essais A à H, des fragmentations sélectives favorables pour les spots GU10 en plastique

3.6.5.1. Libération sélective des éléments constitutifs

Le Tableau 3-18 et la Figure 3-54 illustrent les libérations sélectives des éléments constitutifs des spots GU10, sur la base d'inspections visuelles. Pour chacune des séries favorables, le critère considéré est l'observation des séparations totales entre les sous-produits : les systèmes optiques, les plateaux LEDs (avec au minimum 50% des puces appariées sur le support) et les drivers.

Série	% de fragmentation sélective			
	Systèmes optiques	Supports LEDs	Drivers	Libération totale
A	96	64	60	73
B	100	83	83	89
C	94	78	78	83
D	94	94	83	91
E	100	89	84	91
F	100	100	100	100
G	100	100	100	100
H	100	100	100	100
Moyenne A-H	98	89	86	91
Moyenne étude totale	93	77	72	81

Tableau 3-18 : Récapitulatif des fragmentations sélectives des éléments constitutifs des spots GU10, pour les 8 séries favorables des couples tension-nombre de pulses

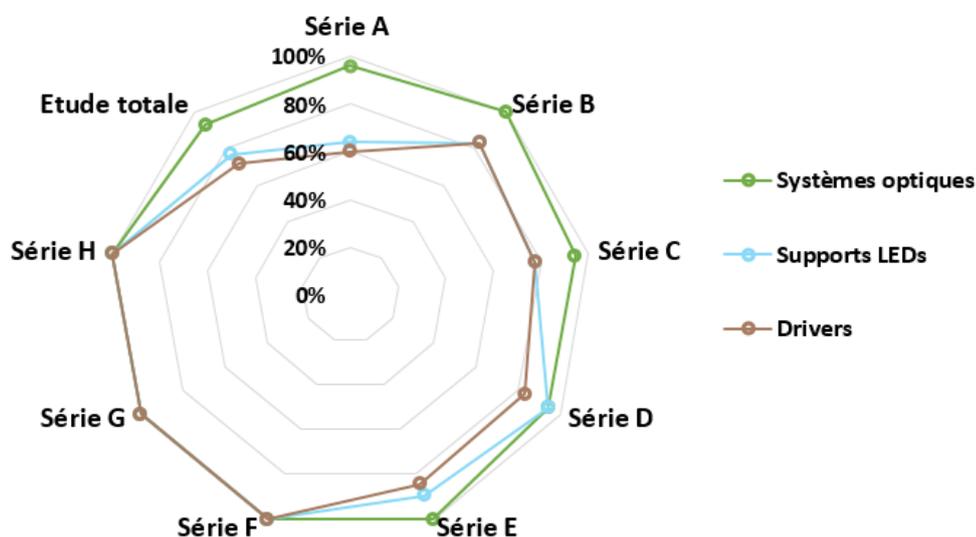


Figure 3-54 : Graphique récapitulatif des fragmentations sélectives des éléments constitutifs des spots GU10, pour les 8 séries favorables des couples tension-nombre de pulses

Des résultats très prometteurs sont obtenus sur l'ensemble de l'étude, avec une moyenne de libération des éléments appréciée à 81%. Concernant les séries favorables, la moyenne de fragmentation sélective est optimisée à 91%, correspondant à une énergie spécifique moyenne et un écart type moyen estimés à $13,9 \pm 2,5$ kWh/t. Les séries F, G et H présentent des valeurs de libération moyennes évaluées à 100%, avec des composants électriques en très bon état et avec

des énergies spécifiques moyennes évaluées respectivement à **17,1 ± 7,4 kWh/t**, **10,7 ± 2,4 kWh/t** et **12,4 ± 3,4 kWh/t**. Ces résultats sont présentés dans le Tableau 3-17. Seule la série A affiche une moyenne de libération inférieure à la moyenne générale de l'étude, appréciée à 73%. Cette dispersion n'affecte en rien le potentiel de cette solution technologique, pour le traitement de cette typologie de déchets à LED.

En comparant la fragmentation sélective moyenne des lampes E27 (**60%** pour une énergie spécifique estimée à **6,3 ± 3,4 kWh/t**), avec celle des spots GU10 (**81%** pour une énergie spécifique évaluée à **14,8 ± 8,6 kWh/t**), nous constatons que la libération des éléments est majorée de 21% dans le cas des spots. Cependant, elle est aussi fonction de l'énergie de libération totale appliquée, qui est plus élevée de 135%. Si l'énergie appliquée sur les lampes E27 avait été équivalente, nous les aurions déchetées. Par conséquent, nous concluons que la structuration mécanique d'assemblage des spots GU10 est plus robuste, avec par exemple des plateaux LEDs qui sont vissés dans les corps, alors qu'ils sont seulement collés, dans le cas des lampes E27.

215 essais ont été réalisés sur la typologie LED des spots GU10, dans cette campagne d'essais qui a démontré le potentiel de la technologie de fragmentation électrodynamique. En effet, elle a permis de libérer **10 kg**, puis de récupérer **9,7 kg** de constituants élémentaires, avec un taux de perte apprécié à **3,3%**. La Figure 3-55 expose les quantités récupérées, en matériaux et composants électroniques, sur les différents niveaux d'énergies expérimentés, dans une approche de traitement unitaire, en mode batch, du produit à LED GU10 en plastique.

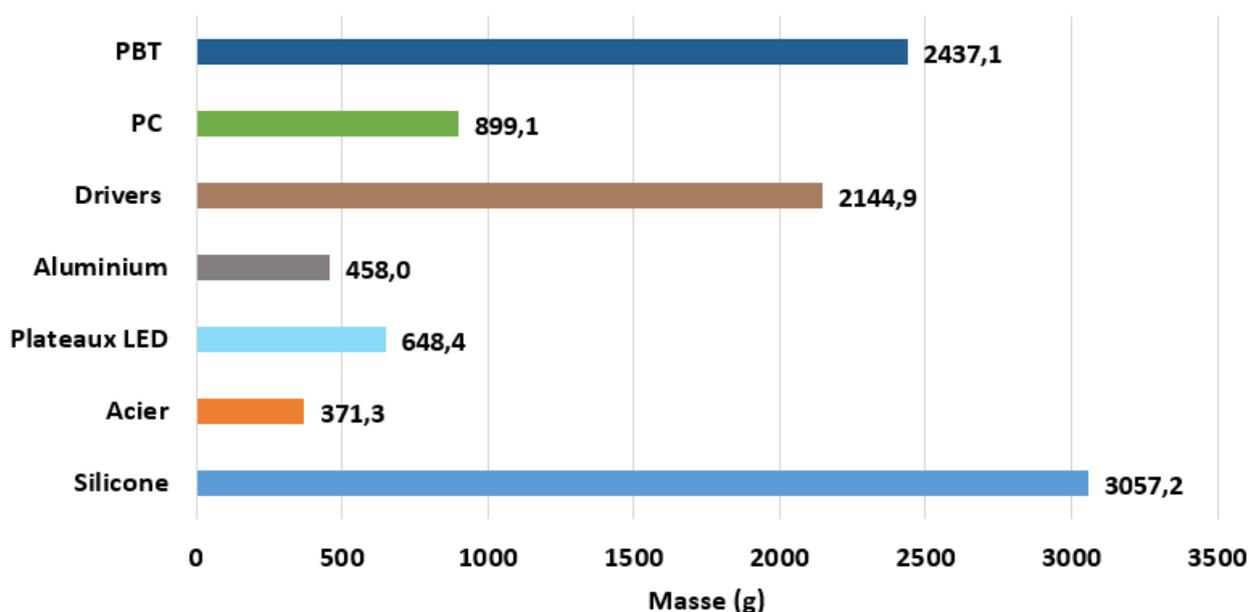


Figure 3-55 : Quantités des éléments constitutifs récupérés par la fragmentation sélective des GU10, pour la totalité des essais

Nous avons également constaté, par ailleurs, que certains produits GU10 ont tendance à flotter à la surface du récipient. Ce qui rend leur fragmentation impossible lors des essais. Le traitement préalable de perçage, au niveau du système optique et/ou du corps, ne modifie en rien ce constat. Nous pensons que l'origine de cette observation serait liée à la nature du système d'assemblage de ces dispositifs et donc à leur structuration mécanique. Leurs géométries et les matériaux constitutifs utilisés présenteraient de faibles densités. Les dispositifs flottants provoqueraient un état de « court-circuit » et rendraient la trajectoire de l'arc électrique inefficace. Le chemin de l'arc électrique n'impacterait donc pas les échantillons situés dans la chambre de réaction. Toute l'énergie serait alors déchargée au niveau de la contre-électrode positionnée au fond du récipient. Contrairement aux dispositifs à LED E27, dont le bulbe forme une inclusion d'air en créant une « chambre à air » qui est solutionnée par une action de perçage du système optique en deux points,

le traitement des spots GU10 est plus complexe et nécessite d'avoir un produit « d'origine » non flottant. Dans notre étude laboratoire, cette contrainte technique a été l'inconvénient majeur au démantèlement de la typologie des spots à LED GU10 en plastique.

Similairement aux lampes E27, nous avons évalué la notion de reproductibilité des huit séries d'essais favorables identifiées, concernant la libération totale des plateaux de LEDs (avec plus de 50% des puces encore appariées sur les plateaux) et des drivers. Les résultats sont synthétisés sur la Figure 3-56. La reproductibilité est estimée à $72 \pm 21\%$ pour les supports LEDs et à $89 \pm 10\%$ pour les cartes électroniques. Cette notion est essentielle pour entériner ou non la validité d'une série d'essais. Au total, **60%** des puces à LED sont toujours disposées sur leur support en aluminium. En considérant les huit séries favorables, nous comptabilisons **71%** des puces encore appariées sur leur plateau, après la fragmentation sélective, soit une bonification de 11%.

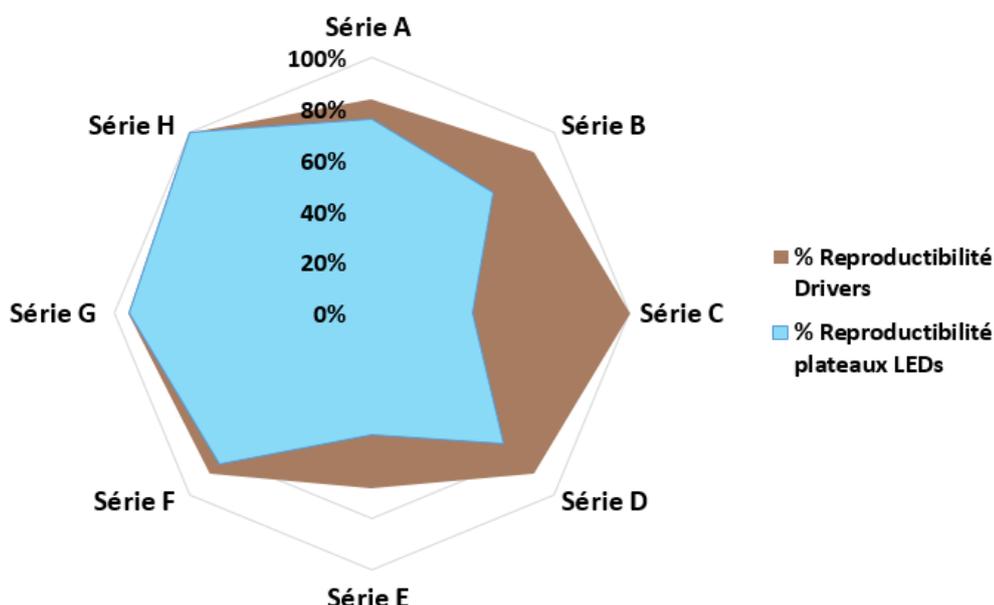


Figure 3-56 : Graphique récapitulatif de la reproductibilité des séries d'essais des fragmentations sélectives des GU10, pour les 8 séries favorables des couples tension-nombre de pulses

Dans le cadre des scénarii de réutilisation et/ou de recyclage, il serait plus avantageux d'avoir les puces toujours soudées sur leur support en aluminium. Cela permettra de faciliter principalement l'étape de tri et donc d'augmenter davantage le taux de valorisation matière. Similairement aux lampes E27, nous déduisons un classement des séries à partir des pourcentages de reproductibilité de libération, d'une part des plateaux LEDs et d'autre part des drivers : la série H avec des pourcentages identiques de **100%**, la série G avec des pourcentages identiques de **94%**, la série F avec 83% et 89% (moyenne **86%**), la série D avec 72% et 89% (moyenne **81%**), la série A avec 76% et 84% (moyenne **80%**), la série B avec 67% et 89% (moyenne **78%**), la série C avec 39% et 100% (moyenne **70%**) et pour finir la série E avec 47% et 68% (moyenne **58%**).

Notre analyse a également été portée sur la notion de fracturation des éléments constitutifs, par des inspections visuelles des sous-produits. Dès lors qu'une amorce de fracturation est observée sur un élément fragmenté, cette dernière est comptabilisée. Les analyses statistiques de ce critère sont récapitulées sur la Figure 3-57 et dans le Tableau 3-19. Nous constatons que seulement 1% des plateaux LEDs sont fracturés durant la totalité de l'étude et dans le cadre des séries favorables. Les systèmes optiques et les corps ont également subi de nombreuses fracturations durant les essais. 26% des systèmes optiques sont fracturés durant l'ensemble de l'étude, contre 12% pour les huit séries favorables. Concernant les corps, 93% sont fracturés pour tous les essais, contre 98% pour les couples des séries favorables. Mais ceci n'est aucunement préjudiciable dans cette étude, car ces derniers seront amenés à être valorisés par les traitements de broyage mécanique

puis de recyclage, à la suite de la fragmentation sélective (cf. chapitre 4). Similairement à l'étude des lampes E27, ce sont les drivers qui attirent toute notre attention. Ces derniers devront, dans la mesure du possible, être préservés durant la fragmentation sélective, afin de majorer leur potentiel de valorisation matière et donc la rentabilité économique de l'entreprise, lors de leur vente. Nous faisons état de **62%** des drivers fracturés durant la totalité de l'étude, contre **72%** des drivers fracturés dans le cadre des séries favorables. Ce même constat a déjà été réalisé dans le cadre du traitement des lampes E27 avec en moyenne **74%** des drivers fracturés sur la totalité de l'étude, contre **81%** sur les essais favorables. La détérioration des drivers est plus importante lors des séries favorables, pour les deux typologies de dispositifs LEDs. La plus faible fracturation des drivers obtenue, pour les dispositifs GU10, est estimée à **47%** (série G). De ce fait, nous confirmons doublement que la valorisation des drivers ne pourra être que le scénario de recyclage. La réutilisation n'est pas concevable à ce stade de notre réflexion. Nous aurions pu explorer cette voie par le traitement de nos échantillons avec le réacteur de fragmentation sélective à flux continu PWTS, disponible chez SELFRAG, sur leur site Suisse de Kerzers.

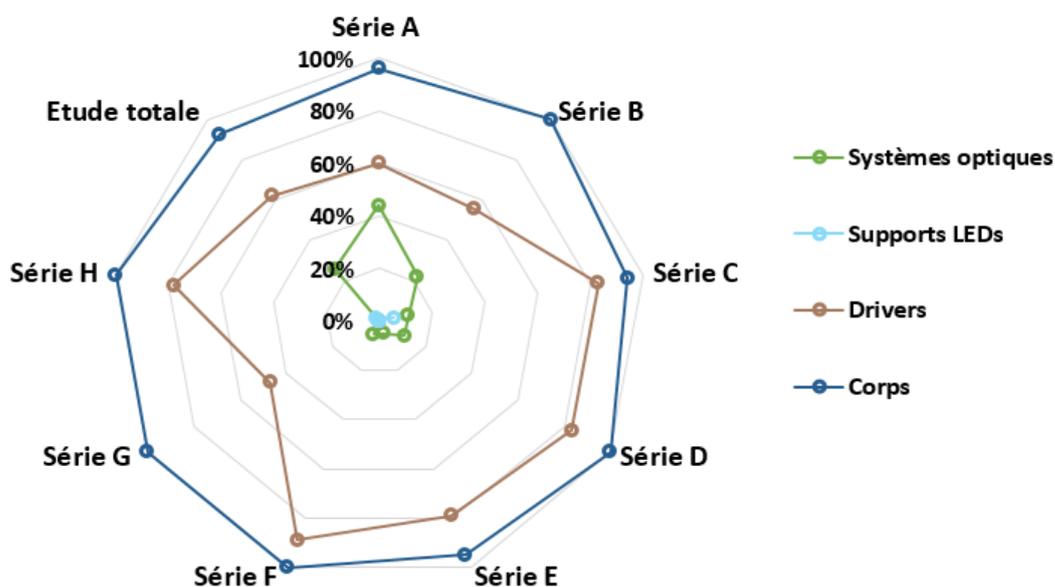


Figure 3-57 : Graphique récapitulatif de la fracturation des éléments constitutifs par la fragmentation sélective des GU10, pour les 8 séries favorables des couples tension-nombre de pulses

Série	% de fracturation des éléments			
	Systèmes optiques	Supports LEDs	Drivers	Corps
A	44	0	60	96
B	22	0	56	100
C	11	6	83	94
D	11	0	83	100
E	5	0	79	95
F	6	0	89	100
G	0	0	47	100
H	0	0	78	100
Moyenne A-H	12	1	72	98
Moyenne étude totale	26	1	62	93

Tableau 3-19 : Récapitulatif de l'état de fracturation des éléments constitutifs par la fragmentation sélective des GU10, pour les 8 séries favorables des couples tension-nombre de pulses

3.6.5.2. Etat des corps et des composants électroniques

Pour réaliser une étude exhaustive, au même titre que celle des lampes E27, nous avons considéré l'état des corps composés entièrement en matériau polymère (PBT) ou constitués en alliage d'aluminium puis recouverts d'un revêtement en plastique. Une analyse visuelle a été effectuée sur l'ensemble des corps des échantillons, dont les critères examinés sont l'enfoncement ainsi que le perçage, dus aux décharges électriques appliquées, lors du traitement dans le réacteur SELFRAG Lab. La Figure 3-58 présente des exemples d'échantillons de spots GU10 fragmentés.

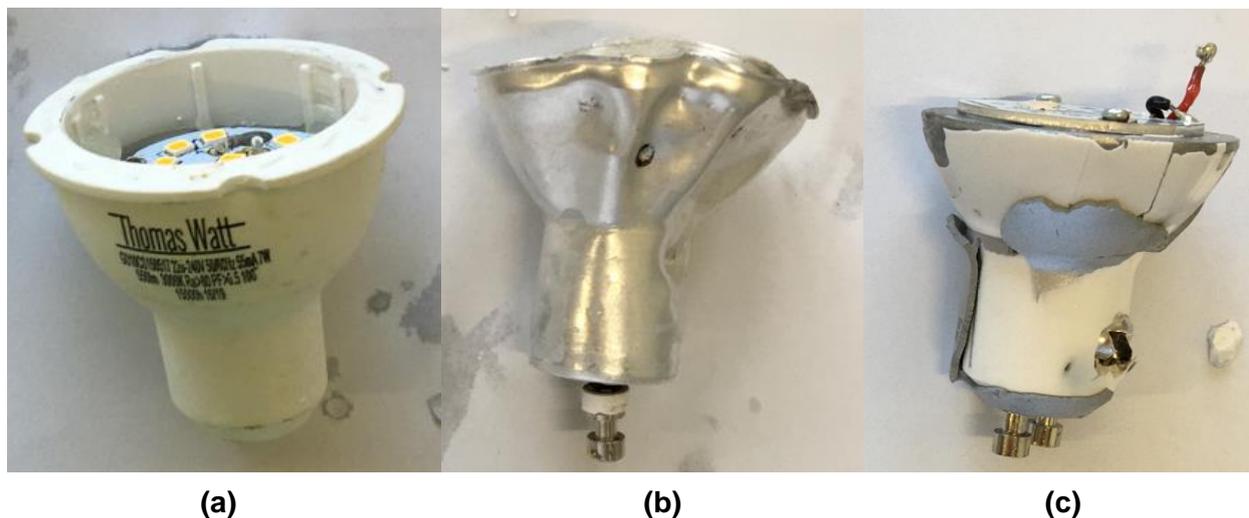


Figure 3-58 : Exemples de photographies de l'état des corps par la fragmentation sélective des GU10 : Corps non détérioré (a), corps enfoncé-non percé (b) et corps enfoncé-percé (c)

Le Tableau 3-20 et la Figure 3-59 synthétisent les résultats des fragmentations sélectives des corps des spots GU10. Dans le cas des séries de couples (tension-nombre de pulses) favorables, nous obtenons **31%** des corps qui ont été enfoncés (soit **69%** non déformés) et seulement **2%** des corps qui ont été percés (soit **98%** non perforés). Sur l'ensemble de l'étude, **22%** des corps ont été enfoncés et **3%** ont été percés. En confrontant ces résultats avec ceux obtenus dans le cadre de l'étude sur les lampes E27 (cf. partie 3.6.3.2), nous constatons une seconde fois, que la structuration mécanique d'assemblage des spots GU10 est plus résistante, et ce, malgré des énergies de fragmentation appliquées plus importantes.

Série	% de fragmentation des corps			
	Enfoncé	Non enfoncé	Percé	Non percé
A	8	92	0	100
B	6	94	0	100
C	22	78	6	94
D	6	94	0	100
E	11	90	0	100
F	28	72	6	94
G	94	6	6	94
H	78	22	0	100
Moyenne A-H	31	69	2	98
Moyenne étude totale	22	78	3	97

Tableau 3-20 : Récapitulatif de l'état des corps par la fragmentation sélective des GU10, pour les 8 séries favorables des couples tension-nombre de pulses

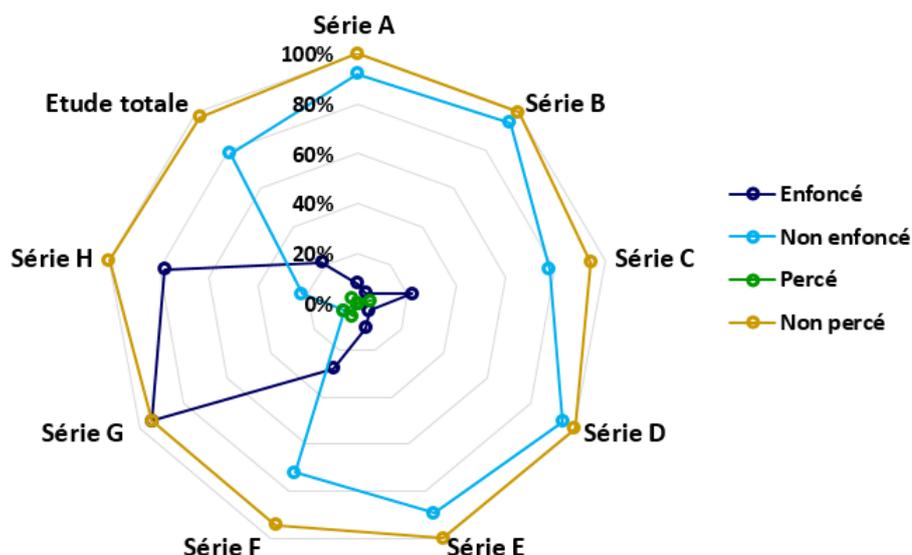


Figure 3-59 : Graphique récapitulatif de l'état des corps par la fragmentation sélective des GU10, pour les 8 séries favorables des couples tension-nombre de pulses

Nos observations se sont focalisées, de surcroît, sur les composants électroniques, qui constituent la valeur ajoutée de tels équipements. Dès lors, nous avons analysé d'une part la fragmentation sélective des plateaux avec leurs puces LEDs et d'autre part celle des drivers avec leurs composants. Le Tableau 3-21 et la Figure 3-60 présentent les résultats obtenus pour les supports LEDs. Le Tableau 3-22 et la Figure 3-61 exposent ceux des drivers. A l'issue des libérations sélectives, les mêmes critères d'évaluation des états des composants électroniques sont considérés (très bon état, bon état, mauvais état et très mauvais état). Ces critères ont été identifiés lors de l'analyse des fragmentations des lampes E27 (cf. partie 3.6.3.2) et ont été appliqués pour les plateaux LEDs et les drivers des dispositifs spots GU10. Nous avons non seulement comptabilisé les puces restées appariées sur leur plateau LEDs, mais aussi examiné visuellement l'état des composants électroniques (bobines, condensateurs, transformateurs, etc.) des cartes électroniques récupérées.

Série	% de fragmentation des plateaux LED			
	Très bon état 75-100%	Bon état 50-75%	Mauvais état 25-50%	Très mauvais état 0-25%
A	56	12	4	28
B	33	22	11	33
C	17	17	17	50
D	61	6	11	22
E	37	21	5	37
F	72	11	0	17
G	88	6	0	6
H	94	6	0	0
Moyenne A-H	57	13	6	24
Moyenne étude totale	55	13	9	23

Tableau 3-21 : Récapitulatif de l'état des plateaux LEDs par la fragmentation sélective des GU10, pour les 8 séries favorables des couples tension-nombre de pulses

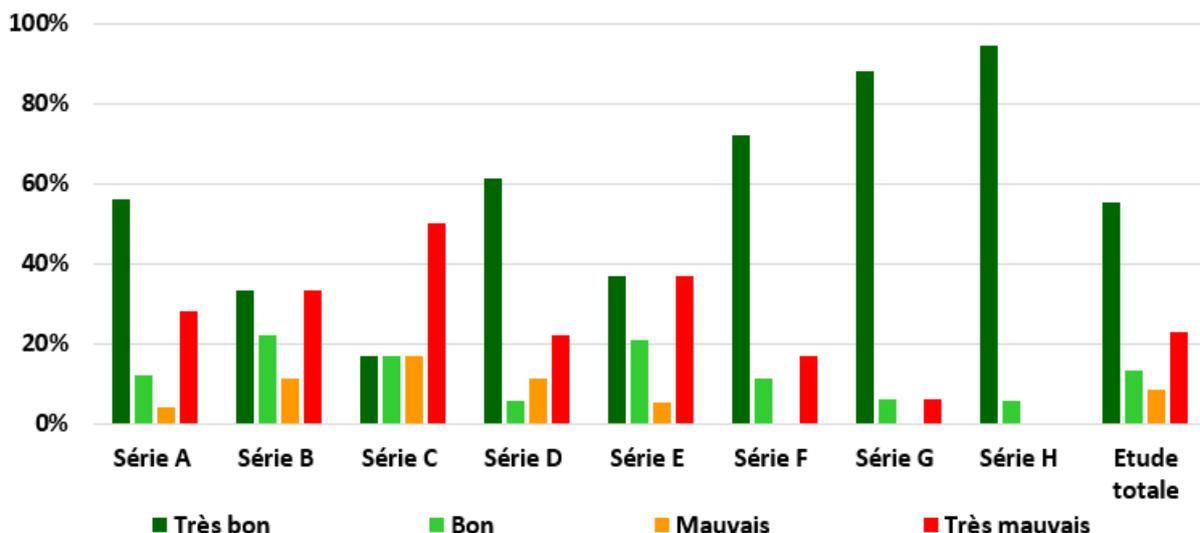


Figure 3-60 : Graphique récapitulatif de l'état des plateaux LEDs par la fragmentation sélective des GU10, pour les 8 séries favorables des couples tension-nombre de pulses

L'état des plateaux LEDs, pour les séries favorables, est réparti comme suit : **57%** en très bon état, **13%** en bon état, **6%** en mauvais état et **24%** en très mauvais état, contre respectivement pour l'ensemble de l'étude : **55%**, **13%**, **9%** et **23%**. En regroupant les critères, nous constatons que **70%** des plateaux LEDs sont en très bon et bon état pour les séries favorables, contre **68%** sur la totalité des essais. D'une manière analogue, nous évaluons à **30%** les plateaux LEDs en mauvais et très mauvais état pour les séries favorables, contre **32%** des plateaux LEDs pour la globalité des essais. Malgré de légères différences dans les résultats statistiques, en faveur des séries de couples favorables, nous déduisons, identiquement aux dispositifs lampes E27, que les énergies ont été « optimisées » pour maximiser la libération des plateaux LEDs, et ce, en évitant leur détérioration. Cela permettra d'augmenter leur potentiel de valorisation matière et/ou énergétique. La capacité de la technologie des puissances pulsées, à fragmenter sélectivement et à préserver l'intégrité physique de ces composants, permet d'améliorer et d'optimiser le potentiel de valorisation de l'entreprise ARTEMISE.

Série	% de fragmentation des drivers			
	Très bon état Aucune fracturation	Bon état Faible fracturation	Mauvais état Importante fracturation	Très mauvais état Fracturation totale
A	44	36	20	0
B	28	39	33	0
C	28	50	22	0
D	33	56	11	0
E	32	42	21	5
F	28	61	11	0
G	71	24	6	0
H	22	78	0	0
Moyenne A-H	36	48	15	1
Moyenne étude totale	41	37	16	6

Tableau 3-22 : Récapitulatif de l'état des drivers par la fragmentation sélective des GU10, pour les 8 séries favorables des couples tension-nombre de pulses

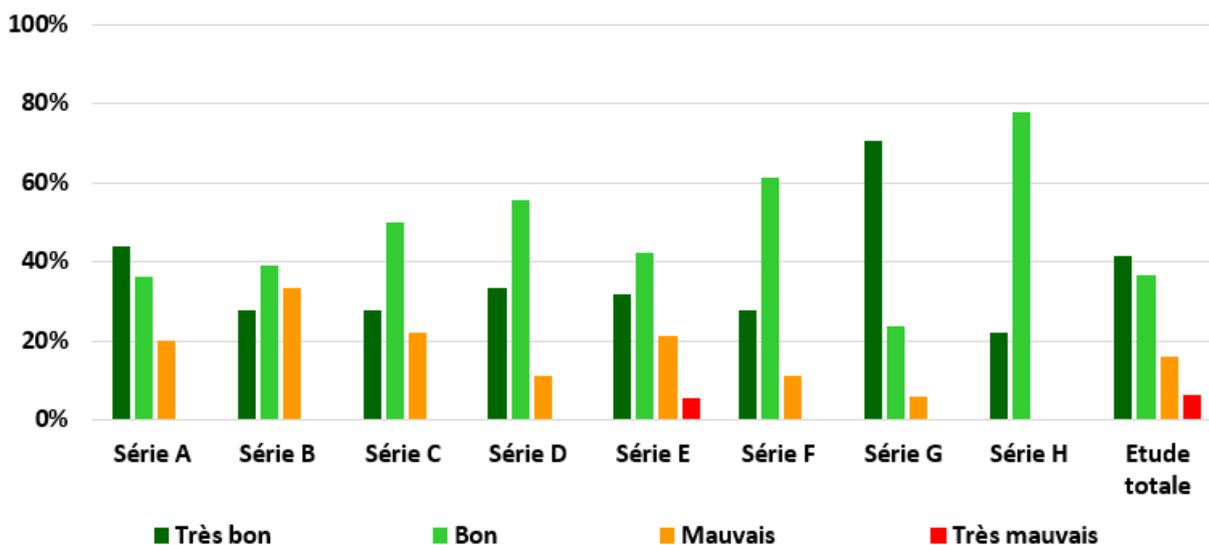


Figure 3-61 : Graphique récapitulatif de l'état des drivers par la fragmentation sélective des GU10, pour les 8 séries favorables des couples tension-nombre de pulsés

L'état des composants des drivers, pour les séries favorables, est examiné de la manière suivante : **36%** en très bon état, **48%** en bon état, **15%** en mauvais état et **1%** en très mauvais état, contre respectivement pour l'ensemble de l'étude **41%**, **37%**, **16%** et **6%**. De manière similaire, en regroupant les critères, nous relevons que **84%** des drivers sont en très bon et bon état pour les séries favorables, contre **78%** sur la totalité de la campagne d'essais. Nous évaluons à **16%** les drivers en mauvais et très mauvais état pour les séries favorables, contre **22%** des drivers pour la globalité des essais. Dès lors, nous concluons doublement, grâce aux analyses des plateaux LEDs et des drivers des spots GU10, que les énergies des séries favorables maximisent la libération de ces composants électroniques, tout en optimisant la préservation de leur intégrité physique.

L'étude des spots GU10 en plastique nous a permis de remarquer, à l'instar des lampes E27, que l'état des puces LEDs positionnées sur leur support en aluminium, à l'issue des essais de fragmentation sélective, pourrait favoriser deux scénarii ; la réutilisation et/ou la valorisation matière. Cependant, l'état des drivers, quant à eux, ne laisse présager que le scénario de recyclage. Les dommages occasionnés aux drivers, par l'outil laboratoire SELFRAG Lab, sont rédhibitoires. Dès lors, les composants de ces derniers ne sont plus réutilisables. Seule une séparation manuelle de ces dispositifs GU10 permettrait le scénario de réutilisation des drivers et/ou de leurs composants électroniques. Afin de valider la pertinence de cette technologie, abordons dans la section suivante le traitement des produits à LED sur une ligne pré-industrielle.

3.7. Etude via le dispositif IMPULSTEC

Nous avons également établi une étude collaborative avec l'entreprise IMPULSTEC, qui utilise la même technologie de fragmentation électrohydraulique (EHF) que XCRUSHER, pour réaliser des essais pré-industriels en flux continu sur des lampes et des spots à LED. L'objectif était d'approfondir les études de faisabilité réalisées à l'échelle laboratoire, avec la société XCRUSHER et le BRGM, en démontrant que la technologie des puissances pulsées peut fonctionner en flux continu et en circuit fermé. Les essais ont été réalisés, en faisant varier les paramètres de débit de traitement, de vitesse de la trémie d'alimentation, du nombre de décharges électriques et la quantité des produits à LED. Trois lots d'échantillons ont été étudiés :

- Lot n°1 : dépourvu des dispositifs à LED en verre ;
- Lot n°2 : dépourvu des dispositifs à LED en verre et corps métalliques ;
- Lot n°3 : constitué uniquement des dispositifs à LED E27 en plastique.

La Figure 3-62 présente l'outil industriel IMPULSTEC utilisé dans le cadre de cette collaboration. Il est constitué de quatre couples d'électrodes, dont le fonctionnement est exclusivement en circuit fermé. Les produits sont introduits, par une trémie élévatrice, en flux continu dans le réacteur dans lequel ils sont fragmentés sélectivement. A l'issue de leur traitement, les différents sous-ensembles sont extraits de l'outil, par des systèmes de jets d'eau et d'ouverture de portes, situés au fond du réacteur.



Figure 3-62 : Réacteur IMPULSTEC de fragmentation EHF en flux continu utilisé

Pour chacune des typologies de lampes et de spots à LED, nous concluons sur les paramètres optimaux pour obtenir une fragmentation sélective favorable, avec des composants électroniques intègres et un moindre coût énergétique. Ceci permet à ARTEMISE d'augmenter son potentiel de récupération des matériaux, de promouvoir le scénario de réutilisation d'une fraction des modules à LED et donc d'optimiser son bilan économique.

Des essais préliminaires (à l'aide d'un dispositif EHF fonctionnant en mode batch, constitué de trois couples d'électrodes), avec 30 kg de produits à LED, ont été réalisés pour déterminer les paramètres optimaux. Ceci a permis de conclure que, pour d'obtenir une fragmentation optimale des équipements à LED toutes typologies confondues, 200 décharges électriques sont nécessaires sur chaque couple d'électrodes, soit un total de 600 pulses, à une fréquence de 1 Hz.

Un point spécifique concerne les électrodes et plus spécifiquement la distance inter-électrodes. Cette dernière est commandée par un automate et varie en fonction de la quantité des produits à traiter ainsi que de leurs typologies. Plus la quantité ou la dimension des échantillons est importante et plus la distance augmente, ce qui favorise une déconstruction sélective optimale.

3.7.1. Tests sans les dispositifs à LED en verre

Les équipements à LED en verre étant compatibles à l'outil de production, actuellement disponible dans l'usine ARTEMISE, nous avons donc choisi dans cette étude de fragmenter des lots de produits à LED sans les dispositifs en verre. Il est d'autre part opportun de rappeler l'effet abrasif de ce matériau qui détériore fortement les pièces mécaniques des lignes industrielles, tels que les poulies et les roulements des convoyeurs. Ces composants devront donc être protégés, si ARTEMISE décidait de valoriser ce type de dispositifs dans l'outil industriel des puissances pulsées.

La Figure 3-63 présente un échantillon type, constitué de toutes les typologies d'équipements à LED (E27, B22, E14, GU10 et GU5.3) mais dépourvu de celles en verre, qui a été expérimenté sur la ligne pré-industrielle en flux continu avec le réacteur EHF IMPULSTEC. Notons que les bulbes des lampes E27, E14 et B22 ont été percés au préalable, afin d'éviter que celles-ci flottent en surface du réacteur rendant leur séparation sélective impossible.



Figure 3-63 : Equipements à LED dépourvus des parties ou systèmes en verre

L'outil continu IMPULSTEC est doté de quatre couples d'électrodes. Il est donc appliqué 150 pulses sur chacun d'eux, soit 600 décharges électriques au total. Les essais ont été répétés, afin d'apprécier leur reproductibilité. Les résultats des essais sont présentés dans le Tableau 3-23.

Essai	Paramètres appliqués				Résultats		
	Tension (kV)	Nombre de pulses	Distance inter-électrodes (mm)	Masse (kg)	Etat Supports LEDs	Etat drivers	Etat de la fragmentation sélective
1	40	600	3,7	2	Préservé	Préservé	Optimal
2	40	600	3,8	2	Préservé	Préservé	Optimal
3	40	600	3,9	2	Préservé	Préservé	Optimal
4	40	600	3,9	2	Préservé	Préservé	Optimal
5	40	600	3,9	2	Préservé	Préservé	Optimal
6	40	600	3,9	40	Préservé	Préservé	Optimal

Tableau 3-23 : Essais pré-industriels de fragmentation sélective d'un big-bag dépourvu des systèmes en verre, avec la technologie EHF IMPULSTEC

Les résultats obtenus sont très satisfaisants et l'outil EHF IMPULSTEC a réussi à fragmenter en sous-ensembles les dispositifs à LED, dépourvus des produits en verre, en préservant l'intégrité physique des éléments, notamment celle des composants électroniques. La Figure 3-64 illustre les sous-produits récupérés. Les systèmes optiques, les corps, les drivers, les plateaux à LED et les culots sont séparés sélectivement. Les mousses en silicone contenues dans certains corps sont également désolidarisées. La matrice PBT enrobant l'aluminium n'a pas été entièrement détachée.

Cette observation n'est aucunement bloquante puisque ce sous-produit est destiné à être broyé, à l'issue du traitement des dispositifs à LED dans le réacteur des puissances pulsées (cf. chapitre 4). Pour valider les traitements des typologies suivantes, nous conservons cette organisation de déconstruction sélective des sous-ensembles.



Figure 3-64 : Résultats de la fragmentation sélective en flux continu des équipements à LED dépourvus des systèmes en verre

Par ailleurs, nous avons testé les puces à LED récupérées, à la suite de la déconstruction de ces dispositifs. Certaines sont encore fonctionnelles. La Figure 3-65 montre le fonctionnement des puces récupérées par l'outil EHF IMPULSTEC.

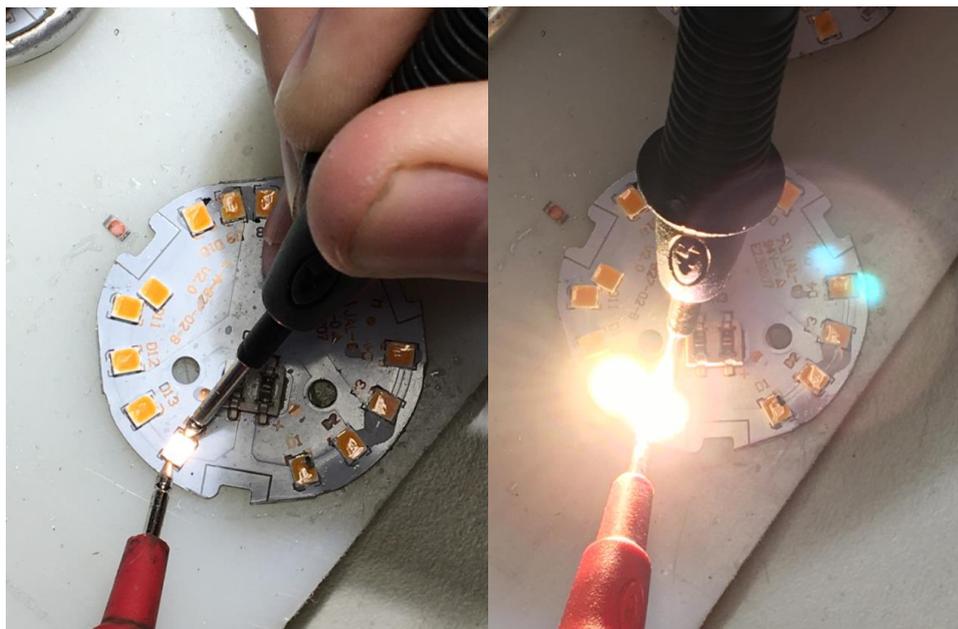


Figure 3-65 : Fonctionnement des puces à LED, suite à la fragmentation sélective en flux continu, avec la technologie EHF IMPULSTEC

3.7.2. Tests sans les dispositifs à LED en verre et corps métalliques

La deuxième catégorie d'échantillons traités est également constituée de l'ensemble des typologies à LED, mais dépourvue des dispositifs constitués de verre et ayant un corps entièrement métallique. La Figure 3-66 illustre un échantillon de cette catégorie.



Figure 3-66 : Equipements à LED dépourvus des systèmes en verre et en corps entièrement métalliques

Il est également appliqué 150 pulses par couple d'électrodes, en réitérant les expérimentations. Les résultats des essais sont présentés dans le Tableau 3-24.

Essai	Paramètres appliqués				Résultats		
	Tension (kV)	Nombre de pulses	Distance inter-électrodes (mm)	Masse (kg)	Etat Supports LEDs	Etat drivers	Etat de la fragmentation sélective
1	40	600	4,1	2	Préservé	Préservé	Optimal
2	40	600	4,1	2	Préservé	Préservé	Optimal
3	40	600	4,1	2	Préservé	Préservé	Optimal
4	40	600	4,0	2	Préservé	Préservé	Optimal
5	40	600	4,0	2	Préservé	Préservé	Optimal

Tableau 3-24 : Essais pré-industriels de fragmentation sélective d'un big-bag dépourvu des systèmes en verre et en corps entièrement métalliques, avec la technologie EHF IMPULSTEC

Les résultats obtenus sont aussi très satisfaisants et l'outil EHF IMPULSTEC a réussi à fragmenter sélectivement les équipements à LED, dépourvus des produits en verre et en corps intégralement métalliques. La Figure 3-67 illustre les sous-produits récupérés. Les systèmes optiques, les corps, les drivers, les plateaux à LED et les culots sont séparés sélectivement. Pareillement, l'intégrité physique et fonctionnelle de certains composants électroniques est préservée, notamment celle des puces à LED. Notons que nous avons expérimenté des séries d'essais à 400 et 500 pulses, mais les résultats ne sont pas aussi probants que ceux obtenus avec 600 pulses.



Figure 3-67 : Résultats de la fragmentation sélective en flux continu des équipements à LED dépourvus des systèmes en verre et en corps entièrement métalliques

3.7.3. Tests sur les dispositifs à LED E27 en plastique

La troisième et dernière catégorie d'échantillons traités est constituée uniquement des typologies à LED E27 en plastique, avec un bulbe standard de diamètre 40 mm, représentant 38% du gisement (cf. chapitre 2). Un échantillon type est illustré sur la Figure 3-68. Rappelons que l'ensemble des bulbes a été percé pour permettre la fragmentation sélective, suite à l'étude au SELFRAG Lab.



Figure 3-68 : Equipements à LED E27 en plastique, avec un traitement préalable de perçage

Il est pareillement appliqué 150 pulses par couple d'électrodes, en répétant les essais. Les résultats expérimentaux sont présentés dans le Tableau 3-25.

Essai	Paramètres appliqués				Résultats		
	Tension (kV)	Nombre de pulses	Distance inter-électrodes (mm)	Masse (kg)	Etat Supports LEDs	Etat drivers	Etat de la fragmentation sélective
1	40	600	4,0	2	Préservé	Préservé	Optimal
2	40	600	4,1	2	Préservé	Préservé	Optimal
3	40	600	4,0	2	Préservé	Préservé	Optimal
4	40	600	4,0	2	Préservé	Préservé	Optimal
5	40	600	4,0	2	Préservé	Préservé	Optimal

Tableau 3-25 : Essais pré-industriels de fragmentation sélective d'un big-bag E27 en plastique, avec la technologie EHF IMPULSTEC

Les résultats obtenus sont très satisfaisants et le réacteur EHF IMPULSTEC a permis la fragmentation sélective des équipements à LED E27 en plastique en sous-produits, définis précédemment. La Figure 3-69 illustre les sous-ensembles ainsi libérés. L'intégrité physique et fonctionnelle de certains composants électroniques est préservée. Des séries d'essais à 400 et 500 pulses ont également été expérimentées, mais les déconstructions sélectives ne sont pas aussi concluantes que celles obtenues avec 600 pulses.



Figure 3-69 : Résultats de la fragmentation sélective en flux continu des équipements à LED E27 en plastique

En somme, à partir de l'ensemble des essais réalisés avec cet outil pré-industriel, reposant sur la technologie des puissances pulsées EHF et proposé par la société allemande IMPULSTEC, sur ces trois catégories de systèmes à LED, nous sommes désormais en mesure de conclure que la fragmentation sélective de ces produits en flux continu, circuit fermé et système automatisé est possible techniquement. Nous allons maintenant aborder les aspects énergétiques.

3.7.4. Estimation énergétique de l'outil IMPULSTEC

Sur 70 kg d'échantillons expérimentés avec le réacteur EHF IMPULSTEC en flux continu et circuit fermé, la technologie des puissances pulsées déconstruit sélectivement les équipements à LED, représentant plus de 80% du gisement (cf. chapitre 2), en cinq sous-ensembles :

- Les systèmes optiques en PC ;
- Les plateaux LEDs avec les puces appariées sur les supports ;
- Les drivers ;
- Les corps en PBT et en aluminium ;
- Les culots en acier.

Cette technologie préserve incontestablement l'intégrité de certains composants électroniques et les puces à LED peuvent potentiellement être réutilisées. Les drivers, quant à eux, ne pourront pas être réutilisés mais, en ayant réussi à éviter leur déchiquetage et donc des pertes de matières, ils seront recyclés par une valorisation spécifique, pour augmenter l'extraction des métaux précieux et stratégiques.

Sur la totalité de l'étude, il a été appliqué 600 J par décharge électrique, soit une énergie spécifique estimée à 50 kWh/t. Cette énergie correspond à la valorisation en flux continu et en circuit fermé de l'ensemble des dispositifs à LED, dépourvus des typologies en verre. En comparant cette valeur à celle du broyeur, disponible aujourd'hui chez ARTEMISE et évaluée à 152 kWh/t, nous apprécions un gain énergétique potentiel de 67%, avec la technologie des puissances pulsées. Par cette étude collaborative, nous mettons donc en exergue l'efficacité de cette technologie innovante à traiter en fin de vie des équipements à LED, pour la réutilisation des matières premières secondaires, mais aussi à potentiellement améliorer la rentabilité économique de l'entreprise, en évitant le déchiquetage des constituants. Des énergies spécifiques, de séparations sélectives unitaires, ont été calculées pour les typologies en plastique de lampes E27 à $5,2 \pm 0,6$ kWh/t et de spots GU10 à $13,9 \pm 2,5$ kWh/t, avec le réacteur laboratoire EDF proposé par SELFRAG. Pour traiter la globalité des équipements LEDs incluant les dispositifs métalliques, l'estimation de l'énergie nécessaire en flux continu et en système pré-industriel est donc cohérente et pertinente. Cette étude s'inscrit donc dans la continuité des études précédentes et permet de valider le choix de la technologie des puissances pulsées dans le cadre de la thèse, associée au projet RECYLED.

Notons que l'outil utilisé dans cette étude, n'a pas été dimensionné pour valoriser les systèmes à technologie LED. Il est prévu pour une autre application industrielle, non communiquée pour des raisons de confidentialité. En fonction des décisions que prendra ARTEMISE, IMPULSTEC pourra proposer un réacteur adapté pour valoriser les équipements à LED, avec la possibilité de le faire évoluer, vers d'autres types d'applications futurs. Aussi, un délai évalué actuellement à deux années est nécessaire à IMPULSTEC pour le développement d'un réacteur spécifique, afin de valoriser les dispositifs à LED. Ce délai prévisionnel est dû à l'engouement, que suscite cette nouvelle technologie, du monde académique mais aussi industriel de manière générale.

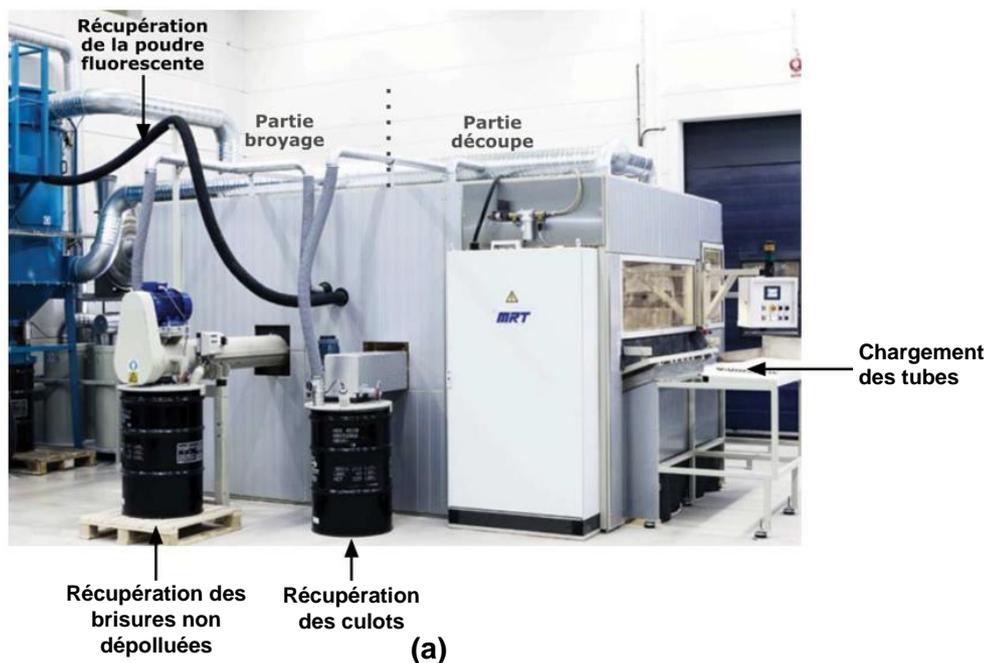
Ipsa facto, la technologie EHF développée par la société IMPULSTEC est efficace et peut assurément être utilisée par l'entreprise ARTEMISE pour développer une ligne de traitement industrielle. L'outil de production sera dimensionné avec un débit de 650 kg/h, afin de traiter à la fin de la décennie un gisement annuel maximal de 2600 tonnes de lampes et spots à LED. Il reste néanmoins à concevoir un réacteur capable de maintenir les lampes E27, E14 et B22 immergées au fond de la chambre de traitement. Ce point constitue un axe de développement intéressant, en collaboration avec l'UTT. Dans ce cadre, une proposition a été faite à IMPULSTEC, notamment d'ajouter une grille plastique au réacteur. Par ailleurs, il est important de proposer un outil industriel global, en incluant des systèmes de convoyeurs, de séchage et de broyage mécanique des fractions. Une ligne de traitement globale des équipements à LED sera proposée dans le chapitre 4 de cette thèse. Intéressons-nous dans la section suivante à l'outil industriel des tubes à LED.

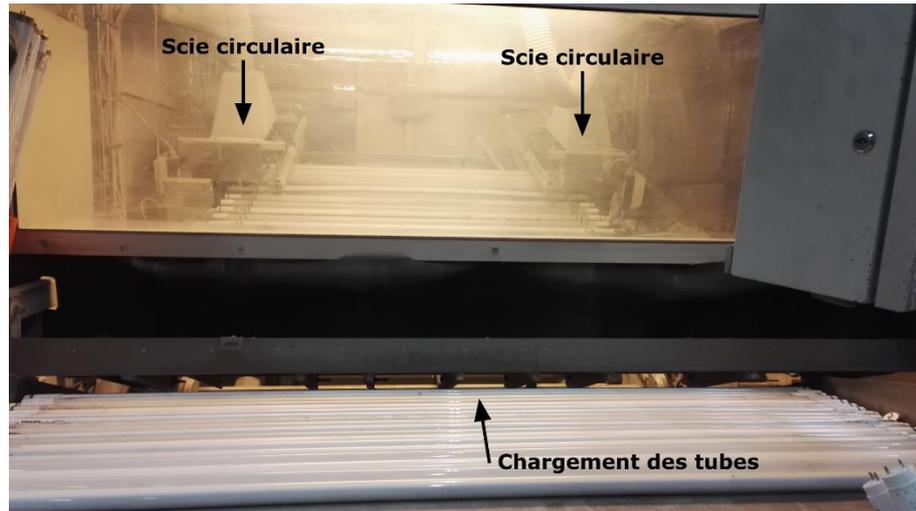
3.8. Adaptation mécanique pour le traitement des tubes à LED

Nous avons conclu, par l'étude réalisée avec l'outil laboratoire XCRUSHER reposant sur la technologie des puissances pulsées par la fragmentation électrohydraulique (EHF), que le traitement des tubes à LED en aluminium et en plastique est seulement partiel. Leur désolidarisation a été rendue possible par cette technologie de fragmentation sélective, en séparant les systèmes optiques en PC, les renforts en aluminium et les culots en PBT. Néanmoins, la dissociation des bandeaux de puces à LED sur les renforts en aluminium n'a pas été exécutée. Nous avons déduit que la bonification des tubes à LED n'est pas probante, par cette technologie, et qu'il fallait une opération supplémentaire de découpe, pour satisfaire la déconstruction de ces dispositifs. Par ailleurs, la typologie de tube en verre n'a pas été expérimentée, de par la fragilité mécanique de ce type de matériau. Par conséquent, nous avons décidé d'axer le traitement des tubes à LED par un démontage exclusivement mécanique et automatisé, à partir d'une machine existante disponible depuis 2012 chez ARTEMISE : l'outil ECM de traitement des tubes fluorescents.

3.8.1. Présentation de la machine ECM

La Figure 3-70 illustre l'outil ECM, appelé communément End Cut Machine. C'est une machine de découpe et de broyage des tubes fluorescents en verre. Elle est constituée d'une table de chargement et d'un système de chaînes à taquets qui bloque les tubes unitairement en butée et les achemine jusqu'à deux scies circulaires, de diamètre 20 cm, pour découper leurs extrémités et détacher ainsi leurs culots. Ces derniers tombent dans un convoyeur, puis sont transportés et stockés dans un fût. Les tubes, ainsi découpés, sont ensuite déplacés vers une vis de broyage, pour récupérer le verre. La poudre fluorescente, dangereuse pour la santé, est séparée du verre par un système d'aspiration et de filtration, composé de charbon actif. Ainsi, le verre est dépollué et peut être valorisé, par ARTEMISE. Cependant, les deux disques coupent uniquement les extrémités des tubes de 150 cm. Pour les autres longueurs de tubes, une extrémité sur deux, seulement, peut être découpée. Les disques ne sont pas mobiles et sont espacés de 134 cm. C'est l'inconvénient majeur de cet outil industriel. En modifiant la configuration des scies dans l'ECM, la machine pourra, en conséquence, traiter toutes les longueurs des tubes : 60 cm, 120 cm et 150 cm [55] [56].





(b)

Figure 3-70 : Photographies d'illustration de la machine ECM : Présentation générale (a) et système de convoyeur des chaînes à taquet (b) [55] [56]

3.8.2. Modifications de la machine ECM

Cette machine n'étant plus utilisée chez ARTEMISE, depuis fin 2014. Nous avons donc pensé à la modifier et l'adapter, pour le traitement en fin de vie des tubes à LED en verre, aluminium et plastique. Les bandeaux LEDs, contenus dans les tubes, posent une difficulté et ont tendance à se coincer dans la vis de broyage, à cause de leur longueur élevée. La solution est l'ajout de trois scies circulaires, entre les deux initiales positionnées aux extrémités du convoyeur à 8 cm et 142 cm, afin de décrétement la taille des tubes et donc de leurs rubans LEDs. Des nouveaux disques de découpe sont positionnés à 48 cm, 80 cm et 112 cm. Après quelques tests effectués sur des tubes à LED, il nous est apparu nécessaire d'ajouter également deux chaînes intermédiaires, afin de maintenir les tronçons des tubes découpés. Les chaînes sont ainsi positionnées à 10 cm, 45 cm, 110 cm et 140 cm, comme schématisé sur la Figure 3-71. Ceci permettra ainsi de traiter toutes les longueurs des tubes. Le système de ventilation est, quant à lui, conservé mais réduit à un seul module filtrant, au lieu de deux initialement. En somme, les tubes à LED peuvent être contaminés, par les poudres fluorescentes, notamment lors de leur collecte et stockage dans les bornes TUBIBOX, avec les tubes traditionnels. Notons que cet effet de pollution croisée est amené à se réduire au cours de la décennie, avec la disparition des systèmes d'éclairage fluorescents [57].

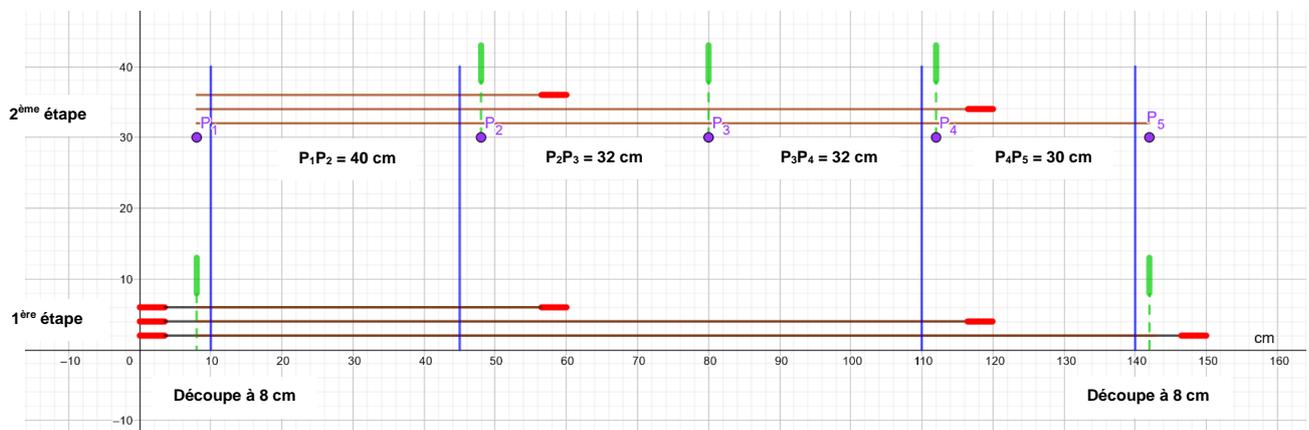


Figure 3-71 : Schéma de principe des modifications apportées à l'ECM [55] [56]

Légende :

- En **bleu** : les chaînes à taquets
- En **vert** : les scies circulaires
- En **marron** : les tubes à LED
- En **rouge** : les culots

Cette adaptation de l'outil ECM, pour le traitement des tubes à LED, a été réalisée dans le cadre d'un co-encadrement de deux stagiaires à l'UTT : Antoine BRESCHÉ ayant expérimenté les tubes en plastique et aluminium [55] et Loan LAPLANCHE ayant étudié les tubes en verre [56]. La solution proposée permet une séparation des culots par une segmentation efficace des tubes à LED, en tronçons de 30 cm, 32 cm et 40 cm, tout en conservant le principe de fonctionnement global de l'ECM, pour traiter les tronçons récupérés dans la vis de broyage. Les tubes sont positionnés, en référence, sur la partie gauche de la table de chargement. Dans un premier temps, les culots de gauche sont sectionnés pour tous les tubes et ceux de droite sont découpés uniquement pour les longueurs de 150 cm. Dans un second temps, tous les culots sont sectionnés et les tubes sont tronçonnés en longueurs de :

- 60 cm = 1 x 40 cm
- 120 cm = 1 x 40 cm + 2 x 32 cm
- 150 cm = 1 x 40 cm + 2 x 32 cm + 1 x 30 cm

Ainsi, les culots découpés sont transportés par un convoyeur pour être stockés dans un fût. Ce dernier contient également des drivers, car dans certains tubes les drivers sont situés dans les culots. Les disques découpent les culots à 8 cm des extrémités des tubes, pour laisser une distance de sécurité et éviter donc de sectionner les drivers, positionnés dans ces derniers. L'inconvénient majeur concerne les tubes de 60 cm, avec une perte de 4 cm lors de la découpe du culot de droite. Néanmoins, cette catégorie de tubes représente 11% du gisement (source entreprise ARTEMISE). Par ailleurs, la société a validé cette solution, par rapport à sa situation économique. Sinon, nous lui aurions proposé d'ajouter un disque supplémentaire. Ainsi, les deux scies auraient été positionnées à 30 cm et 52 cm, pour découper les tubes de 60 cm en deux tronçons de 22 cm qui seront ensuite déplacés vers la vis de broyage. L'objectif est d'optimiser le tronçonnage des tubes, pour éviter de bloquer le système de broyage, au niveau de la vis sans fin.

Après le traitement des tubes LEDs dans l'ECM, les fractions à la sortie de la vis de broyage sont composées de bandeaux LEDs, de drivers, de plastiques, de verre, de métaux ferreux et non ferreux. Ces éléments sont séparés par un crible à doigts pour récupérer les rubans LEDs, les drivers et les plastiques, puis par un crible vibrant, en forme de « V », pour récupérer le verre. Les métaux ferreux et non ferreux sont séparés respectivement par un dispositif Overband et de courants de Foucault (source entreprise ARTEMISE).

3.8.3. Résultats des modifications

Des tests ont été réalisés sur 365 tubes à LED (198 en plastique, 50 en aluminium et 117 en verre). Nous avons analysé la qualité des tronçons obtenus, en appréciant d'une part l'état des coupes et en évaluant d'autre part le glissement des rubans LEDs, pour l'ensemble des tubes. Concernant les tubes en plastique, il a également été analysé le glissement des rails en aluminium. Cet état est dû à des éventuelles déformations du plastique qui limitent les mouvements des renforts, lors du découpage. Par ailleurs pour chaque culot tronçonné, nous avons examiné la présence ou non de fractions des alimentations électriques (drivers) qui auraient été éventuellement sectionnées, par les disques. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3-26.

Tubes en plastique				
Nombre	Etat coupe	Rail glisse	Ruban glisse	Drivers coupés
Essais du 19/11/2020				
118	111 nettes 7 médiocres	83 O 17 N 18 I	90 O 28 N	11 O 107 N
Essais du 09/12/2020				
80	72 nettes 8 médiocres	67 O 10 N 3 I	59 O 21 N	4 O 76 N
Total essais				
198	183 nettes 15 médiocres	150 O 27 N 21 I	149 O 49 N	15 O 183 N

(a)

Tubes en aluminium			
Nombre	Etat coupe	Ruban glisse	Drivers coupés
Essais du 19/11/2020			
50	36 nettes 7 correctes 7 médiocres	40 O 10 N	32 O 8 N 10 I

(b)

Tubes en verre			
Nombre	Etat coupe	Ruban glisse	Drivers coupés
Essais du 19/11/2020			
30	8 nettes 8 correctes 14 médiocres	27 N (collés) 3 O	30 N
Essais du 09/12/2020			
87	19 nettes 23 correctes 27 médiocres 18 I	67 N (collés) 2 O 18 I	87 N
Total essais			
117	27 nettes 31 correctes 41 médiocres 18 I	94 N (collés) 5 O 18 I	117 N

(c)

Tableau 3-26 : Relevés d'analyse des essais à l'ECM, en fonction de la catégorie des tubes LEDs : Tubes en plastique (a), en aluminium (b) et en verre (c) [55] [56]
O = oui ; N = non ; I = intermédiaire

Pour les tubes en plastique, plus de 92% des découpes sont nettes, comme illustré sur la Figure 3-72, sans déformation de la matrice polymère. La présence de coupes correctes pour les tubes en aluminium, évaluée à 14%, est due à la conception de ces dispositifs qui est en deux parties. Lors du tronçonnage, les éléments des tubes ont tendance à s'ouvrir et donc à se mouvoir, impliquant une découpe moins nette, que s'ils restent immobiles. L'état des coupes pour les tubes en verre est assez variable. En effet, le verre se brise et il arrive que certains tubes tombent en dehors des chaînes à taquets. L'ajout des chaînes intermédiaires a résolu cette anomalie.

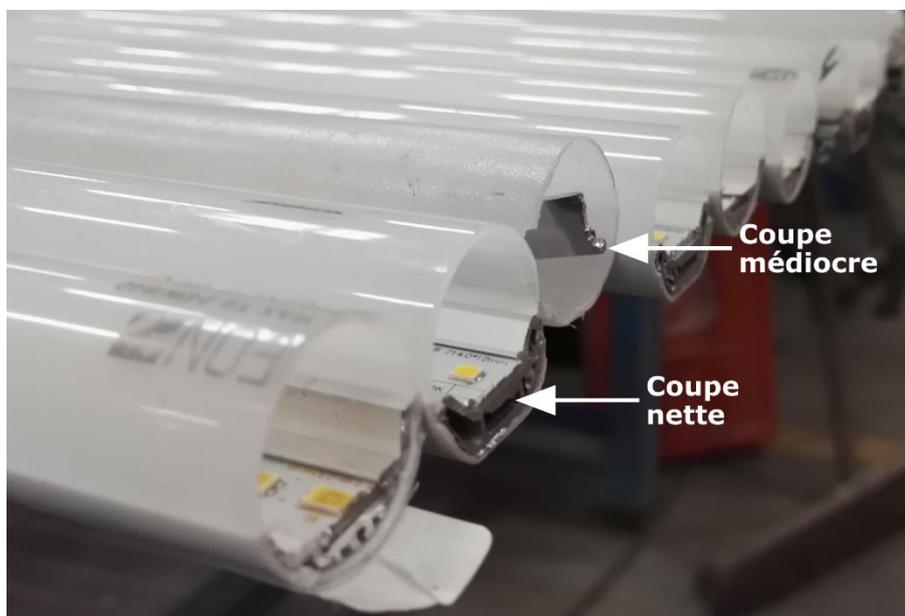


Figure 3-72 : Photographie d'illustration des découpes des tubes à LED en plastique à l'ECM [55]

Concernant le glissement des rails aluminium et des rubans LEDs, plus de 75% des tubes en plastique et 80 % de ceux en aluminium glissent, après le tronçonnage par les scies circulaires. Dans le cas des tubes en verre, nous constatons que l'inconvénient majeur, de ces dispositifs, est que plus de 80% des bandeaux LEDs sont collés sur le verre. De ce fait, une partie du verre doit être valorisé avec les rubans LEDs.

Enfin, pour les drivers des tubes en plastique, plus de 92% ne sont pas sectionnés, alors que 64% le sont, dans le cas des tubes en aluminium, à cause de leur architecture plus complexe. Des pertes de drivers sont donc à prévoir pour cette typologie de tubes. Cependant, les drivers des dispositifs en verre ne sont jamais sectionnés, de par la sécurité de positionnement des scies circulaires à 8 cm des extrémités des culots.

Les résultats de ces essais sont concluants et nous confortent dans notre choix d'adapter puis d'utiliser l'ECM, pour la découpe des culots et la réduction des tubes à LED en tronçons. Cette solution, simple à mettre en œuvre, permet de décrétement la longueur des supports en aluminium et donc de leurs bandeaux LEDs. Ceci permet un broyage efficient sans risque de blocage, dû aux renforts aluminium et aux rubans LEDs qui ont tendance à obstruer la vis de broyage.

Parallèlement aux essais qualités de tronçonnage réalisés, nous avons travaillé sur la cadence de l'ECM à découper les culots et à tronçonner les tubes, tout en assurant un rendu de coupe conforme. La cadence de la machine dépend de la vitesse de rotation des chaînes à mouvoir les tubes. Plus celle-ci est importante et plus les tubes sont positionnés rapidement au niveau des disques de coupe, dont la vitesse de rotation reste fixe : 2800 tr/min pour les tubes en verre (avec des disques en diamant) et 3200 tr/min pour les tubes en plastique/aluminium (avec des disques en carbone). 217 tubes à LED (80 en plastique, 50 en aluminium et 87 en verre) ont été expérimentés. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3-27.

Type de tube LEDs	Nombre de tubes testés	Vitesse de l'ECM (m/s)	Temps de l'essai (s)	Cadence de l'ECM (s/tube)
Plastique	10	3	26,78	2,68
	10	4	19,15	1,92
	10	5	15,10	1,51
	20	5	33,25	1,66
	10	5,5	13,45	1,35
	10	6	12,19	1,22
	10	7	11,05	1,11
Aluminium	10	3	24,61	2,46
	10	4	19,49	1,95
	10	5	14,64	1,46
	10	6	12,34	1,23
	10	7	10,39	1,04
Verre	10	3	23,90	2,39
	10	4	20,62	2,06
	10	4	17,98	1,80
	10	5	14,51	1,45
	10	5	14,23	1,42
	17	6	16,25	0,96
	10	6	12,53	1,25
	10	7	10,84	1,08

Tableau 3-27 : Résultats des essais de cadence de l'ECM sur les tubes à LED en plastique, aluminium et verre [55] [56]

La vitesse de rotation des chaînes, pilotée par un potentiomètre, peut être réglée entre 0 à 10 m/s. Les temps d'essais mesurés correspondent à la durée entre le moment où le premier tube, de la série, touche les scies circulaires et celui où le dernier tube est tronçonné. Pour les tubes en verre, nous avons remarqué que la qualité de la découpe, en fonction de la vitesse, est inverse à celle des tubes en plastique et en aluminium. En somme, les résultats semblent indiquer que plus la découpe est rapide, meilleurs sont les états des tronçons. Cependant, nous observons une limite au-delà de laquelle, ces tubes se brisent au contact des scies. Aussi, ceci n'est pas préjudiciable étant donné que le verre doit être broyé, donc il n'est pas fondamentalement nécessaire d'avoir une découpe nette.

Nous arrivons aux conclusions suivantes pour les tubes LEDs :

- En plastique²⁸ : vitesse optimale de 5,5 m/s, soit une cadence de 1,35 s/tube, soit environ un débit de 500 kg/h, correspondant à un débit annuel de 2080 tonnes ;
- En aluminium²⁹ : vitesse optimale de 5 m/s, soit une cadence de 1,46 s/tube, soit environ un débit de 1000 kg/h, correspondant à un débit annuel de 4160 tonnes ;
- En verre³⁰, vitesse optimale de 7 m/s, soit une cadence de 1,08 s/tube, soit environ un débit de 800 kg/h, correspondant à un débit annuel de 3328 tonnes.

Pour chacune des catégories de tubes à LED, nous avons identifié des vitesses optimales du système de convoyeur des chaînes à taquets, équipant le dispositif ECM, afin de transporter ces produits vers les scies circulaires. Par conséquent, ARTEMISE procédera à des campagnes d'essais. Dès lors, une seule catégorie de tubes sera traitée simultanément dans cet équipement. Cela permet d'adapter la vitesse, de cet outil de traitement industriel, en fonction de la typologie des tubes à valoriser. Ipso facto, nous maximisons le potentiel de récupération des fractions de cette catégorie de gisement des dispositifs à LED.

²⁸ Masse moyenne 200 g.

²⁹ Masse moyenne 400 g.

³⁰ Masse moyenne 250 g.

3.9. Conclusion

L'étude préliminaire réalisée avec le réacteur laboratoire XCRUHSER a démontré le potentiel de la technologie des puissances pulsées, pour traiter la fin de vie des lampes et des spots à LED, par la séparation sélective des matériaux constitutifs et des composants électroniques, tout en préservant l'intégrité physique de ces derniers. La limite de cette technologie concerne le traitement des tubes car les rubans de puces à LED ne sont pas dissociés de leur support en aluminium. Une opération supplémentaire de découpe mécanique permettrait leur désolidarisation. Il a donc été retenu d'orienter la valorisation des tubes à LED avec un outil industriel purement mécanique et automatisé, disponible chez ARTEMISE, en apportant des modifications à celui-ci. Ainsi, nous avons expérimenté différentes cadences en fonction de la typologie des tubes. Les débits de traitement annuels peuvent atteindre plus de 4000 tonnes, notamment pour la catégorie des tubes en aluminium.

Pour approfondir l'étude XCRUSHER et apprécier la déstructuration des dispositifs les plus représentatifs, nous avons mené, en collaboration avec le BRGM, une étude avec le dispositif SELFRAG Lab sur deux catégories d'équipements. L'objectif principal des deux campagnes d'essais est d'établir des briques technologiques de désassemblage des dispositifs d'éclairage à technologie LED, issus des typologies E27 et GU10 en plastique, pour tendre vers un taux de recyclage de 80% imposé par les pouvoirs publics. Par ailleurs, les résultats ont été concrétisés par une publication [58].

Pour les dispositifs plastiques E27 (représentant 38% du gisement et 48% en intégrant les gros bulbes) et GU10 (représentant 22% du gisement et 25% en intégrant les spots GU5.3), respectivement sept et huit couples de tension-nombre de pulses d'une déconstruction favorable ont été révélés, vérifiés et entérinés en évaluant la notion de reproductibilité des essais. Ces résultats sont encourageants avec le dispositif type laboratoire. D'une part, avec les lampes E27 pour une énergie spécifique moyenne et un écart-type moyen de fragmentation sélective « optimisés » qui sont estimés à hauteur de **5,2 ± 0,6 kWh/t** et impliquant une libération globale moyenne examinée à **64%**. D'autre part, avec les spots GU10 pour une énergie spécifique moyenne et un écart-type moyen de fragmentation sélective « optimisés » qui sont appréciés à **13,9 ± 2,5 kWh/t** et correspondant à une libération globale moyenne observée à **91%**. Au vue de la répartition hétérogène de l'énergie de la décharge dans le réacteur laboratoire, il aurait été très intéressant de tester ces typologies sur la ligne de traitement industrielle à flux continu SELFRAG, tel que le dispositif Pre-Weakening Test Station, dont le débit peut atteindre jusqu'à 10 t/h [7].

Les deux études laboratoires, réalisées en mode batch, ont été complétées par des essais pré-industriels, en flux continu et circuit fermé. Ces essais réalisés avec le réacteur pré-industriel EHF proposé par la société IMPULSTEC sont probants. Ils confirment que la technologie des puissances pulsées est bien adaptée au traitement en fin de vie des dispositifs à LED plastiques et métalliques : E27, B22, E14, GU10 et GU5.3, représentant plus de 80% du gisement. L'énergie spécifique correspondant à cette valorisation est évaluée à **50 kWh/t**. Cette valeur est similaire à l'estimation réalisée dans l'étude XCRUSHER pour le traitement des produits LEDs GU10 métalliques. Les équipements sont séparés sélectivement en cinq sous-ensembles, les intégrités physique et fonctionnelle de certains composants électroniques sont préservées. Notons que le réacteur industriel devra être dimensionné, pour maintenir en immersion au fond du récipient les dispositifs à LED, notamment les lampes à bulbes. Un dispositif constitué d'une grille en matière plastique, tel que le PolyTétraFluoroEthylène (PTFE), pourrait être envisagé dans le cadre d'une étude complémentaire, pour répondre à cette problématique.

A l'issue de la fragmentation sélective des dispositifs à LED, l'état des sous-produits récupérés optimisera leur valorisation, avec l'objectif d'atteindre un taux de recyclage minimal de 80%. Nous allons, désormais dans le dernier chapitre, nous intéresser au potentiel de valorisation matière, que de tels dispositifs peuvent générer.

Références bibliographiques

- [1] Mizanur Rahman, S.M., Kim J., Lerondel G., Bouzidi Y., Clerget L., 2019. Value Retention Options in Circular Economy: Issues and Challenges of LED Lamp Preprocessing. *Sustainability* 11 (17), 4723. <https://doi.org/10.3390/su11174723>
- [2] UNTHA, entreprise spécialisée dans les technologies de déchetage « <https://www.untha.com/fr> », 12 juillet 2021
- [3] Umicore, acteur mondial de la technologie des matériaux par recyclage des cartes électroniques des DEEE « <https://www.umicore.fr/fr/> », 01 juillet 2021
- [4] Morphosis, leader de l'extraction et l'affinage des métaux rares et précieux issus principalement des équipements électriques et électroniques en Europe « <https://www.morphosis.fr/page/accueil.html> », 01 juillet 2021
- [5] Kathy Bru, Solène Touze, Pascal Auger, Svatopluk Dobrusky, Jérôme Tierrie, Daniel B. Parvaz. Investigation of lab and pilot scale electric-pulse fragmentation systems for the recycling of ultra-high performance fibre-reinforced concrete. *Minerals Engineering* 128 (2018) 187-194. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.08.040>
- [6] Solène Touze, Kathy Bru, Yannick Menard, Alexander Weh, Frédéric Von Derweid. Electrical fragmentation applied to the recycling of concrete waste - Effect on aggregate liberation. *International Journal of Mineral Processing* 158 (2017) 68-75. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.11.009>
- [7] Weiran ZUO, Fengnian Shi, Klaas Peter Van Der Wielen, Alexander Weh. Ore particle breakage behaviour in a pilot scale high voltage pulse machine. *Minerals Engineering* 84 (2015) 64-73. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.09.025>
- [8] Klaas Peter Van Der Wielen, Richard Pascoe, Alex Weh, Frances Wall, Gavyn Rollinson. The influence of equipment settings and rock properties on high voltage breakage. *Minerals Engineering* 46-47 (2013) 100-111. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.02.008>
- [9] XCRUSHER, La technologie des puissances pulsées « <https://www.xcrusher.fr/fr/accueil/> », 12 juillet 2021
- [10] SOPREMA-XCRUSHER, séparation et recyclage des produits bitumineux d'étanchéité du bâtiment « <https://www.soprema.fr/> », 12 juillet 2021
- [11] Sanna-Mari Nevala, Joseph Hamuyuni, Tero Junnila, Tuomas Sirvio, Stefan Eisert, Benjamin P. Wilson, Rodrigo Serna-Guerrero, Mari Lundström. Electro-hydraulic fragmentation vs conventional crushing of photovoltaic panels - Impact on recycling. *Waste Management* 87 (2019) 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.039>
- [12] Fadri Pestalozzi, Stefan Eisert and Jörg Woidasky. Benchmark Comparison of High Voltage Discharge Separation of Photovoltaic Modules by Electrohydraulic and Electrodynamical Fragmentation. *MDPI recycling* 2018, 3(2), 13. <https://doi.org/10.3390/recycling3020013>
- [13] IMPULSTEC, La technologie de fragmentation électrohydraulique « <https://impulstec.com/de/> », 13 juillet 2021
- [14] Yuemin Zhao, Bo Zhang, Chenlong Duan, Xia Chen, Song Sun. Material port fractal of fragmentation of waste printed circuit boards (WPCBs) by high-voltage pulse. *Powder Technology* 269 (2015) 219-226. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.09.006>
- [15] Fengnian Shi, Emmy Manlapig and Weiran Zuo. Progress and Challenges in Electrical Comminution by High-Voltage Pulses. *Chemical Engineering Technology* (2013). <https://doi.org/10.1002/ceat.201300660>

- [16] Eric Wang, Fengnian Shi, Emmy Manlapig. Experimental and numerical studies of selective fragmentation of mineral ores in electrical comminution. *International Journal of Mineral Processing* 112-113 (2012) 30-36. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2012.07.005>
- [17] Bai-Peng Song, Meng-Yao ZhanG, Yue Fan, Ling Jiang, Jun Kang, Ting-Tao Gou, Cheng-Lei Zhang, Ning Yang, Guan-Jun Zhang, Xiang Zhou. Recycling experimental investigation on end of life photovoltaic panels by application of high voltage fragmentation. *Waste Management* 101 (2020) 180-187. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.015>
- [18] Toyohisa Fujita, Isao Yoshimi, Atsushi Shibayama, Toshio Miyazaki, Keisuke Abe, Masashi Sato, Wan Tai Yen, Jan Svoboda. Crushing and Liberation of Materials by Electrical Disintegration. *The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection* Vol.1, No. 2, 1303-0868, 2001, pp. 113-122
- [19] Chenlong Duan, Jun Han, Shen Zhao, Zhonglin Gao, Jinpeng Qiao, Guanghui Yan. The stripping effect of using high voltage electrical pulses breakage for waste printed circuit boards. *Waste management* 77 (2018) 603-610. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.003>
- [20] U, Andres. Development and prospects of mineral liberation by electrical pulses. *International Journal of Mineral Processing* 97 (2010) 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2010.07.004>
- [21] Justin Martin, « Etude et caractérisation d'onde de pression générée par une décharge électrique dans l'eau. Application à la fracturation électrique de roches ». Thèse de doctorat, soutenue le 14 juin 2013 à l'Université de Pau et des Pays de l'Adour
- [22] A. J. H. Sale and W. A. Hamilton, I. Effects of high electric fields on microorganisms. Killing of bacteria and yeasts," *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*, vol. 148, no. 3, pp. 781-788, December 1967. [https://doi.org/10.1016/0304-4165\(67\)90052-9](https://doi.org/10.1016/0304-4165(67)90052-9)
- [23] A. J. H. Sale and W. A. Hamilton. Effects of high electric fields on micro-organisms: III. Lysis of erythrocytes and protoplasts, *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes*, vol. 163, no. 1, pp. 37-43, août 1968. [https://doi.org/10.1016/0005-2736\(68\)90030-8](https://doi.org/10.1016/0005-2736(68)90030-8)
- [24] U. Zimmermann, G. Pilwat, and F. Riemann. Dielectric Breakdown of Cell Membranes, *Biophysical Journal*, vol. 14, no. 11, pp. 881-899, november 1974. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(74\)85956-4](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(74)85956-4)
- [25] N. Boussetta, « Intensification de l'extraction des polyphénols par électrotechnologies pour la valorisation des marcs de champagne ». Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, France, 2010
- [26] B. Sun, M. Sato, and J. S. Clements. Optical study of active species produced by a pulsed streamer corona discharge in water. *Journal of Electrostatics*, vol. 39, no. 3, pp. 189-202, July 1997. [https://doi.org/10.1016/S0304-3886\(97\)00002-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3886(97)00002-8)
- [27] H. Akiyama. Streamer discharges in liquids and their applications, *IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation*, vol. 7, no. 5, pp. 646-653, 2000. DOI: 10.1109/94.879360
- [28] Thu Huyen Dang, « Etude des Décharges Electriques dans l'Eau et Application à l'Elimination de Polluants et Optimisation du Rendement Energétique ». Thèse de doctorat, soutenue le 14 avril 2011 à l'Université de Grenoble
- [29] S. Boev, V. Vajov, D. Jgun, and I. Kalyatskii. Reasearch of conditions of material destruction by electric pulse discharges, in *Proceedings KORUS 2000. The 4th Korea-Russia International Symposium On Science and Technology*, Ulsan, South Korea, 2000, pp. 346-349
- [30] R. Tobazeon. Pré-claquage et claquage des liquides diélectriques. *Techniques de l'ingénieur. Génie électrique*, vol. 2, no. D2-450, pp. 28, 1997
- [31] A. C. T. Briggs, A. Beroual, and F. Buret. The dynamics of DC predisruption in liquid insulating media. *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.* vol. 1, no. 3, pp. 371-376, June 1994. DOI: 10.1109/94.300276

- [32] G. Touya, « Contribution à l'étude expérimentale des décharges électriques dans l'eau et des ondes de pression associées : Réalisation d'un prototype industriel 100 kJ pour le traitement de déchets par puissances électriques pulsées ». Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2003
- [33] A. Beroual. Electronic and gaseous processes in the prebreakdown phenomena of dielectric liquids. *J. Appl. Phys.*, vol. 73, no. 9, pp. 4528, 1993. <https://doi.org/10.1063/1.352796>
- [34] S. Katsuki, H. Akiyama, A. Abou-Ghazala, and K. H. Schoenbach. Parallel streamer discharges between wire and plane electrodes in water. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 9, no. 4, pp. 498-506, august 2002. DOI: 10.1109/TDEI.2002.1024426
- [35] H. M. Jones and E. E. Kunhardt. Pre-breakdown currents in water and aqueous solutions and their influence on pulsed dielectric breakdown. *Journal of Applied Physics*, vol. 78, no. 5, pp. 3308-3314, 1995. <https://doi.org/10.1063/1.360023>
- [36] J. F. Kolb, R. P. Joshi, S. Xiao, and K. H. Schoenbach. Streamers in water and other dielectric liquids. *Journal of Physics. D: Applied Physics*, vol. 41, no. 23, p. 234007, November 2008. doi:10.1088/0022-3727/41/23/234007
- [37] K. Schoenbach, J. Kolb, S. Xiao, S. Katsuki, Y. Minamitani, and R. Joshi. Electrical breakdown of water in microgaps.. *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 17, no. 2, p. 024010, May 2008. doi:10.1088/0963-0252/17/2/024010
- [38] A. Nikuradse. *Das Flüssige Dielektrikum (Isolierende Flüssig)*. Berlin, Allemagne: Springer, 1934. DOI 10.1007/978-3-642-51997-0
- [39] F. W. Peek. *Dielectric Phenomena In High Voltage Engineering*. Mcgraw-Hill Book Company, Inc., 1920
- [40] T. J. Lewis. The 1984 H. Tropper Memorial Lecture Electronic Processes in Dielectric Liquids Under Incipient Breakdown Stress. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-20, no. 2, pp. 123-132, April 1985
- [41] T. J. Lewis. A new model for the primary process of electrical breakdown in liquids. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 5, no. 3, pp. 306-315, June 1998. DOI: 10.1109/94.689419
- [42] A. Guntherschulze. Theory of non-ionizing breakdown in insulating liquids, p. 92, 1922
- [43] H. Edler, in *Arch. Elektrotechn.*, 1931
- [44] H. M. Jones and E. E. Kunhardt. Development of pulsed dielectric breakdown in liquids. *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 28, no. 1, pp. 178-188, January 1995
- [45] E. A. Abramyan, V. A. Kornilov, V. M. Lagunov, A. G. Ponomarenko, and R. I. Soloukhin. Megavolt energy-concentrating device
- [46] I. V. Lisitsyn, H. Inoue, I. Nishizawa, S. Katsuki, and H. Akiyama. Breakdown and destruction of heterogeneous solid dielectrics by high voltage pulses. *Journal of Applied Physics*, vol. 84, no. 11, p. 6262, 1998. <https://doi.org/10.1063/1.368946>
- [47] I. V. Lisitsyn, H. Nomlyama, S. Katsuki, and H. Akiyama. Streamer discharge reactor for water treatment by pulsed power. *Review of Science Instruments*, vol. 70, no. 8, p. 3457, 1999. <https://doi.org/10.1063/1.1149937>
- [48] I. V. Lisitsyn, H. Nomlyama, S. Katsuki, and H. Akiyama. Thermal processes in a streamer discharge in water. *IEEE Transactions on Dielectrics Electrical Insulation*, vol. 6, no. 3, pp. 351-356, June 1999. DOI: 10.1109/94.775622

- [49] Julia Tschugg, Wolfgang Öfner, and Helmut Flachberger. Comparative Laboratory Studies of Conventional and Electrodynamical Fragmentation of an Industrial Mineral. BHM (2017) Vol. 162 (8): 319-325, July 2017
- [50] J. Hofmann and T. H. G. G. Weise. Pulsed power technologies for commercial material reduction and crushing applications, in Pulsed Power Conference, 1997. Digest of Technical Papers. 1997 11th IEEE International, 1997, vol. 1, pp. 203 -207 vol.1. DOI: 10.1109/PPC.1997.679306
- [51] Chaire Mines Urbaines. « <http://mines-urbaines.eu/fr/la-recherche/missions-et-objectifs/metaux-strategiques/> », Métaux stratégiques : développement de nouvelles technologies à haute valeur ajoutée, 14 juillet 2021
- [52] Futura sciences. Fonctionnement d'une LED, LED de couleur et LED blanche « <https://www.futura-sciences.com/tech/dossiers/technologie-led-eclairage-demain-1762/page/2/> », 14 juillet 2021
- [53] SELFRAG, La technologie de fragmentation électrodynamique « <http://www.selfrag.com/> », 14 juillet 2021
- [54] Pilotto Cenci, M., Christ Dal Berto, F., Schneider, E-L., Veit, H-M., 2020. Assessment of LED lamps components and materials for a recycling perspective. Waste Management 107 (2020) 285-293. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.028>
- [55] Antoine BRESCHÉ, « Recyclage des tubes à LED : Analyse matière et conception mécanique », stage ST09 Génie Mécanique, Université de Technologie de Troyes, Automne 2020
- [56] Loan LAPLANCHE, « Recyclage des tubes LED verre et état de l'art sur le recyclage des batteries Lithium-Ion », stage ST09 Matériaux : Technologie et Economie, Université de Technologie de Troyes, Automne 2020
- [57] Xavier Lantoinette et Romain Lesage, « Tri et traitement des lampes LED », Appel à projet, RECYLUM, 4 décembre 2017
- [58] L. Benmamas, G. Housset, K. Nomenyo, K. Bru, M. Beaulieu, P. Leclere, L. Clerget, G. Lérondel, Y. Bouzidi, 2021. Selective separation of plastic LED lamp components using electrodynamic fragmentation for material recovery. Waste Management. Article soumis le 26 juillet 2021

CHAPITRE 4

Valorisation matière

4.1. Introduction

A partir des études du gisement et des bilans massiques des dispositifs à LED réalisés dans le chapitre 2, nous constatons que l'ensemble des matrices plastiques est incinéré et constitue une charge pour la société ARTEMISE. En effet, elle doit payer leur traitement de fin de vie, à hauteur de plusieurs centaines d'euros la tonne. Cette incinération spéciale en tant que déchets dangereux, sans possibilité de récupération d'énergie [1], est rendue obligatoire, par les pouvoirs publics, en cas de concentration en brome supérieure à 2000 ppm, soit 0,2% [2]. Le brome est un produit dangereux en tant que POP (Polluant Organique Persistant) qui ne permet pas de valorisation matière. Il est essentiel d'exposer les enjeux de cette substance d'un point de vue sanitaire, réglementaire et économique. Les retardateurs de flamme bromés, incorporés dans les matrices plastiques des systèmes d'éclairage à LED, sont usités pour minimiser les risques potentiels d'incendie. Nous caractérisons donc les concentrations en brome des plastiques constitutifs des dispositifs à LED. Puis, des solutions viables de tri et d'élimination de ces composés sont proposées, afin de promouvoir le recyclage durable des plastiques non bromés des dispositifs, grâce à la capacité de la technologie des puissances pulsées de fragmenter sélectivement les produits. En conséquence, nous abordons les taux de valorisation qui pourraient être atteints pour les déchets actuels (technologie 2013) mais également pour les déchets futurs (technologie 2020).

Le principe de la fragmentation sélective repose sur l'utilisation de la technologie des puissances pulsées, identifiée et étudiée dans le chapitre 3, pour la déconstruction des lampes et des spots à LED. Nous expérimentons, dans ce chapitre, une approche par l'utilisation de cette technologie pour estimer le potentiel de valorisation des composants électroniques, des dispositifs à LED E27 en plastique, par rapport au potentiel global. De ce fait, nous montrons l'intérêt de créer une ligne de traitement spécifique, pour cette nouvelle typologie de déchets d'équipements électriques et électroniques.

Enfin, nous réalisons dans ce chapitre, une Analyse du Flux de Matières (AFM) pour les typologies plastiques de lampes à LED E27, B22 et E14, représentant 55% du gisement total. Cette approche permet de démontrer l'efficacité de la technologie des puissances pulsées dans le processus global de recyclage des dispositifs LEDs en plastique, pour récupérer les matériaux et les composants électroniques. Ainsi, elle favorise l'extraction des métaux précieux et stratégiques. Cette méthode AFM, d'aide à la compréhension et à la prise de décision, permettra dès lors à ARTEMISE de développer et d'optimiser sa ligne de traitement industrielle en fonction des gains potentiels, grâce à cette brique technologique, dans une dynamique d'économie circulaire vertueuse. Cela devrait lui permettre d'orienter son bilan économique sous différents angles sociétaux, techniques et environnementaux.

4.2. Caractérisation des plastiques des dispositifs LEDs

Les retardateurs de flamme bromés (RFBs) sont des substances chimiques ignifuges incorporées dans les matières plastiques d'appareils électriques (ordinateurs, télévisions, micro-ondes, etc.) et de circuits électroniques. Ces substances sont également présentes dans les mousses, les matériaux de capitonnage domestiques et industriels, les intérieurs de voitures et d'avions, ainsi que dans certains textiles. Elles sont commercialisées sous forme de mélanges et sont usitées dans les matrices des matériaux, pour prévenir la formation de flammes, lorsqu'elles sont en contact de fortes chaleurs [3].

Il existe de nombreux retardateurs de flamme (RFs) selon le programme international sur la sécurité des substances chimiques. Seuls les retardateurs de flamme halogénés présentent le plus grand intérêt industriel, à l'instar du fluor, du chlore, du brome et de l'iode. Ce sont les éléments du groupe

chimique des halogènes. La combinaison du brome et du chlore avec d'autres produits est efficace, dans le rôle de retardateurs de flamme. Toutefois, les plus usités sont [4] :

- Les PolyBromoDiphénylEthers (**PBDE**) incorporés dans les plastiques, textiles, moulages électroniques et circuits électroniques. Trois ont connu un usage commercial :
 - Le pentaBromoDiphénylEther (**penta-BDE**)
 - L'octaBromoDiphénylEther (**octa-BDE**)
 - Le décaBromoDiphénylEther (**déca-BDE**)

La production et la commercialisation du penta-BDE et octa-BDE sont interdites depuis 2004. Puis en 2014, une demande a été déposée par l'ECHA (European CHemicals Agency) pour restreindre les usages du deca-BDE.

- L'HexaBromoCycloDoDécane (**HBCDD**) utilisé principalement comme isolant thermique dans l'industrie du bâtiment, mais aussi dans les équipements électriques et les textiles.
- Le TétraBromoBisPhénol A (**TBBPA**) incorporé dans les cartes des circuits imprimés et dans les thermoplastiques des équipements électriques et électroniques.
- Le PolyBromoBiphényle (**PBB**) usité dans les appareils ménagers, textiles et mousses plastiques.

Notons que le TBBPA et le déca-BDE sont les deux retardateurs de flammes bromés les plus couramment usités dans le monde. Ces substances sont ajoutées comme des additifs lors de la fabrication des produits manufacturés. Elles sont dès lors susceptibles de migrer hors des matrices polymères de ces équipements et d'être rejetées dans leur milieu, notamment lors de leur traitement en fin de vie [4].

4.2.1. Les retardateurs de flamme bromés dans l'environnement

Les retardateurs de flamme bromés, constituent 30% des retardateurs mis sur le marché aujourd'hui. Ils sont incorporés dans les produits de consommation courante, tels que les équipements électriques et électroniques, pour les rendre moins inflammables. Ces équipements relâchent par conséquent des RFBs dans l'environnement, puis contaminent l'air, le sol et l'eau. Ces RFBs peuvent entrer dans la chaîne alimentaire et être retrouvés dans les aliments d'origine animale, tels que le poisson, la viande, le lait et leurs produits dérivés. La première voie d'exposition de la population est l'alimentation, puis par les contacts cutanés ou l'inhalation de poussières contaminées. Les nourrissons, quant à eux, sont exposés aux RFBs via le lait maternel [4].

Tout équipement, traité avec des RFBs, va émettre constamment ces substances dans l'environnement, de sa production jusqu'à son traitement en fin de vie. Les principales sources d'émission sont dès lors les industries de synthèse, d'utilisation et de recyclage de ces composés, mais essentiellement les produits eux-mêmes durant leur cycle de vie. Ces activités contaminent donc continuellement leur milieu et les RFBs, dont plusieurs sont présents dans l'annexe A de la convention de Stockholm sur les Polluants Organiques Persistants³¹ (POPs), s'amoncellent dans l'environnement et dans les organismes, et ce, malgré les interdictions de plusieurs de ces produits. Cette convention est détaillée dans l'annexe 6.

³¹ Composés organiques qui résistent à la dégradation dans l'environnement et qui ont été associés à divers effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement, tels que les Dioxines et Furanes (DF), les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) et l'Hexachlorobenzène [4].

L'éco-organisme ECOSYSTEM qualifie les RFBs de délétères sur la santé humaine et animale. Selon lui, ils doivent donc être détruits en tant que POPs, par incinération ou par enfouissement, en tant que déchets dangereux, sans possibilité de récupération d'énergie [1] [7]. Intéressons-nous aux aspects réglementaires des RFBs.

4.2.2. La réglementation des retardateurs de flamme bromés

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a lancé en 2018 un programme international sur la sécurité des substances chimiques, afin d'établir les bases scientifiques de la gestion rationnelle des produits chimiques et de renforcer en conséquence les capacités nationales en matière de sécurité chimique. Elle permet d'assurer la protection de la santé humaine et de l'environnement, dans le cadre des activités impliquant l'utilisation de substances chimiques. Elle répertorie l'ensemble des substances chimiques, qu'elles soient synthétiques ou naturelles. Elle couvre également l'éventail complet des situations au cours desquelles l'exposition à ces substances pourrait survenir (présence dans l'environnement à l'état naturel, extraction, synthèse, production industrielle, transport, utilisation et élimination en fin de vie) [8].

Les substances chimiques font partie de notre quotidien. La fabrication de la quasi-totalité des biens de consommation électroniques implique leur utilisation. Les produits chimiques, correctement utilisés, contribuent sensiblement à l'amélioration de notre qualité de vie, de notre santé et de notre bien-être. Cependant, certains produits sont très dangereux et peuvent être très nocifs pour notre santé et notre environnement, lorsqu'ils sont mal usités [8].

C'est le cas des plastiques des Equipements Electriques et Electroniques (EEE) qui sont améliorés, vis-à-vis du risque d'incendie, par des ignifugeants et des retardateurs de flamme, en particulier des retardateurs de flamme bromés [2]. Les études menées par l'INERIS³² ont montré que les composés bromés sont présents dans de nombreux EEE :

- Gros équipements ménagers ;
- Jouets ;
- Outils électriques ;
- Systèmes d'éclairage.

Dans le cadre de ses missions d'appui au Ministère en charge de l'Environnement, l'INERIS a réalisé une étude sur les concentrations de brome et de RFBs dans les matrices plastiques provenant des équipements électriques et électroniques. L'étude a été effectuée sur 347 appareils EEE. Une partie des équipements n'a pas révélé de brome (52/347 = 15%), tandis que nombre d'entre eux en contiennent : soit au moins dans une partie (158/347 = 46%) soit dans la totalité des plastiques (137/347 = 39%). La Figure 4-1 illustre les résultats de l'étude. La concentration en brome des matières plastiques est très hétérogène entre les équipements et entre les parties d'un même équipement [2].

Ci-dessous les catégories les plus fréquemment bromées :

- Les gros équipements ménagers (GEM), les jouets et les outils : > 70%
- Les petits appareils ménagers (PAM) et les dispositifs d'éclairage : > 50%
- Les équipements audio, vidéo, d'information et de télécommunication : > 25%

Les deux premières catégories ont une teneur en brome moyenne dépassant 2000 mg/kg, soit 0,2%. Dans les échantillons étudiés le décaBromoDiphénylEther (déca-BDE) domine, dans la

³² Institut National de l'Environnement industriel et des RISques.

famille des PolyBromoDiphénylEthers (PBDE) avec une concentration de 3000 mg/kg, soit 0,3%. Le TétrabromoBisPhénol A (TBBPA) est, quant à lui, présent à des concentrations élevées de 8000 mg/kg, soit 0,8%. En considérant seulement les catégories d'EEE, il ne semble donc pas envisageable de séparer les plastiques bromés de ceux non bromés [2].

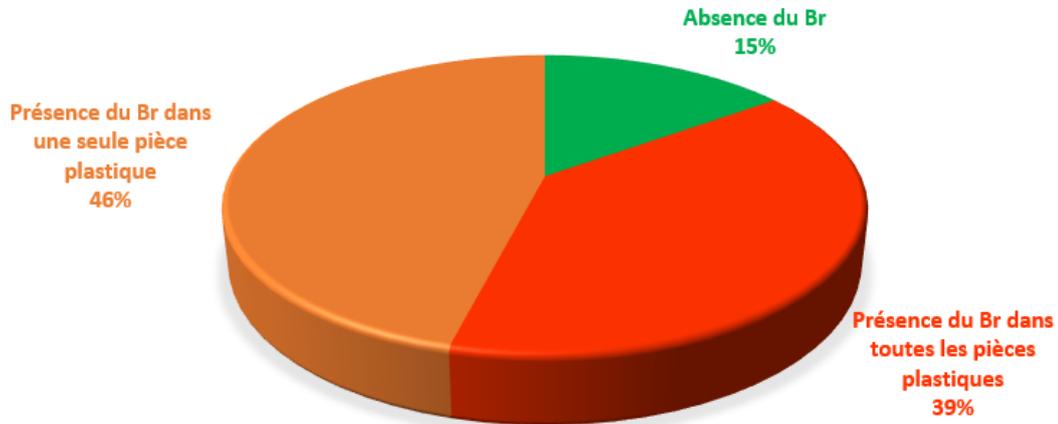


Figure 4-1 : Répartition du brome dans les équipements électriques et électroniques [2]

En 2006, le règlement (CE) n°166/2006 imposait de séparer les plastiques bromés et non bromés, mais sans préciser le seuil à partir duquel un plastique serait considéré comme bromé [9]. La Directive 2012/19/UE du 4 juillet 2012, relative aux DEEE, impose dans son annexe VII l'extraction des matières plastiques contenant des retardateurs de flamme bromés. Cette Directive européenne a été transposée en droit français, par le décret 2014/928 du 19 août 2014. Elle a donné lieu à une mise à jour de l'arrêté relatif aux modalités de traitement de 2005, qui précise dans son article 2 les substances, préparations et composants devant être retirés de tout DEEE. Les matières plastiques contenant des RFBs en font partie.

Pour répondre plus précisément à ces exigences, le Ministère en charge de l'Environnement (depuis 2020, renommé Ministère de la Transition Ecologique) a rédigé la circulaire du 30 novembre 2012, pour clarifier ses attentes. La circulaire stipule les règles concernant la dangerosité et les filières de valorisation autorisées pour les plastiques issus des DEEE. Cette circulaire indique que « certains déchets de plastiques issus de DEEE peuvent être considérés comme ne contenant pas de RFBs, au vu des études publiées sur le sujet. Ces déchets de plastiques sont issus du démantèlement des gros équipements ménagers froid (GEM F) et hors froid (GEM HF), identifiés dans la Directive DEEE comme la catégorie des gros appareils ménagers³³. Le détail des EEE dont les déchets de plastiques issus de leur démantèlement peuvent être considérés comme ne contenant pas de RFB est présenté en annexe I de la présente circulaire. Ainsi, les déchets de plastiques issus de ces flux de DEEE peuvent faire l'objet d'une valorisation sans contraintes spécifiques. Les déchets de plastiques issus de tous autres flux de DEEE sont présumés contenir des RFBs. » [10].

Cette circulaire fixe deux seuils à respecter :

- Le seuil de 2000 ppm de brome (norme CENELEC 50625-3-1)
- Le seuil de 1000 ppm pour les PBDE classés POPs³⁴

³³ Les normes européennes EN 50625-1 et TS 50625-3-1 stipulent également que les plastiques issus des GEM F/HF « doivent être considérés comme dépourvus de RFBs et peuvent être recyclés » sans séparation préalable.

³⁴ Ce seuil (Polluant Organique Persistant) est défini au sein de l'Annexe IV du règlement européen n°850/2004 du 29 avril 2004 (la somme des concentrations de tétraBromoDiphénylEther, pentaBromoDiphénylEther, hexaBromoDiphénylEther et heptaBromoDiphénylEther) ne doit pas dépasser les 1000 ppm.

En 2015, la spécification technique CLC/TS 50625-3-1, élaborée par l'organisme de normalisation CENELEC³⁵, sur mandat de la commission européenne, a défini le seuil de brome à 2000 ppm (0,2% - 2 g/kg). La norme NF EN 50625-1, sur les exigences générales de traitement, est associée aux spécifications relatives à la dépollution (TS 50625-3-1) qui mentionnent que si la somme des concentrations de brome des plastiques est supérieure à 2000 ppm, le site de traitement doit assurer la séparation des plastiques contenant des RFBs. En dessous du seuil de séparation de 2000 ppm de brome, les plastiques sont considérés comme exempts de brome [10].

Des améliorations vis-à-vis du risque d'incendie ont été apportées aux plastiques des équipements électriques et électroniques en y incorporant des retardateurs de flamme bromés. L'évolution de la réglementation sur la classification des déchets dangereux (2014), la publication d'une norme technique sur la gestion des DEEE (2015) et une restriction à l'usage du décaBromoDiphénylEther (déca-BDE), ajouté en 2017 à la liste des POPs réglementés par la convention de Stockholm, induisent des mises à jour concernant la gestion des déchets plastiques [10].

Le règlement européen sur les POPs était en révision depuis mars 2018, pour intégrer par dérogation l'utilisation de déca-BDE dans les avions, les véhicules à moteur et les équipements électriques et électroniques. A la suite de l'accord provisoire du 19 février 2019 entre le Conseil européen et le Parlement européen, le COmité des REprésentants PERmanents (COREPER) s'est réuni le 1^{er} mars 2019. Il a conclu trois seuils distincts de PBDE [11], qui sont présentés dans le Tableau 4-1 ci-dessous.

Périmètre		Accord européen du 19/02/2019
Limites de concentration	POPs ou les UTC (Unintentional Trace Contaminant) dans les produits manufacturés	Déca-BDE : 10 ppm pour la présence dans les substances Somme des PBDE (tétra-, penta-, hexa-, hepta- et déca-BDE) : 500 ppm pour la présence dans les mélanges ou articles Révision de l'UTC 2 ans après l'entrée en vigueur, via un acte délégué
	POPs dans les déchets	Somme des PBDE : 1000 ppm Révision de la limite de concentration 2 ans après l'entrée en vigueur via une procédure ordinaire, pour tenir compte du progrès scientifique et l'abaisser à 500 ppm

Tableau 4-1 : Concentrations limites du PBDE dans les équipements électriques et électroniques [11]

Ce tableau indique les limites de concentration en RFBs imposées dans la législation :

- **10 ppm** pour la concentration limite de déca-BDE dans les substances mises sur le marché ;
- **500 ppm** pour la somme des PBDE pour la mise sur le marché des produits EEE ;
- **1000 ppm** pour la somme de PBDE pour la concentration dans les DEEE.

La Directive RoHS 2011/65/UE, transposée en droit français par le décret n°2013-988 du 6 novembre 2013, mentionne une limite de concentration de 1000 ppm pour les PBDE. Le règlement POPs (déchets) fixe une limite de concentration de 1000 ppm pour les PBDE. Les deux seuils sont similaires et garantissent une cohérence. Notons en outre qu'une vigilance particulière doit être

³⁵ Comité Européen de Normalisation en Electronique et en Electrotechnique.

maintenue, afin de ne pas avoir un seuil autorisé pour la fabrication d'équipements électriques et électroniques plus élevé que dans les déchets [11]. Le RFB incorporé dans les dispositifs LEDs est le TBBPA, nous ne sommes donc pas concernés par cette limite à 1000 ppm (cf. partie 4.2.4).

En somme, les exploitants doivent séparer les plastiques contenant des RFBs si la concentration de brome dans la fraction est supérieure à 2000 mg/kg. A l'inverse, si elle est inférieure à 2000 mg/kg, l'industriel remplit l'exigence de dépollution de RFBs et ne doit aucunement trier ses fractions [2] [11]. Dans la section suivante, nous détaillons les techniques de tri relatives aux plastiques incorporés par des RFBs.

4.2.3. Techniques de détection et de séparation des fractions de plastiques bromés

Les DEEE sont potentiellement des déchets dangereux à cause de la présence des RFBs contenus dans leurs matrices plastiques. Les matrices bromées doivent être séparées de celles non bromées, afin de valoriser les fractions exemptes de brome. La circulaire du 30 novembre 2012, du Ministère en charge de l'Environnement, expose le mode de traitement de ces déchets sur la Figure 4-2 [12].

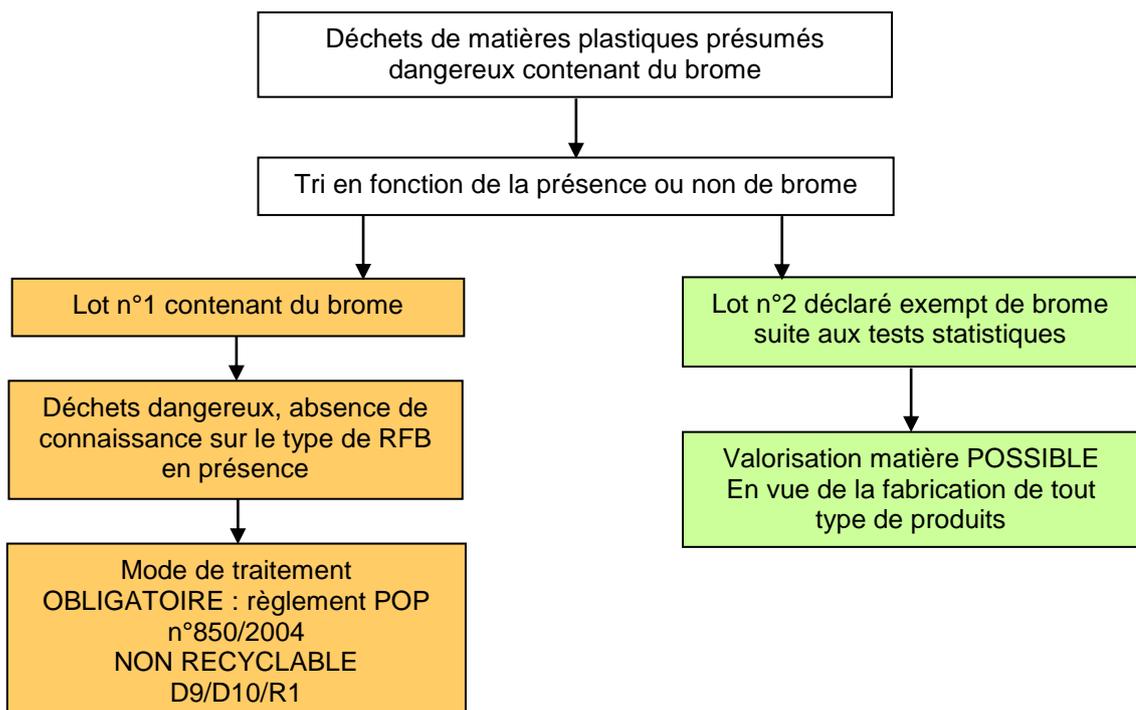


Figure 4-2 : Mode de traitement des DEEE préconisé par le Ministère en charge de l'Environnement [12]

Les déchets doivent être triés en fonction de la présence ou non de RFBs. Le lot n°1 contenant du brome doit être éliminé. Concernant le lot n°2, des tests statistiques sont réalisés pour mesurer la teneur en brome contenue dans chacune des fractions. Les déchets exempts de brome peuvent être valorisés et réintroduits dans la production de nouveaux équipements ou produits de consommation. Il aurait été envisageable de trier les déchets en fonction du type de RFB, pour éliminer uniquement ceux contenant des RFBs considérés POPs. Cependant, la technologie n'étant pas au point à ce jour, tous les DEEE qui contiennent des RFBs sont éliminés en incinérateurs de produits dangereux [12].

Des techniques de détection du brome, à la limite de 2000 ppm, ont été développées et installées sur des lignes industrielles de tri automatisées, afin d'orienter les matières plastiques vers les bonnes filières de valorisation ou d'élimination. Le tri s'effectue sur des déchets plastiques broyés à une granulométrie comprise entre 5 à 50 mm sur des lignes de convoyeurs. Les broyats sont analysés en continu par des systèmes de détection, puis des dispositifs de soufflage les expulsent via des détecteurs qui indiquent la présence ou l'absence de brome [13]. Si la concentration totale en brome est inférieure au seuil imposé de 2000 ppm, le lot est considéré exempt de brome. Les matériaux peuvent en conséquence être orientés vers les filières de recyclage. Cependant, si la concentration est supérieure à 2000 ppm, les matériaux sont écartés des filières de recyclage classiques et sont incinérés en tant que déchets dangereux, par des fours à haute température, sans possibilité de valorisation énergétique [2].

Des techniques de tri des matières plastiques ont été développées mais aucune ne suffit à elle seule pour assurer et séparer les fractions des matières plastiques, issues des DEEE, exemptes de POPs. En pratique, des combinaisons de ces techniques doivent être utilisées et la pureté des fractions triées peut atteindre jusqu'à 95% [14].

Sliding Spark Spectroscopy (SSS) :

Cette technique, appelée communément « spectroscopie à étincelle glissante », permet d'identifier les matières plastiques contenant au minimum 0,1% de brome. Les recycleurs programment le dispositif à 10 000 ppm (1%) de brome car les matrices plastiques contiennent entre 3% et 20% de RFBs-POPs en masse. L'instrument est portable et doit être en contact avec le matériau. L'appareil peut se combiner avec un spectromètre proche infrarouge (NIR), pour analyser les matrices polymères, telle que la machine Mistral + CONNECT développée par PELLENC ST, mais l'élément doit être de couleur clair. Le temps de détection ne prend que quelques secondes [14].

Spectroscopie de fluorescence X (FX) :

Cette méthode repose sur l'émission de photons de rayons X par des atomes excités, via une source laser. Une signature spectrale est créée par les photons émis qui permet de déterminer la masse atomique et le type d'élément analysé [15]. La technique peut être utilisée avec une limite de détection du brome située entre 5 et 100 ppm. Le temps de mesure des appareils portables est d'une minute, avec un contact direct de la surface à analyser. Ce dispositif ne peut donc pas être utilisé pour le tri automatisé des déchets, mais il est utilisé à l'étape de démantèlement ou de tri manuel. Cette technologie permet d'identifier les différents types de matrices polymères.

Transmission des rayons X (XRT) :

Les rayons X pénètrent dans le matériau, une partie de leur énergie est absorbée par celui-ci et une autre est transmise au détecteur. Des informations sont obtenues sur la densité atomique. Le dispositif est adapté surtout pour détecter les métaux [15]. Contrairement aux détecteurs manuels (SSS et FX), surtout utilisés dans les usines de démantèlement, la XRT est utilisée sur des lignes industrielles de tri automatisé des déchets. Elle permet de séparer les plastiques contenant des RFBs [14].

Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) et Raman :

Cette technique d'analyse identifie les liaisons chimiques d'une molécule en produisant un spectre d'absorption ou de transmission infrarouge. La FX permet de quantifier la teneur totale en brome, alors que la FTIR quantifie les composés spécifiques en utilisant des spectres de calibration, pour

lesquels la concentration est connue. Il existe également des appareils portatifs utilisés dans les usines de démantèlement. La spectroscopie RAMAN, quant à elle, consiste à envoyer une lumière monochromatique sur l'échantillon puis à analyser la lumière diffusée. Elle donne des informations sur le substrat. Elle exploite le phénomène physique d'échange d'énergie entre le rayon lumineux et le milieu, qui modifie légèrement la fréquence de la lumière y circulant. Un dispositif à l'échelle pilote, reposant sur la spectroscopie Raman, a été développé et est testé industriellement [14].

Spectroscopie d'émission atomique de Plasma Induit par Laser (LIBS) :

La technologie LIBS, illustrée sur la Figure 4-3, permet d'analyser rapidement les éléments chimiques sans contact avec le matériau [16]. Un micro-plasma est créé à la surface de l'échantillon par un laser. Le rayonnement émis est analysé par spectroscopie optique [17]. L'équipement permet l'identification des atomes légers et de différencier les matrices plastiques, même celles de couleur noire [18]. Par ailleurs, il permet de détecter la présence du brome, mais ne différencie pas les différents types de RFBs [16].

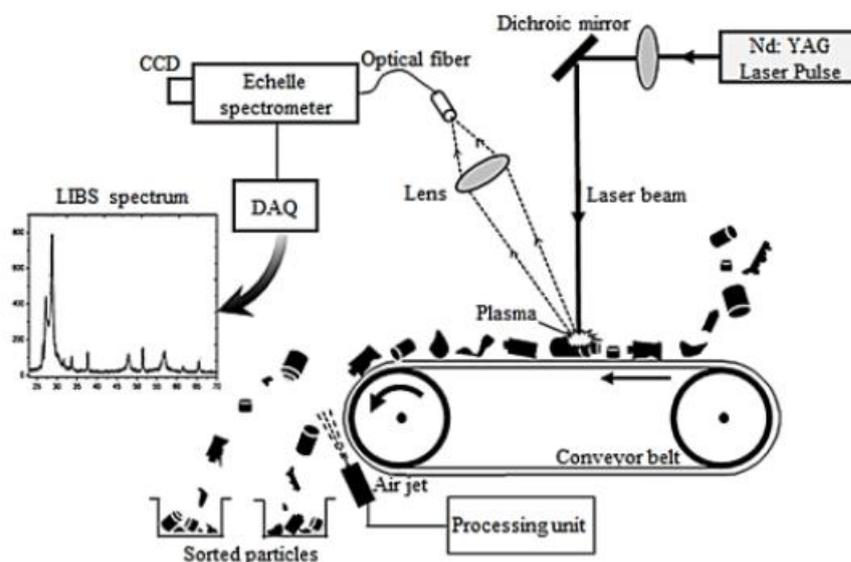


Figure 4-3 : Schéma d'une ligne de tri LIBS [15]

Flottaison :

Cette technique, par voie humide, repose sur les différences de densités des matériaux polymères pour permettre leur séparation. Les RFBs augmentent significativement les densités des matrices plastiques, surtout lorsqu'ils sont ajoutés dans ces dernières à des concentrations supérieures à 3%. En analysant les échantillons dans une solution appropriée, les plastiques légers (non bromés) flottent, alors que les plastiques lourds (bromés) sont immergés, permettant ainsi une séparation des polymères bromés. Des fluides de séparation, avec différentes densités, sont adaptés en fonction de la nature des polymères, afin d'augmenter le rendement de séparation des matériaux plastiques contenant ou non des RFBs. Lorsque les mélanges sont complexes, ce procédé ne permet pas d'obtenir des fractions pures. Il faut le combiner avec les techniques de tri sèches, cités précédemment, pour éliminer les fractions indésirables [19].

Notons que généralement pour maximiser la pureté des fractions plastiques obtenues après traitement, les industriels évitent d'utiliser une seule technique mais privilégient des combinaisons. Le Tableau 4-2 récapitulent les avantages et les inconvénients des techniques de séparation par voies humide et sèche.

Méthodes de séparation	Avantages	Inconvénients
Humide	<ul style="list-style-type: none"> - Simplicité de mise en œuvre ; - Faible coût d'exploitation, à condition de disposer de volumes élevés de déchets ; - Application à tous les plastiques ; - Séparation de matières ayant des densités proches. 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible sélectivité pour les plastiques fortement chargés ; - Quantité importante de liquide nécessaire ; - Utilisation de solvants organiques et nécessité de les évaporer
Sèche	<ul style="list-style-type: none"> - Grande vitesse d'acquisition ; - Reconnaissance des polymères noirs ; - Séparation de polymères contenant des RFBs. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mesure par contact ; - Non identification des différents types de RFBs.

Tableau 4-2 : Les avantages et les inconvénients des méthodes de séparation

Nous souhaitons donner de la visibilité à ARTEMISE sur le potentiel de valorisation des plastiques des dispositifs à LED, afin de promouvoir un recyclage durable de ces produits. Intéressons-nous désormais aux matrices plastiques constituant ces dispositifs à LED, afin de caractériser ces dernières.

4.2.4. Caractérisation du brome dans les matrices plastiques

Des échantillons ont été sélectionnés, à partir des fabricants et des distributeurs les plus représentatifs, en se référant à la base de données constituée lors de l'étude du gisement (cf. partie 2.2.2). Pour chacune des typologies de lampes, de spots et de tubes à LED, plusieurs échantillons ont été prélevés, pour réaliser des essais de spectroscopie infrarouge FTIR (pour caractériser la nature des matériaux constituant les matrices polymères des dispositifs à LED démantelés) et de fluorescence de rayons X (pour quantifier les taux de brome incorporé dans les matrices). Les caractéristiques des 29 échantillons identifiés sont présentés dans le Tableau 4-3. Par ailleurs, les épaisseurs des systèmes optiques, des corps et des culots de l'ensemble des échantillons, ont été mesurées avec un dispositif de marbre doté d'un comparateur, afin de pouvoir les caractériser par la spectroscopie infrarouge, dont les résultats dépendent des épaisseurs traversées.

Rappelons que tous les plastiques des dispositifs à LED sont actuellement incinérés, à hauteur de 540 € la tonne (cf. chapitre 2), sans possibilité de récupération d'énergie [1], ce qui constitue un déficit financier pour l'entreprise ARTEMISE. Par conséquent, afin d'améliorer sa rentabilité économique, nous analysons la nature des matrices plastiques constituant les bulbes, les corps, les culots et les mousses isolantes des lampes à LED, ainsi que les systèmes optiques et les culots des tubes à LED. Ces analyses ont été réalisées dans le cadre d'une coopération avec les Arts et Métiers ParisTech - Institut ENSAM de Chambéry [20]. Subséquemment, nous pourrions conclure sur le potentiel de tri, puis de séparation des plastiques bromés et non bromés des équipements d'éclairage à LED. L'objectif est de majorer les taux de valorisation matière, en évitant d'incinérer tous les plastiques de ces dispositifs, en tant que déchets dangereux, par des incinérateurs équipés de fours capables de casser les liaisons C-Br [1] [7].

Les deux techniques utilisées caractérisent les matériaux constitutifs des matrices plastiques (systèmes optiques, corps, mousses diélectriques répartitrices de chaleur et culots), le type de retardateur de flamme bromés incorporé dans ces dernières, ainsi que les concentrations de brome correspondantes.

Type	Référence produit	Puissance (W)	Température (K)	Masse (g)	Date de fabrication	Flux lumineux (lm)	Nombre de puces LEDs	Drivers enrobé de mousse	Epaisseur bulbe (mm)	Epaisseur corps/culot (mm)	
E14	IKEA	LED1523G5	5	2 700	28,51	20/06/2016	400	4	Non	0,70	0,73
	OSRAM	AB41330	3,3	2 700	25,82	-	-	4	Non	1,05	0,96
	Philips	9290012359	2,9	2 700	54,43	-	230	4	Non	1,83	1,46
	LEXMAN	S2009101460	4,4	3 000	49,55	-	196	4	Non	3,01	1,37
E27	OSRAM	AA67623	10	6 500	105,48	10/11/2014	-	26	Oui	2,15	1,15
	OSRAM	AA59670	13	2 700	119,54	-	-	33	Non	2,00	1,25
	XXCELL	701826	12	2 700	117,24	29/06/2015	1 055	1	Non	0,83	1,49
	Philips	9290002488	8	3 000	98,51	08/06/2015	600	15	Oui	1,92	0,74
	Philips	9290011796A	9,5	4 000	56,70	-	806	16	Non	0,96	1,14
	Philips	9290011717	9	2 700	64,28	-	806	8	Non	1,09	1,16
	BENEITO FAURE	592125R2-C	12	2 700	129,97	10/02/2014	1 100	36	Non	2,27	1,12
	Vision-EI	73934	6	4 000	36,19	19/02/2018	-	16	Non	0,63	1,06
	XXCELL	XX706142	8,5	3 000	54,73	11/01/2016	806	24	Non	0,96	1,14
B22	LEXMAN	207447140718	9,7	2 700	37,07	-	806	10	Non	0,55	0,92
	THOMAS WATT	B22AB910626	9	3 000	48,32	24/10/2016	806	9	Non	0,74	0,94
	Philips	9290012340B	11	2 700	66,70	-	1 055	11	Non	1	1,15
	OSRAM	AB34970	5,5	3 000	38,50	-	350	4	Non	1,78	1,64
GU10	PROlampes LED	QM-GU10-7	7	3 000	77,67	01/05/2013	-	4	Non	2,08	Alu
	EGLO	11036	3	3 000	65,38	-	-	6	Non	Verre	1,08
	LEXMAN	S0120058863	1,8	-	66,53	-	-	1	Non	2,24	1,04
	AX	409170	5	3 000	32,66	12/05/2017	-	6	Non	1,69	1,08
GU5.3	SCS	KN-12-3D	3	3 500	48,15	-	-	3	Non	2,04	Alu
	LDE	01-39-15-88-88	5	-	49,92	-	-	5	Non	1,32	1,39
	OSRAM	AA65318	5,9	4 000	55,35	-	400	4	Non	1,75	1,70
	Philips	9290011502	8	3 000	55,50	-	621	4	Non	1,63	Alu
Tube	GeLighting	17161YK/1	27	4 000	306,43	-	3 300	120	Non	0,95	0,79
	Philips	9290002801A	22	-	312,39	07/09/2015	2 000	108	Non	0,92	0,80
	OSRAM	310714B	22	3 000	359,87	-	1 800	84	Non	0,95	0,96
	NOVADAY	ND-TL-211-840-ST	29	4 000	441,22	09/11/2015	-	140	Non	0,95	0,99

Tableau 4-3 : Récapitulatif des échantillons de lampes, de spots et de tubes à LED analysés par la spectroscopie infrarouge et de fluorescence X

Un dispositif portable de fluorescence X de type pistolet a été utilisé, dans le cadre de cette étude. L'appareil émet des rayons X délétères pour la santé. Pour prévenir en cas de fuite, un dosimètre est disposé à proximité, lors des essais (cf. Figure 4-4).



Figure 4-4 : Photographie du pistolet de fluorescence X (à gauche) et du dosimètre (à droite) [20]

Ainsi, sur un total de 58 parties d'échantillons (systèmes optiques, corps, mousses et culots), dont 29 corps et culots, 16 contiennent du brome sous forme de retardateur de flamme bromé TétrabromoBisPhénol A (TBBPA), soit 55%. La structure chimique du TBBPA est présentée sur la Figure 4-5. Ce RFB est incorporé dans les matrices polymères constituant les corps et les culots des lampes, ainsi que les culots des tubes, qui sont susceptibles de monter en température, par la présence des alimentations électriques (drivers) dans ces sous-ensembles.

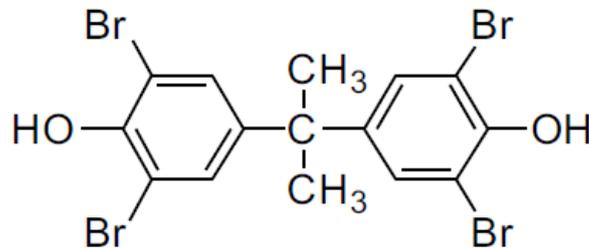


Figure 4-5 : Structure chimique du TétrabromoBisPhénol A (TBBPA) [21]

Selon les différents distributeurs de lampes, de spots et de tubes à LED que nous avons sélectionnés (cf. chapitre 2), les concentrations en brome varient de 1 ppm ($1,10^{-4}\%$) à 81 600 ppm (8,16%). Les résultats de cette étude sont récapitulés dans le Tableau 4-4 [20].

Cette analyse des dispositifs à LED, par spectroscopie infrarouge FTIR et de fluorescence de rayons X, a permis de conclure que :

- **Les systèmes optiques** sont uniquement constitués de **PolyCarbonate (PC)** (cf. Figure 4-6). La concentration de brome dans ce matériau polymère varie entre 1 ppm à 9 ppm et la densité de la matrice plastique est estimée entre 1,19 à 1,22.
- **Les corps et les culots** sont principalement composés de **PolyButylèneTéréphtalate (PBT)** (cf. Figure 4-7). La concentration de brome varie entre 1 ppm à 8,16% et la densité de la matrice plastique est comprise entre 1,31 et 1,88.

Notre attention se porte donc sur les corps et les culots des dispositifs LEDs constitués de PET³⁶ ou de PC et/ou de PBT. Nous pouvons très clairement remarquer que les fortes concentrations de brome, dans ces sous-produits, ne sont détectées que dans les matrices PBT. Leur concentration moyenne en brome est estimée à $4,71 \pm 0,02\%$ (soit 47 100 ppm) et celle du TBBPA est donc évaluée à $7,98 \pm 0,02\%$ (soit 79 800 ppm). La densité de la matrice PBT + TBBPA varie de 1,55 à 1,88 [20].

Seuls deux échantillons de notre sélection contiennent une fraction de silicone dans les corps des lampes E27 OSRAM (réf. AA67623) et Philips (réf. 9290002488). D'après les informations relevées, leurs dates de fabrication se situeraient entre 2014 et 2015. Par ailleurs, leur masse est respectivement de 105 g et 99 g. D'après les bilans matériaux et composants électroniques réalisés dans le chapitre 2, ces produits sont issus d'une ancienne technologie avec des dissipateurs thermiques et des mousses isolantes répartitrices de chaleur en silicone pour refroidir les drivers. Il est opportun de rappeler que ces sous-produits seraient voués à disparaître des lampes et spots à LED grâce à la maîtrise des matériaux semi-conducteurs (cf. chapitre 2). Cet échantillonnage n'est pas assez représentatif pour que nous puissions caractériser la présence ou non du brome dans les matrices en silicone. Cependant cette matière étant en contact direct avec les drivers, nous la considérons donc incorporée par le brome, et ce, malgré sa disparition supposée.

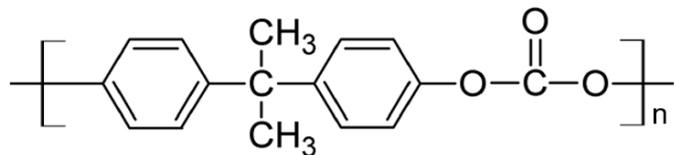
³⁶ PolyEthylèneTéréphtalate.

Type	Référence produit	Système optique			Corps/Culots			Mousse		
		Matériau	[Br] moy	Densité	Matériau	[Br] moy	Densité	Matériau	[Br] moy	
E14	IKEA	LED1523G5	PC	3ppm	1,20	PBT + TBBPA	4,51%	1,62	-	-
	OSRAM	AB41330	PC	2ppm	1,21	PBT + TBBPA	3,93%	1,63	-	-
	Philips	9290012359	PC	3ppm	1,22	PBT + TBBPA	5,63%	1,60	-	-
	LEXMAN	S2009101460	PC	3ppm	1,19	PC	5ppm	1,20	-	-
E27	OSRAM	AA67623	PC	3ppm	1,21	PBT + TBBPA	0,85%	1,63	PBT	6ppm
	OSRAM	AA59670	PC	3ppm	1,22	PBT + TBBPA	6,06%	1,59	-	-
	XXCELL	701826	PC	2ppm	1,22	PBT	4ppm	1,31	-	-
	Philips	9290002488	PC	3ppm	1,21	PBT + TBBPA	5,17%	1,62	PBT	3ppm
	Philips	9290011796A	PC	3ppm	1,20	PET	3ppm	1,40	-	-
	Philips	9290011717	PC	2ppm	1,22	PC	2ppm	1,20	-	-
	BENEITO FAURE	592125R2-C	PC	3ppm	1,20	PBT	1ppm	1,32	-	-
	Vision-El	73934	PC	1ppm	1,20	PBT + TBBPA	2,96%	1,88	-	-
B22	XXCELL	XX706142	PC	1ppm	1,20	PBT + TBBPA	3,82%	1,55	-	-
	LEXMAN	207447140718	PC	3ppm	1,21	PC	3ppm	1,20	-	-
	THOMAS WATT	B22AB910626	PC	3ppm	1,20	PBT + TBBPA	3,91%	1,58	-	-
	Philips	9290012340B	PC	3ppm	1,21	PBT + TBBPA	5,29%	1,58	-	-
GU10	OSRAM	AB34970	PC	2ppm	1,20	PBT + TBBPA	5,45%	1,58	-	-
	PROlamps LED	QM-GU10-7	PC	2ppm	1,20	Aluminium	-	-	-	-
	EGLO	11036	Verre	-	-	PBT + TBBPA	8,16%	1,67	-	-
	LEXMAN	S0120058863	PC	2ppm	1,21	PBT	2ppm	1,36	-	-
GU5.3	AX	409170	PC	1ppm	1,20	PBT + TBBPA	5,11%	1,58	-	-
	SCS	KN-12-3D	PC	3ppm	1,19	Aluminium	-	-	-	-
	LDE	01-39-15-88-88	PC	2ppm	1,21	PC	6ppm	1,20	-	-
	OSRAM	AA65318	PC	4ppm	1,22	PBT + TBBPA	2,50%	1,65	-	-
Tube	Philips	9290011502	PC	3ppm	1,20	Aluminium	-	-	-	-
	GeLighting	17161YK/1	PC	3ppm	1,20	PBT + TBBPA + fibre de verre	6,43%	1,57	-	-
	Philips	9290002801A	PC	3ppm	1,21	PBT + TBBPA	5,54%	1,59	-	-
	OSRAM	310714B	PC	9ppm	1,20	PBT + PC	3ppm	1,32	-	-
	NOVADAY	ND-TL-211-840-ST	PC	3ppm	1,22	PC	3ppm	1,21	-	-

Tableau 4-4 : Récapitulatif de la caractérisation des systèmes optiques, corps et culots de lampes et de tubes à LED, par spectroscopie de fluorescence X [20]



(a)

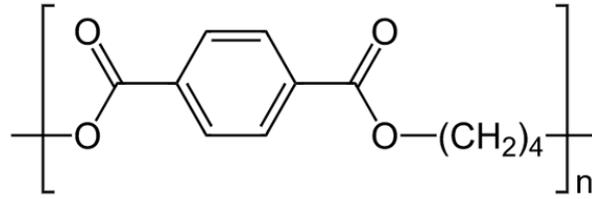


(b)

Figure 4-6 : PolyCarbonate (PC) : Echantillon broyé [20] (a) et structure chimique (b) [22]



(a)



(b)

Figure 4-7 : PolyButylèneTéréphtalate (PBT) :
Echantillon broyé [20] (a) et structure chimique (b) [23]

Le seuil de tri réglementaire de 2000 ppm (0,2% - 2 g/kg) de brome imposé [2] est dès lors dépassé. Nous devrions incinérer toutes les matrices plastiques des dispositifs à LED, en tant que déchets dangereux. Ce qui est coûteux en énergie et détruit de la matière. Le modèle correspondant, à ce scénario, n'est pas propice à la stabilité économique de l'entreprise, car le prix du traitement des déchets dangereux est onéreux, à hauteur de plusieurs centaines d'euros la tonne. Ce qui constitue une charge et donc un bilan économique non rentable pour ARTEMISE.

En outre, nous pouvons analyser l'influence du taux de brome sur la densité de la matrice PBT. La Figure 4-8 illustre la variation de cette densité en fonction de la concentration de brome. Nous constatons dans un premier temps que la présence du brome augmente la densité du PBT (initialement de 1,31) et dans un second temps malgré une faible concentration de brome la densité de la matrice reste également élevée. Ce dernier point serait dû à la présence de charges incorporées dans la matrice PBT, tels que des fibres de verre, des colorants, du talc, etc.

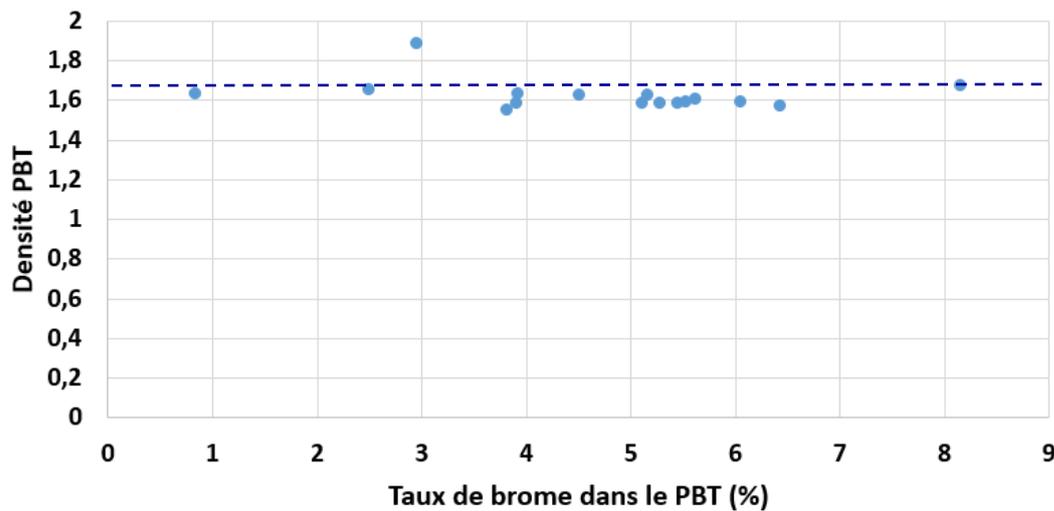


Figure 4-8 : Densité de la matrice PBT en fonction de la concentration de brome

Par ailleurs, nous souhaitons nous assurer de la non dangerosité du matériau PC, constituant les systèmes optiques des dispositifs à LED, par l'absence de la liaison C-Br. Pour cela, nous analysons et confrontons les spectres infrarouges FTIR des bulbes de deux lampes à LED, avec ceux d'autres produits de la consommation courante, dont les matrices polymères sont constituées

de PC. Les échantillons choisis sont une paire de lunettes de protection (EPI³⁷) et un biberon. L'ensemble des échantillons est présenté sur la Figure 4-9. Ces produits ne font pas partie de la catégorie des EEE et nous nous attendons à ne pas caractériser la signature spectrale du brome. Notons que les biberons fabriqués actuellement sont constitués de PolyPropylène (PP). Nous avons dû en conséquence trouver un biberon qui a été commercialisé dans les années 1990.

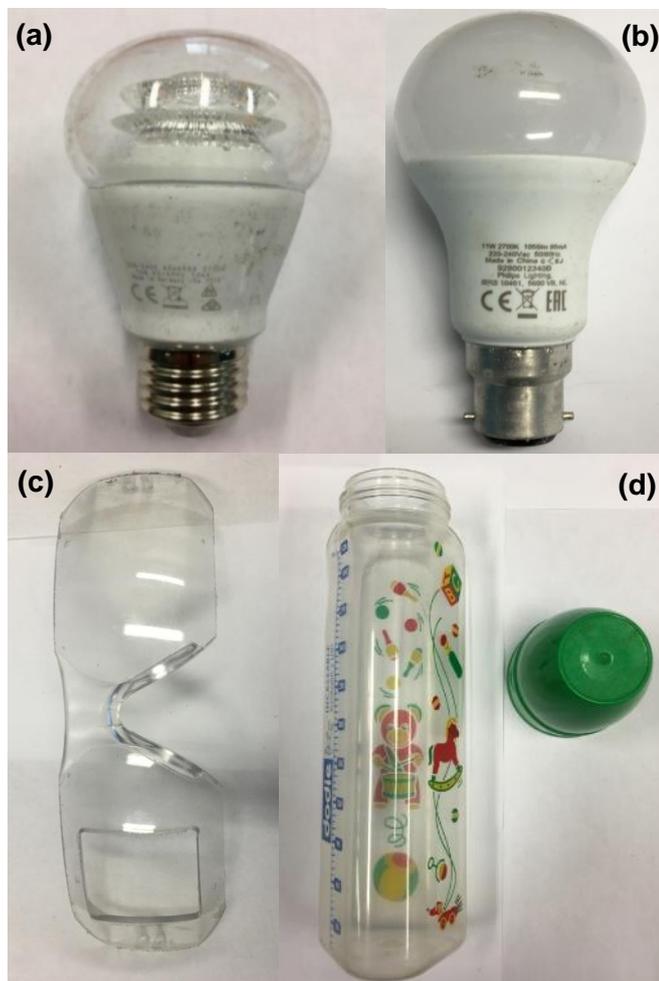


Figure 4-9 : Photographies des produits en PC analysés par spectroscopie IR FTIR : Lampe E27 OSRAM (a), lampe B22 Philips (b), lunettes de protection (c) et biberon (d)

La bande caractéristique de la liaison C-Br étant située entre $515-690\text{ cm}^{-1}$ [21], nous focalisons notre analyse des spectres infrarouges entre $500\text{ et }800\text{ cm}^{-1}$, à différentes épaisseurs, pour les quatre échantillons. Puis, nous comparons ces spectres avec celui d'un échantillon en PC de référence, vierge dépourvu de brome. La Figure 4-10 présente les spectres du TBBPA, issus de la thèse de Layla Gripon, dont le sujet est « Contribution au recyclage et à la valorisation des matières plastiques issues des déchets d'équipements électriques et électroniques contenant des retardateurs de flamme bromés » [21] [24]. Le TBBPA est caractérisé dans une matrice polymère constituée en Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS), puis extrait à 80% de celle-ci par dissolution et précipitation. L'absorbance de l'extrait de TBBPA est plus importante que celle du RFB noyé dans la matrice ABS. Ceci confirme l'efficacité de la méthode de dissolution-précipitation utilisée par l'auteur, avec des solvants d'acétate d'éthyle et d'éther diéthylique. Une perte de matière a été néanmoins observée, lors de l'étape de précipitation, puisque de l'ABS est identifié dans

³⁷ Equipement de protection individuelle.

l'extrait par la présence de la bande à 2240 cm^{-1} , mais peu visible, caractéristique de la liaison $\text{C}\equiv\text{N}$ [21].

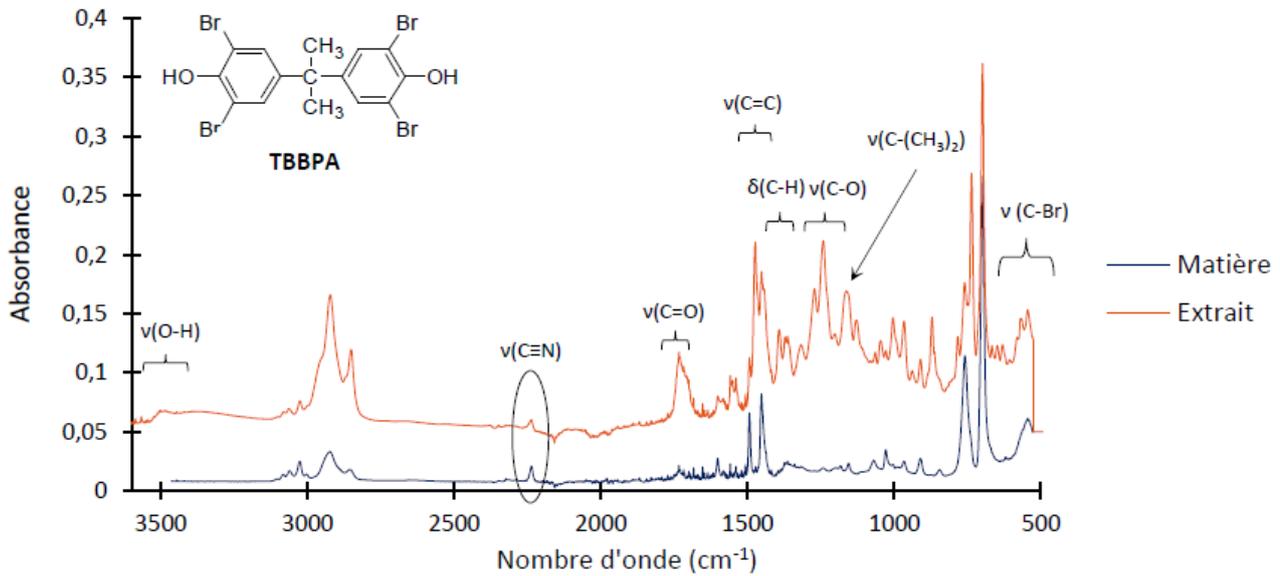


Figure 4-10 : Spectres IR du TBBPA extrait et dans la matière (ABS) après dissolution-précipitation [21]

Afin de vérifier la signature spectrale de la liaison C-Br, nous analysons deux échantillons étalons de calibration en PolyPropylène (PP), dopés par du brome respectivement à des concentrations de 1% et 5%. Nous multiplions donc d'un facteur 5 le spectre du PP 1% Br. Nous constatons qu'il y a une superposition des deux spectres, sur la plage $540\text{ à }760\text{ cm}^{-1}$. Les spectres sont illustrés sur la Figure 4-11. Cela confirme bien notre choix d'intervalle de nombre d'onde : $500\text{ et }800\text{ cm}^{-1}$. Dans la matrice PP, la présence du brome serait potentiellement identifiée à $565, 580, 630, 650, 705, 712\text{ et }737\text{ cm}^{-1}$. Nous aurions souhaité analyser des échantillons de calibration en PC, mais malheureusement l'Institut ENSAM de Chambéry n'a pas pu nous fournir ces échantillons de référence.

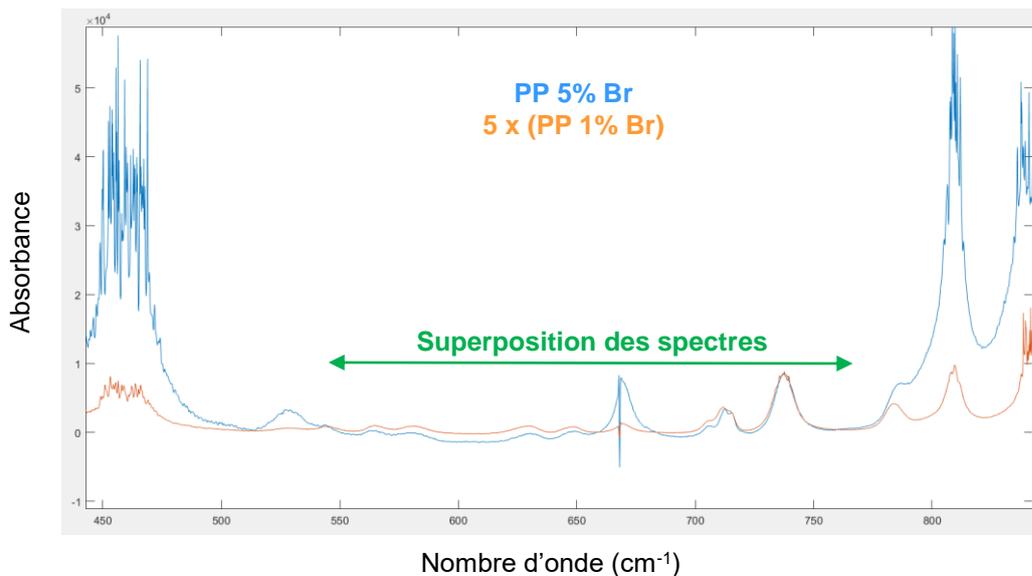


Figure 4-11 : Spectres IR de deux échantillons PP dopés à 1% et 5% de brome

Les Figures 4-12 à 4-15 présentent les spectres IR obtenus en transmission pour les quatre échantillons sélectionnés. Notons que les artefacts observés à 670 cm^{-1} sont dus à une anomalie du dispositif expérimental de spectroscopie IR PerkinElmer®.

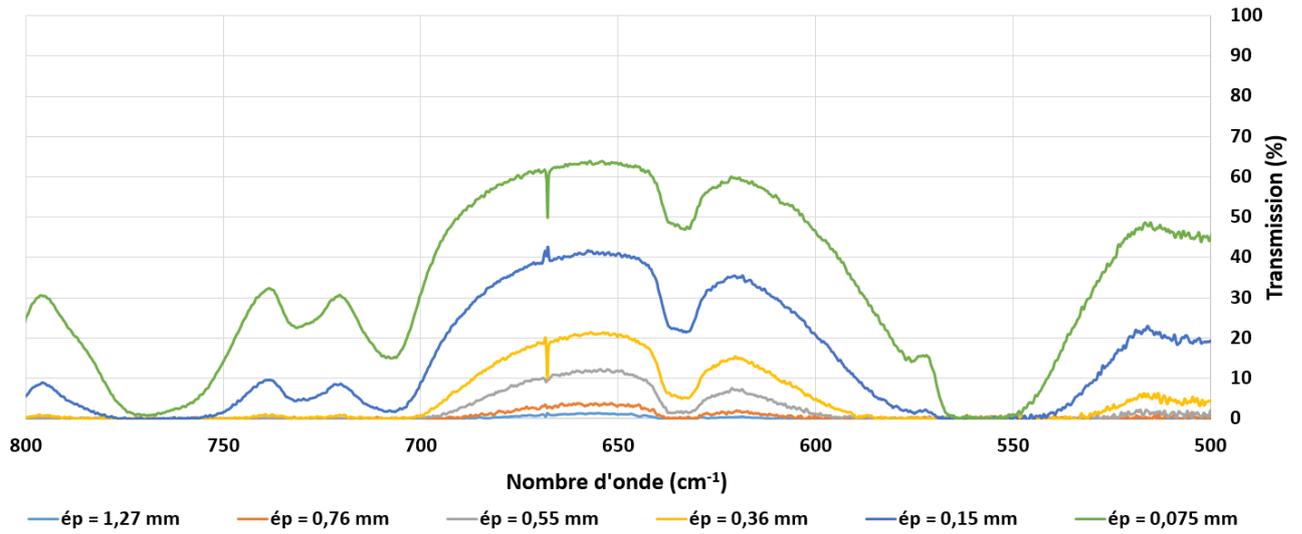


Figure 4-12 : Spectre IR en transmission de la lampe E27 OSRAM (Réf : AA66588)

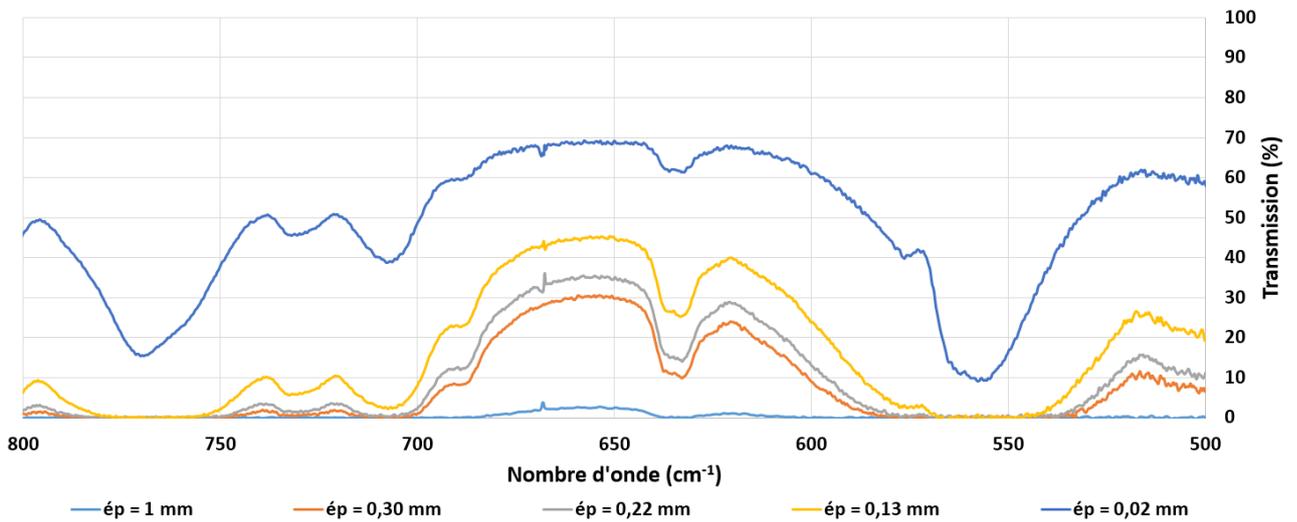


Figure 4-13 : Spectre IR en transmission de la lampe B22 Philips (Réf : 9290012340B)

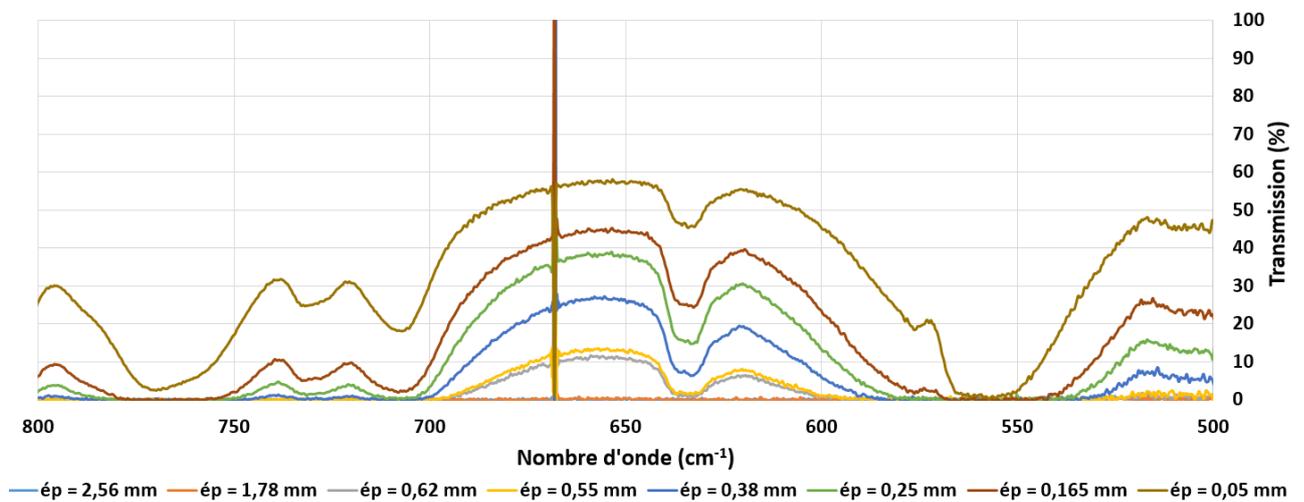


Figure 4-14 : Spectre IR en transmission des lunettes de protection

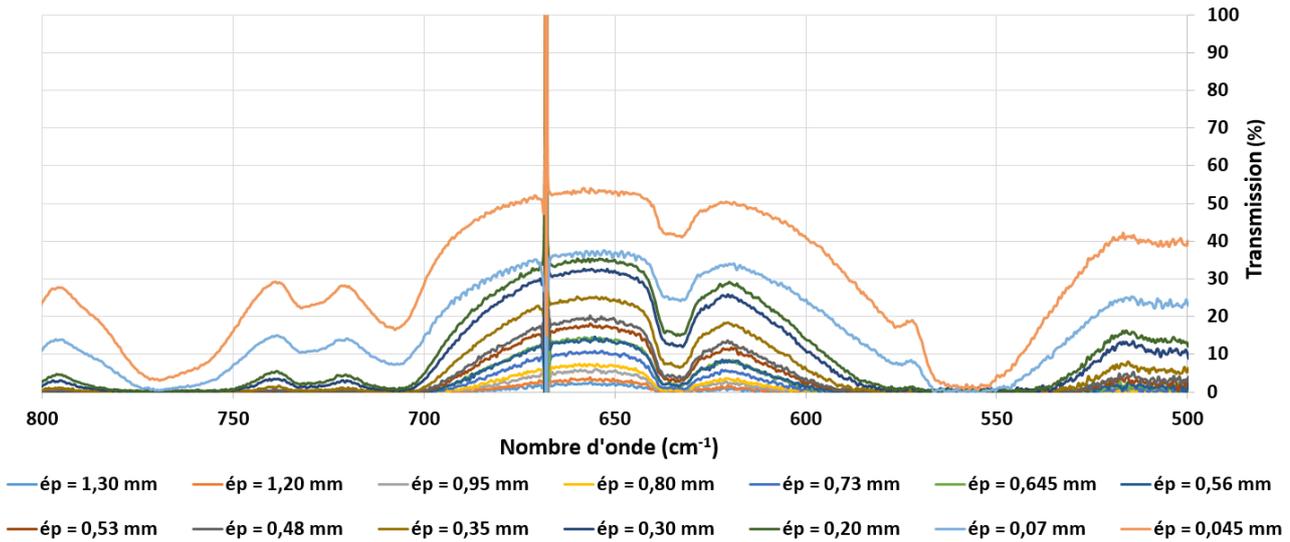


Figure 4-15 : Spectre IR en transmission du biberon

L'allure générale des spectres obtenus est semblable, pour les quatre échantillons, avec sept pics d'absorption identifiés à 560, 575, 630, 690, 710, 735 et 770 cm^{-1} . Dans un premier temps, nous pourrions penser que ces raies d'absorption soient liées à la présence du brome dans les matrices PC, qui absorbe le rayonnement incident. Dans un second temps, afin de confirmer ou d'infirmer la présence ou non du brome dans ces matrices, nous confrontons ces spectres avec celui d'un PC de référence, vierge exempté de brome. La Figure 4-16 représente le spectre normalisé en transmission d'un échantillon PC de référence dépourvu de brome, mesuré par ATR-FTIR [25], sur lequel nous distinguons également les sept raies d'absorption, observées sur nos échantillons. Par ailleurs, la transmission suit la loi de Beer-Lambert et dépend de l'épaisseur des échantillons. Plus ces derniers sont fins, plus leur transmission est importante.

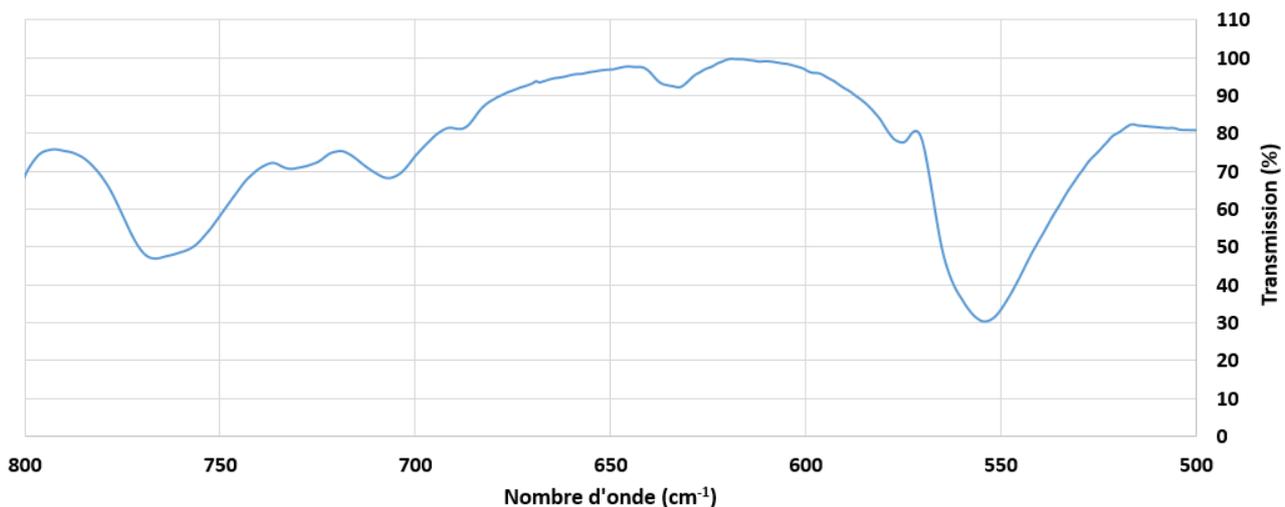


Figure 4-16 : Spectre IR en transmission du PC pur sans brome [25] [26]

A partir de cette analyse, nous nous assurons que les spectres obtenus à partir des systèmes optiques des dispositifs à LED sont semblables à ceux obtenus à partir des lunettes de protection et du biberon. Nous avons orienté notre choix vers ces objets du quotidien, étant donné leurs usages professionnel et domestique, pour lesquels nous pouvons nous attendre à une absence de brome. Par ailleurs, en comparant ces spectres à celui d'un matériau PC vierge non dopé en brome,

nous sommes en mesure d'affirmer doublement que les systèmes optiques sont dépourvus de brome et qu'ils sont enclins à un recyclage mécanique conventionnel. Actuellement, la seule valorisation des matrices plastiques des dispositifs à LED est l'incinération. De par cette étude, nous proposons une nouvelle voie de bonification des plastiques constituant les systèmes optiques, ce qui est favorable au taux de recyclage. Pour cela, il est nécessaire de proposer une solution de tri fiable techniquement et viable économiquement.

4.2.5. Solution de tri des plastiques

Nous avons découvert grâce à la technologie des puissances pulsées, dans un premier temps, qu'il est possible de séparer les matrices PC sans TBBPA des lampes à LED, constituant les bulbes, des matrices PBT incorporées par le TBBPA, constituant les corps et les culots, en utilisant un dispositif de séparation par flottaison. Lors des études paramétriques réalisées avec les outils laboratoires XCRUSHER et SELFRAG Lab, nous avons observé que les systèmes optiques en plastique flottent à la surface du réacteur, tandis que les corps et culots sont immergés au fond de ce dernier. Ainsi, il sera envisageable de recycler les matériaux plastiques non bromés, au lieu d'incinérer l'ensemble des plastiques constitutifs des systèmes d'éclairage à LED. Par conséquent, le taux de valorisation matière sera augmenté de 9,8% sur les technologies 2013 (déchets actuels, cf. partie 2.4.1) et de 9,6% sur les technologies 2020 (déchets futurs, cf. partie 2.4.3). Ces résultats sont obtenus à partir des fractions de PC des bulbes des dispositifs.

Pour approfondir cette réflexion les systèmes optiques et certains corps et culots dépourvus de brome peuvent également être séparés, dans un second temps, après une étape de broyage conventionnelle ou en utilisant les puissances pulsées pour déchiqeter ces différents sous-ensembles en broyats.

Contenu de la masse atomique du brome, nous nous attendons à ce qu'une matrice plastique chargée par ce composé ait une densité plus élevée. Le brome pur a une densité de 3,1. Toutefois, ce n'est pas le brome pur qui est additivé mais le TBBPA (cf. Figure 4-5), dont la densité de 2,12 reste supérieure à celles du PC et du PBT, respectivement égales à 1,2 et 1,31. Cette différence de densité des matériaux plastiques permet en conséquence une séparation par flottaison. Dès lors, dans une solution aqueuse de chlorure de calcium (CaCl_2) de densité 1,41, le PBT chargé en TBBPA de densité 1,6, déterminée expérimentalement, coule alors que le PBT non chargé flotte [27] [28]. La Figure 4-17 schématise un essai réalisé, à l'ENSAM Chambéry, sur un échantillon de lampes à LED broyées à une granulométrie de 10 mm, pour séparer les matrices polymères en PC et PBT.

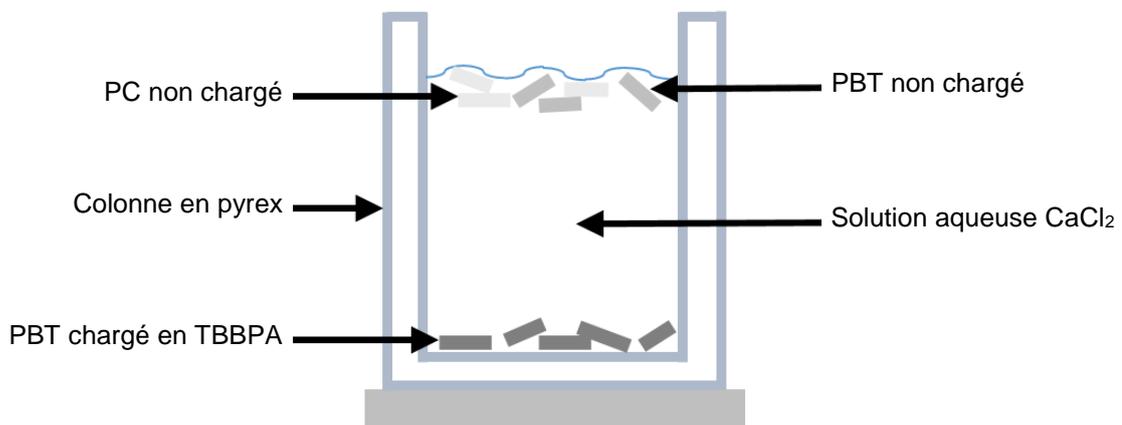


Figure 4-17 : Essai de flottaison sur des lampes à LED broyées (ENSAM Chambéry) [27]

Dès lors, les matrices broyées de PBT non chargées en TBBPA, estimées dans cette étude à hauteur de 45% [20] [27], flottent à la surface de la solution aqueuse de CaCl_2 et celles de PBT

chargées en TBBPA, évaluées à 55%, sont immergées au fond de cette solution. Ce dispositif de tri des fractions plastiques permet d'augmenter davantage les taux de recyclage et de valorisation énergétiques des dispositifs d'éclairage à LED. En outre, nous remarquons que ce tri densimétrique stationnaire, à l'échelle laboratoire, a permis de séparer les fractions chargées en brome (4,71% en moyenne) des fractions faiblement chargées (quelques ppm). Néanmoins, ARTEMISE devra s'assurer sur un échantillonnage plus important, qu'une séparation par flottaison, à l'échelle pré-industrielle, induira une qualité équivalente à celle obtenue en laboratoire, afin de confirmer non seulement la capacité de la solution, mais encore la fraction non bromée des corps et des culots.

Cette solution de séparation favorise le recyclage des fractions non chargées en TBBPA des systèmes optiques, des corps et des culots. Ces matériaux serviront à la fabrication de nouveaux dispositifs d'éclairage à LED ou à celle d'autres types de produits. Ce qui offre de nouvelles perspectives applicatives à ces plastiques recyclés et optimise ainsi durablement leur traitement en fin de vie.

Le PC peut être réutilisé dans de nombreux autres secteurs :

- BTP (vitrages, toitures, abris, vérandas) ;
- Horticulture (serres) ;
- Domestique (verres, tupperwares, biberons) ;
- Aéronautique (sièges d'avions, combinaisons de protection des astronautes) ;
- Automobile (phares, rétroviseurs) ;
- Electroménager (bouilloires, sèche-cheveux, réfrigérateurs, mixeurs) ;
- High-tech (CD, boîtiers de smartphones et d'ordinateurs) ;
- etc.

Les secteurs du PBT non chargé sont :

- Automobile (pièces isolantes moteurs) ;
- Textile (boutons de chemises) ;
- BTP (boîtiers de contacteurs) ;
- Domestique (interrupteurs, prises électriques) ;
- etc.

Il est possible, par ailleurs, de les valoriser sous forme thermique en cimenterie ou en incinération, comme déchets banals, car pauvres en brome (quelques ppm). Cela éviterait de les incinérer en tant que déchets dangereux [27].

Cependant, les matrices PBT incorporées par le TBBPA sont plus problématiques à traiter. Une des voies possibles de valorisation serait d'éliminer le retardateur de flamme bromé de ces dernières, par le procédé de sublimation. Si bien que, nous pourrions optimiser dans ce scénario les taux de valorisation énergétiques [27] [29].

4.2.6. Sublimation des retardateurs de flamme bromés par pyrolyse

Nous allons maintenant aborder les aspects de sublimation du RFB. Il est en effet possible de réaliser un traitement de sublimation du retardateur de flamme bromé TBBPA, en chauffant à 302°C le PBT chargé par pyrolyse. Ainsi, le brome est éliminé de la matrice polymère. A 450°C, le PBT se dégrade à 94%.

La Figure 4-18 illustre la perte massique du PBT, en fonction de la température de pyrolyse. La dégradation du PBT induit aussi celle du TBBPA, avec une émission du brome sous forme vapeur.

La valorisation du coke de plastique PBT en énergie pourrait être envisageable techniquement. Ainsi, le brome serait éliminé des matrices plastiques PBT et ces dernières pourraient dès lors être valorisées énergétiquement [27]. Des essais ont été réalisés, avec un dispositif pilote de pyrolyse à l'ENSAM Chambéry au Laboratoire de Conception Produits et Innovation (LCPI), afin d'étudier cette voie de valorisation et d'appréhender cette solution en laboratoire.

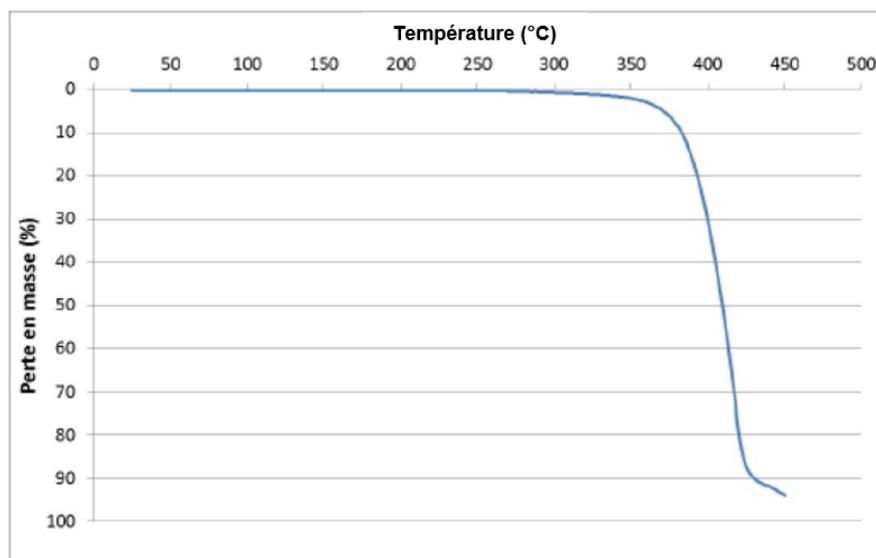


Figure 4-18 : Pyrolyse du PBT (perte massique en fonction de la température) [27]

Une installation semi-industrielle d'une petite unité de dé-bromage permettra d'obtenir des données sur la faisabilité technique et économique. Cependant, dans ce type d'unité de traitement, les principales difficultés techniques seraient la captation du brome sous forme vapeur, par un système de filtration à charbon actif, puis sa condensation. Des débouchés industriels devront être trouvés (désinfectant, produits d'entretien, etc.), avec un potentiel de valorisation viable économiquement, afin de couvrir les frais inhérents aux opérations de pyrolyse des matrices polymères et de captage du brome [27].

De par la structure de la société ARTEMISE et les contraintes techniques et réglementaires, imposées par l'éco-organisme et les autorités françaises, l'entreprise ne pourra malheureusement pas suivre cette solution de valorisation par la sublimation du TBBPA. Ainsi, elle privilégie aujourd'hui l'incinération spéciale des matrices plastiques bromées, en tant que déchets dangereux à hauteur de plusieurs centaines d'euros la tonne, au détriment du taux de valorisation énergétique. Néanmoins, grâce à la solution de séparation par flottaison, ARTEMISE pourra réduire assurément cette fraction, estimée à 45%. En conséquence, elle améliorera le potentiel global de valorisation matière des dispositifs à LED.

4.2.7. Les taux de valorisation matière et énergétique

La combinaison des capacités des briques technologiques identifiées, des puissances pulsées (à fragmenter les produits sélectivement), de la séparation par flottaison des matériaux plastiques (des systèmes optiques, des corps et des culots) et de la sublimation du TBBPA (incorporé dans les matrices polymères en PBT des systèmes d'éclairage à technologie LED), permet d'optimiser incontestablement les taux de recyclage, pour tendre davantage vers le taux de valorisation matière réglementaire de 80%, imposé par les pouvoirs publics.

En se basant sur les bilans massiques, des technologies datant de 2013 et de 2020, effectués sur les lampes, les spots, les tubes et les dalles à LED dans le chapitre 2, nous allons évaluer l'optimisation des taux de recyclage et de valorisation énergétique.

Le tri par flottaison améliore ces taux pour les dispositifs à LED. Sans la séparation des systèmes optiques, les taux de valorisation matière et énergétique sont identiques. Ils sont estimés à 64% en 2013 et à 73% en 2020, pour les lampes et les spots à LED. En intégrant cette étape de tri, après la fragmentation sélective, pour séparer les systèmes optiques non bromés (9,8% en 2013 et 9,6% en 2020), les taux de recyclage sont réévalués respectivement à 74% et 83% (Tableau 4-5). En intégrant les étapes de broyage ou de déchiquetage, pour séparer les fractions restantes potentiellement non bromées, puis de dé-bromage des corps, culots et mousses diélectriques, les taux de valorisation énergétiques sont appréciés à 97% en 2013 et 99% en 2020 (Tableau 4-6). Ce constat est dû à l'estimation du taux moyen de 4,71% de brome, incorporé dans les matrices plastiques (PBT et silicone), réalisée dans l'étude que nous avons effectuée avec l'ENSAM Chambéry [27]. En soustrayant ce pourcentage massique aux matrices polymériques, nous en déduisons les fractions de ces dernières dépourvues de brome. Ces déchets ne seraient donc plus considérés comme dangereux et augmenteraient de ce fait la valorisation énergétique.

Fraction lampes-spots	Technologie 2013		Technologie 2020	
	Masse (g)	%	Masse (g)	%
Acier	4,5	3,3	2,4	4,1
LEDs + support	7,5	5,6	5,6	9,8
Aluminium	58,6	43,4	11,9	20,8
Drivers	12,8	9,5	7,8	13,6
Plastique PC	13,2	9,8	5,5	9,6
Plastique PBT	17,3	12,8	7,0	12,2
Silicone	14,8	11	2,6	4,5
Verre	3,4	2,5	14,5	25,2
Masse totale fraction	132,0	97,7	57,3	99,7
Masse initiale (sans perte)	135,1	100	57,4	100
Valorisation matière	-	74	-	83

Tableau 4-5 : Fraction des technologies 2013 et 2020 des lampes et spots à LED, avec incorporation du brome

Fraction lampes-spots	Technologie 2013		Technologie 2020	
	Masse (g)	%	Masse (g)	%
Acier	4,5	3,3	2,4	4,1
LEDs + support	7,5	5,6	5,6	9,8
Aluminium	58,6	43,4	11,9	20,8
Drivers	12,8	9,5	7,8	13,6
Plastique PC	13,2	9,8	5,5	9,6
Plastique PBT	16,5	12,2	6,7	11,7
Silicone	14,1	10,4	2,5	4,3
Verre	3,4	2,5	14,5	25,2
Masse totale fraction	130,6	96,7	56,9	99,1
Masse initiale (sans perte)	135,1	100	57,4	100
Valorisation énergétique	-	97	-	99

Tableau 4-6 : Fraction des technologies 2013 et 2020 des lampes et spots à LED, avec élimination du brome

Concernant les tubes et les dalles à LED, les taux de recyclage et de valorisation énergétique, sans la séparation des systèmes optiques, sont également identiques. Ils sont estimés respectivement à 70% pour la technologie 2013 et à 52% pour la technologie 2020. Après une étape de séparation mécanique et automatisée (par l'outil industriel ECM, cf. chapitre 3, partie 3.8) et en triant la fraction de PC, évaluée à 24,1% en 2013 pour les tubes et à 44,6% en 2020 pour les dalles, les taux de recyclage sont majorés. Ils atteignent respectivement 94% et 97% (Tableau 4-7). Grâce aux traitements de broyage (des culots, des matrices de plastique noir des tubes à LED et des boîtiers de drivers, du plastique noir, du PS, du silicone des dalles à LED), puis de sublimation du brome incorporé dans leurs matrices polymères, les taux de valorisation énergétique, identiques pour les deux typologies, sont maximisés à 99% (Tableau 4-8). Notons que ces valeurs sont obtenues en laboratoire et des essais pré-industriels devront être réalisés pour corroborer ces données.

Fraction tubes-dalles	Technologie 2013		Technologie 2020	
	Masse (g)	%	Masse (g)	%
Acier	5,8	1,9	28,8	1,4
Bandeaux LEDs	48,5	15,7	16,9	0,8
Aluminium	93,9	30,5	940,9	45,9
Drivers	25,9	8,4	42,8	2,1
Plastique PC	74,4	24,1	913,6	44,6
Plastique noir	0,9	0,29	0,57	0,03
Plastique PBT	14,7	4,8	24,6	1,2
Plastique PS	0	0	20,4	1,0
Silicone	0	0	32,6	1,6
Verre	36,7	11,9	0	0
Câbles	5,0	1,6	28,8	1,4
Masse totale fraction	305,7	99,1	2049,9	99,9
Masse initiale (sans perte)	308,4	100	2050,8	100
Valorisation matière	-	94	-	97

Tableau 4-7 : Fraction des technologies 2013 et 2020 des tubes et dalles à LED, avec incorporation du brome

Fraction tubes-dalles	Technologie 2013		Technologie 2020	
	Masse (g)	%	Masse (g)	%
Acier	5,8	1,9	28,8	1,4
Bandeaux LEDs	48,5	15,7	16,9	0,8
Aluminium	93,9	30,5	940,9	45,9
Drivers	25,9	8,4	42,8	2,1
Plastique PC	74,4	24,1	913,6	44,6
Plastique noir	0,8	0,28	0,54	0,03
Plastique PBT	13,9	4,5	23,4	1,1
Plastique PS	0	0	19,5	0,9
Silicone	0	0	31,1	1,5
Verre	36,7	11,9	0	0
Câbles	5,0	1,6	28,8	1,4
Masse totale fraction	304,9	98,9	2046,4	99,7
Masse initiale (sans perte)	308,4	100	2050,8	100
Valorisation énergétique	-	99	-	99

Tableau 4-8 : Fraction des technologies 2013 et 2020 des tubes et dalles à LED, avec élimination du brome

Ces résultats, obtenus par des dispositifs expérimentaux en minimisant les pertes de matières et sur des échantillonnages à taille réduite, sont très encourageants pour des futurs essais à une échelle pré-industrielle, afin de confirmer nos conclusions. Puis à une dimension industrielle, en fonction des décisions que prendra ARTEMISE, pour l'orientation de son futur outil de traitement. In fine, la solution de tri densimétrique par flottaison est simple à mettre en œuvre. Elle permettra de majorer les taux de recyclage de ces dispositifs à LED, pour dépasser le taux réglementaire, sauf pour les lampes et les spots de technologie 2013, pour lesquels nous avons évalué un taux de valorisation matière de 74%. Nous pensons cependant que ce taux de recyclage ne pourrait que prospérer vers une perspective positive, comprise entre 74% et 83%, sur les futurs déchets 2024 et 2025, issus des technologies 2019 et 2020. ARTEMISE devra donc évaluer l'évolution des taux de recyclage des différentes typologies de dispositifs à LED, par des futures analyses, à partir de 2022, qui permettront de vérifier ce constat.

Dans la section suivante, nous proposons de démontrer le potentiel de valorisation d'une typologie de dispositifs à LED en plastique : la lampe E27 à bulbe standard, de diamètre 40 mm. Elle représente 38% du gisement actuellement et 48% en intégrant la typologie de bulbe de diamètre supérieur à 40 mm. La structuration mécanique d'assemblage étant identique aux dispositifs B22 et E14, ce potentiel de valorisation pourrait s'appliquer donc à 55% du gisement (cf. chapitre 2).

4.3. Potentiel de valorisation des lampes E27 en plastique

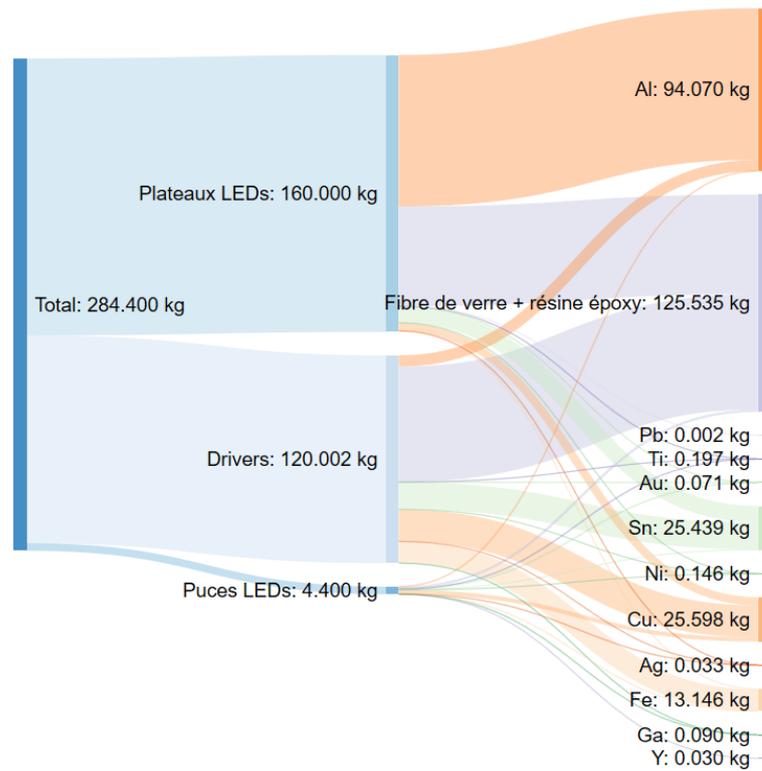
Nous souhaitons dans cette partie mettre en exergue la pertinence de la valorisation des composants électroniques, plateaux de puces à LED et cartes électroniques, par rapport à la totalité des dispositifs. Ainsi ARTEMISE focalisera ses investissements et son expertise sur les fractions à haut potentiel de valorisation économique.

4.3.1. Potentiel des composants électroniques des lampes E27 en plastique

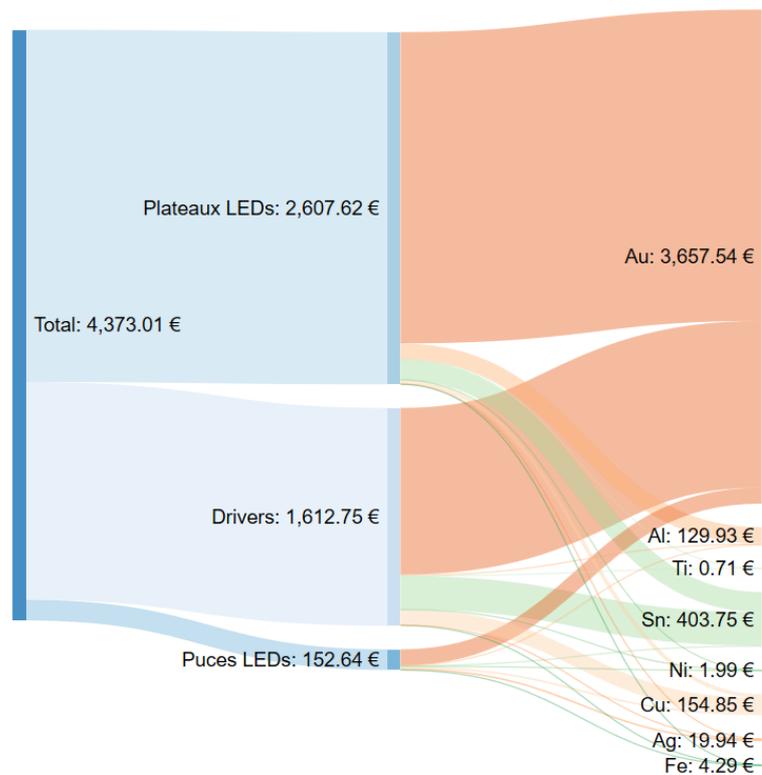
Une étude intéressante consiste à simuler les fractions récupérées dans une tonne de lampes à LED de type E27 en plastique, grâce à la solution de fragmentation sélective, identifiée puis expérimentée dans cette thèse. La première étape du processus de recyclage des lampes est la séparation des systèmes optiques, des corps et des culots représentant environ 720 kg. La seconde étape est la génération des flux de drivers, de plateaux et de puces à LED (environ 280 kg) représentés sur le diagramme de Sankey (cf. Figure 4-19-a). Nous estimons sur ce diagramme les fractions massiques des minerais de métaux précieux présents, en admettant que nos échantillons soient comparables à ceux de Marcelo Pilotto Cenci [30] (cf. chapitre 3). Le démantèlement d'une tonne de lampes à LED générerait 160,0 kg de plateaux LEDs, 120,0 kg de drivers et de 4,4 kg de puces LEDs. En appliquant les coefficients des métaux précieux, obtenus dans l'étude brésilienne, sur ce total de 284,4 kg de composants, seuls 158,8 kg de métaux précieux seraient récupérés. Dans ces dispositifs de lampes à LED E27, les fractions massiques des métaux précieux récupérés seraient 102,4 kg dans les plateaux LEDs, 53,4 kg dans les drivers et 3,0 kg dans les puces LEDs (cf. Tableau 4-9). Ainsi, le taux de recyclage global en métaux précieux des composants des lampes à LED E27 dans notre étude est évalué à 55,9%, soit 64,0% pour les modules LEDs, 44,5% pour les drivers et 68,4% pour les puces LEDs.

D'autres études ont rapporté des taux de recyclage de 28% pour les téléphones portables [31], 30% pour les PCBs [32] et 30% pour les écrans LCD [33]. En terme de valeur économique, les composants et les matériaux qui ont la plus grande fraction massique ne sont pas les plus rentables économiquement pour le recyclage. En confrontant les diagrammes de Sankey des fractions massiques (cf. Figure 4-19-a) avec les valeurs économiques des matières premières secondaires

(cf. Figure 4-19-b), il est possible d'analyser les principaux composants et matériaux en relation avec leur potentiel de valorisation économique.



(a)



(b)

Figure 4-19 : Diagrammes de Sankey en masse (a) et en euros (b) des métaux précieux récupérés dans une tonne de lampes E27 plastiques (plateaux LEDs, drivers et puces LEDs)

Elément	Puces LEDs		Plateaux LEDs		Drivers		Masse totale (kg)
	*% massique	Masse (kg)	*% massique	Masse (kg)	*% massique	Masse (kg)	
Argent (Ag)	0,482	0,021	0,004	0,006	0,005	0,006	0,034
Aluminium (Al)	0,252	0,011	54,728	87,565	5,412	6,494	94,070
Cuivre (Cu)	54,647	2,404	2,963	4,698	15,413	18,496	25,598
Fer (Fe)	0,741	0,033	0,380	0,608	10,421	12,505	13,146
Gallium (Ga)	0,381	0,017	-	-	0,061	0,073	0,090
Nickel (Ni)	0,183	0,008	0,038	0,061	0,064	0,077	0,146
Plomb (Pb)	-	-	0,001	0,002	-	-	0,002
Or (Au)	0,052	0,002	0,028	0,045	0,020	0,024	0,071
Etain (Sn)	10,957	0,482	5,827	9,323	13,028	15,634	25,439
Titane (Ti)	0,019	0,001	0,079	0,126	0,058	0,070	0,197
Cérium (Ce)	0,009	0,0	-	-	-	-	0,0
Yttrium (Y)	0,683	0,030	-	-	-	-	0,03
Fibre de verre + résine époxy	31,590	1,390	35,951	57,522	55,519	66,623	125,534
Total	-	4,4	-	160	-	120	284,4
Total métaux précieux	-	3,010	-	102,434	-	53,378	158,822

Tableau 4-9 : Bilan matières des puces LEDs, plateaux LEDs et des cartes électroniques dans une tonne de lampes E27 en plastique (*Pilotto Cenci et al., 2020) [30]

Le nombre de chiffres significatifs a été choisi pour représenter l'ensemble des éléments constitutifs, y compris ceux présents en très faible quantité

D'après la Figure 4-19, la valeur économique des composants électroniques contenus dans une tonne de lampes à LED E27 en plastique serait à hauteur de 4373 € la tonne. L'or s'avère être le matériau le plus précieux [34] et les puces LEDs seraient les composants les plus intéressants de ces équipements. Bien que l'or ait une faible fraction massique, ce matériau est le plus important économiquement. En effet, la masse d'or représente **0,03%** de la totalité des composants électroniques et sa valeur commerciale est à hauteur de **83,6%** de cet ensemble. Alors que la masse d'aluminium représente **33,1%** et sa valeur commerciale est seulement de **3,0%**. Compte tenu des prix des matériaux secondaires qui sont de 51 451 € le kg pour l'or et 1,38 € le kg pour l'aluminium (source Magazine RECYCLAGE RECUPERATION N°38 du 16 novembre 2020 [35]), le potentiel de valorisation de la faible fraction d'or des lampes à LED est pertinent pour la rentabilité économique totale de ces équipements.

Ces résultats, de la stratégie économique de récupération de l'or issu des dispositifs de lampes LEDs, ont également été relevés dans les études de Kumar et al., 2019 [36] et de Pilotto Cenci et al., 2020 [30]. En outre, l'étain et le cuivre ont des parts massiques importantes dans les composants des lampes à LED E27 et sont des matériaux très intéressants, en terme de valorisation économique. Les fractions massiques de l'étain et du cuivre sont respectivement de 25,4 kg et de 25,6 kg (soit 8,9% et 9,0% de la fraction massique totale) correspondant pour l'étain à 403,80 € et pour le cuivre à 154,90 € (soit 9,2% et 3,5% de la valeur économique totale).

Par ailleurs, il est pertinent de définir les composants électroniques les plus rentables économiquement en déterminant la valeur économique normalisée en euro par kilogramme, pour les drivers, les modules et les puces LEDs. Bien que les puces représentent les composants électroniques avec la plus petite fraction en masse, ces produits sont les composants les plus avantageux par unité de masse (34,7 €/kg), par rapport aux modules LEDs (16,3 €/kg) et aux drivers (13,4 €/kg). Cette analyse a également été mise en exergue par Pilotto Cenci et al., 2020 [30]. Le Tableau 4-10 présente les valeurs de ces composants en novembre 2019 [30] et 2020 [35]. Elle montre l'importance et la viabilité d'un procédé industriel efficace pour séparer et préserver l'état des composants, afin d'assurer mais aussi d'améliorer la récupération des matériaux précieux et stratégiques à haute valeur ajoutée.

Par conséquent, la société ARTEMISE devra orienter sa stratégie sur les fractions massiques de matières premières secondaires, en fonction de leur valeur économique inhérente. Rappelons que

le chapitre 2 nous a permis de conclure que les puces à LED doivent être stockées dans un premier temps, afin de permettre à ARTEMISE de spéculer, en fonction des cours des matières premières secondaires et de les vendre au meilleur prix, au moment le plus propice.

Composants électriques	Valeur (\$/kg) [30]	Valeur (€/kg) [35]
Puces LEDs	19,7	34,7
Modules LEDs	9,2	16,3
Drivers	7,5	13,4

Tableau 4-10 : Valeur économique des composants électroniques issus des lampes LEDs E27 en plastique, en novembre 2019 [30] et novembre 2020 [35]

La richesse des puces à LED mérite de s'intéresser à ces composants et ainsi créer une filière de traitement dédiée, inexistante de nos jours. Des recherches universitaires sont entreprises actuellement. Dans le cadre de la Chaire Mines Urbaines [37], l'école d'ingénieurs Chimie ParisTech travaille sur ce sujet, depuis 2014. L'objectif est de valoriser les matériaux constitutifs des puces à LED sur leurs plateaux en aluminium, afin d'extraire les terres rares et les métaux stratégiques (or, argent, titane, étain, cuivre, aluminium, etc.), par le procédé d'hydrométallurgie. La Figure 4-20 schématise la vue en coupe d'une puce à LED sur le support en aluminium. Les connectiques constituées en or et en titane, ainsi que l'empilement des couches de matériaux semi-conducteurs méritent de s'intéresser à la valorisation des puces. Une future industrialisation serait envisageable, entre 2025 et 2030. La très faible fraction massique (0,44%) des puces à LED, confirmée dans notre étude au SELFRAG Lab, engendrera indéniablement des efforts considérables de tri et de massification de ces composants. Ils créeront une stratégie industrielle de valorisation et donc un marché viable économiquement, pour les professionnels du recyclage.

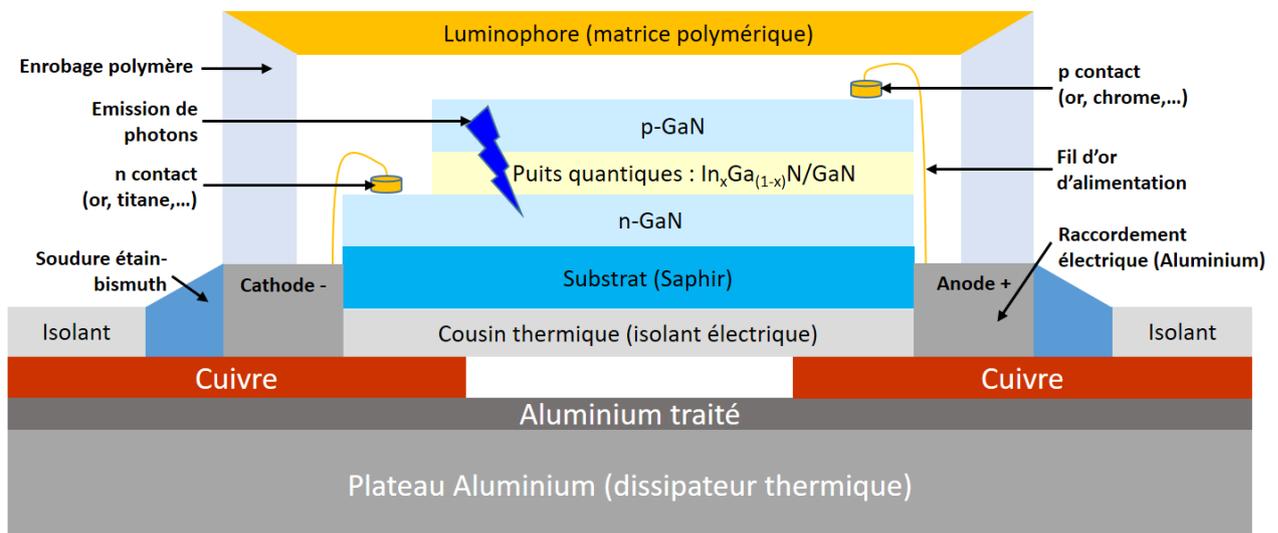


Figure 4-20 : Schéma de principe (vue en coupe) d'un plateau de puces à LED, en aluminium, d'une lampe E27 en plastique

Notons par ailleurs leur potentiel de réutilisation, pour la fabrication de nouveaux systèmes d'éclairage à LED, car de nombreuses puces à LED récupérées, appariées ou non aux plateaux LEDs, dans les déchets, par la fragmentation sélective EDF ou EHF, sont potentiellement encore fonctionnelles. La Figure 4-21 illustre des exemples de fonctionnement des puces à LED, récupérées par la technologie des puissances pulsées, appariées (Figure 4-21-a) et détachées de leur support (Figure 4-21-b). Nous avons mis en exergue cette alternative, scénario III du projet RECYLED, qui constitue une originalité, par rapport aux autres projets de recherche et développement qui s'intéressent exclusivement à la valorisation des matériaux constitutifs. In fine, dans nos études paramétriques, la fragmentation sélective des lampes E27 en plastique favorise

le scénario de réemploi, en préservant l'intégrité de certains composants électroniques, à hauteur de 80% pour les plateaux à LED et de 65% pour les drivers (cf. chapitre 3).

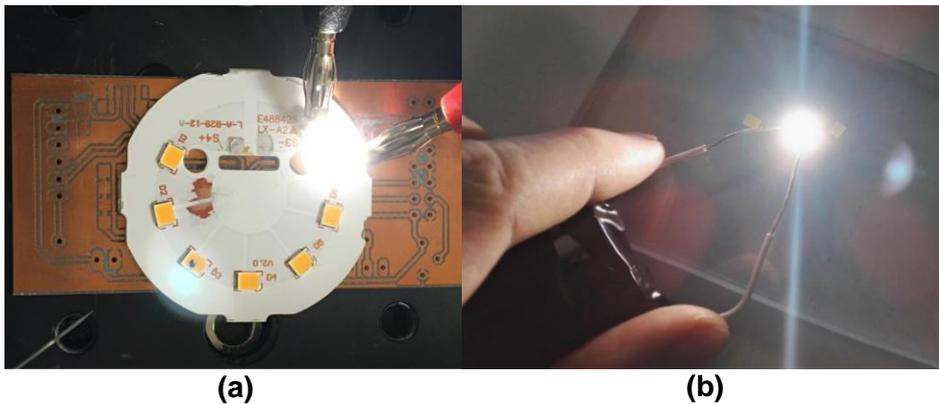


Figure 4-21 : Photographies de composants issus du procédé de désassemblage par la technologie des puissances pulsées (réacteur EDF SELFRAG Lab)
Puce à LED fonctionnelle : appariée (a) et détachée du plateau (b)

La concentration des métaux précieux dans les DEEE est plus élevée que dans les minerais naturels. Elle représente une valeur potentielle de 55 milliards d'euros [38]. Ceci à condition que ces matériaux soient correctement recyclés par un procédé industriel approprié [39]. En plus de la valeur intrinsèque des sources secondaires de matières, nous réduirons l'épuisement des ressources en matières premières primaires et apaiserons les contraintes géopolitiques mondiales, induites [30].

Ces analyses sont des outils de compréhension et d'aide à la prise de décision. Elles permettent aux acteurs du recyclage de prioriser leur stratégie industrielle et de se focaliser, par voie de conséquence, sur les matières premières secondaires les plus rentables, en fonction des facteurs technologiques, environnementaux et économiques. Pour compléter cette étude, nous détaillons dans la partie suivante le potentiel global de cette typologie de produits à LED.

4.3.2. Potentiel global des lampes E27 en plastique

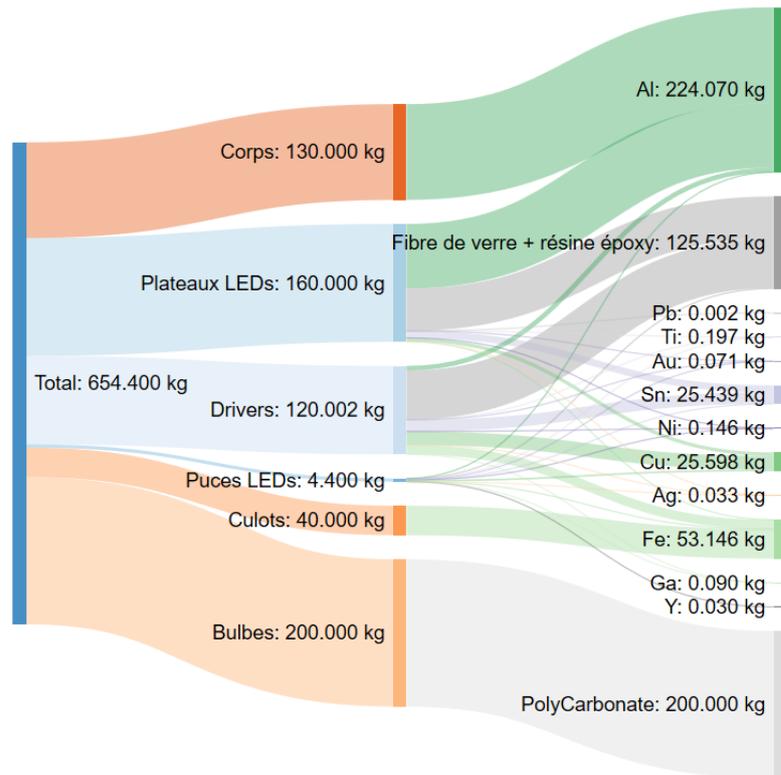
Dans cette section est présentée la valorisation globale de la typologie des lampes E27 en plastique, pour analyser la pertinence des composants électroniques comparée à la totalité des sous-produits. A partir d'une tonne de cette catégorie de lampes à LED, il est récupéré :

- 345,6 kg de plastiques PBT constituant les corps, incorporés par le TBBPA, qui seront incinérés en tant que POPs, sans possibilité de valorisation énergétique [1] [2] [7],
- 654,4 kg de fractions valorisables (matériaux et composants électroniques).

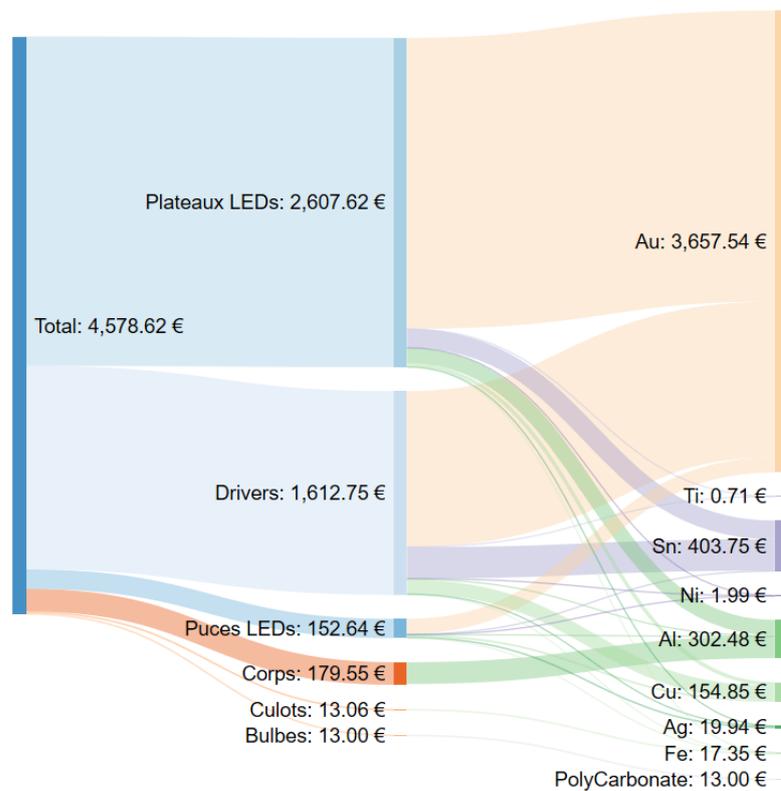
En appliquant les coefficients de métaux précieux de Marcelo Pilotto Cenci [30], la fraction valorisable est décomposée comme suit : les bulbes 200 kg (13,0 €), les plateaux LEDs 160 kg (2607,6 €), les corps 130 kg (179,6 €), les drivers 120 kg (1612,8 €), les culots 40 kg (13,1 €) et les puces LEDs 4,4 kg (152,6 €). Les diagrammes de Sankey de la Figure 4-22 (a et b) illustrent cette distribution. La valeur économique globale d'une tonne de ce type de dispositifs à LED serait évaluée à 4579 €, contre 4373 € pour les composants électroniques seuls. La rentabilité est améliorée de 4,7%, pour une augmentation massive de 130% (284,4 kg de composants électroniques et 370 kg de matériaux constitutifs).

En normalisant la valorisation économique en euro par kilogramme [30] [35], il est établi l'ordre croissant de rentabilité suivant : les puces LEDs 34,7 €/kg, les plateaux LEDs 16,3 €/kg, les drivers

13,4 €/kg, les corps 1,4 €/kg, les culots 0,3 €/kg et les bulbes 0,065 €/kg. La valorisation globale des composants électroniques est évaluée à 15,4 €/kg et celle des matériaux constitutifs à 0,6 €/kg (cf. Tableau 4-11).



(a)



(b)

Figure 4-22 : Diagrammes de Sankey en masse (a) et en euros (b) des métaux précieux récupérés dans une tonne de lampes E27 plastiques (sans le PBT)

Fraction	Composants électroniques			Matériaux constitutifs		
	Puces LEDs	Plateaux LEDs	Drivers	Corps	Culots	Bulbes
Masse (kg)	4,4	160	120	130	40	200
Valorisation (€)	152,6	2607,6	1612,8	179,6	13,1	13,0
Rentabilité (€/kg)	34,7	16,3	13,4	1,4	0,3	0,065
Masse fraction (kg)	284,4			370		
Valorisation fraction (€)	4373			206		
Rentabilité fraction (€/kg)	15,4			0,6		

Tableau 4-11 : Valorisation économique des composants électroniques et des matériaux constitutifs dans une tonne de dispositifs lampes à LED E27 en plastique, en novembre 2020

Le nombre de chiffres significatifs a été choisi pour estimer l'ensemble des éléments constitutifs

Il est essentiel de souligner également l'importante fraction massique du matériau aluminium, contenu dans une tonne de lampes à LED E27 en plastique. En considérant les corps et les composants électroniques, il est comptabilisé 224,1 kg, soit 34,2% en masse d'aluminium (94,1 kg contenus dans les composants et 130 kg dans les corps). La valeur économique correspondant à cette quantité est évaluée à 302,50 € (soit 6,6% de la valorisation globale), 129,90 € alloués aux composantes électroniques (3% de leur valorisation) et 172,60 € aux corps. Donc 57% du potentiel de valorisation de ce matériau est généré par les corps des dispositifs. Par conséquent, l'aluminium est très avantageux pour le potentiel global de valorisation.

Malgré de faibles quantités et des prix de revente peu élevés, entre 50 à 150 € la tonne, selon les professionnels, telle que l'entreprise CORNEC [40] (cf. chapitre 2), l'acier améliore aussi la rentabilité globale. La quantité d'acier dans une tonne de lampes E27 est évaluée à 53,2 kg, soit 8,1% en masse (13,2 kg dans les composants électroniques et 40 kg dans les culots). La valeur correspondante à cette fraction est appréciée à 17,40 € (soit 0,4% de la valorisation globale), 4,30 € pour les composants électroniques (0,1% de leur valorisation) et 13,10 € pour les culots. Donc 75,3% du potentiel de valorisation de l'acier est obtenu par les culots des produits E27 en plastique. Il est de ce fait important de considérer aussi ce matériau dans la rentabilité globale.

Cette analyse permet d'orienter la stratégie de l'entreprise ARTEMISE vers les composantes à haute valeur ajoutée (composants électroniques, métaux précieux et matériaux constitutifs), afin qu'elle puisse anticiper et développer son outil de traitement industriel pour qu'il soit rentable et viable économiquement. Ainsi, elle pourra se positionner sur le futur marché de valorisation des composants électroniques de ces systèmes d'éclairage à LED, en particulier les puces à LED. Ces sous-ensembles sont sujets à convoitises et font l'objet de nombreuses recherches, pour l'extraction des métaux précieux les constituant [30] [37] [41] [42].

Cette conception du développement durable repose sur une notion de Responsabilité Sociétale des Entreprise (RSE) dans le respect des objectifs selon trois domaines : social, environnemental et économique. L'émergence de la RSE matérialise le renouvellement de l'entreprise vers la performance, dont les frontières deviennent de plus en plus perméables et évolutives. L'existence de stratégies coopératives, d'alliances et d'externalisation sont interdépendantes avec l'ensemble des parties prenantes [43] [44].

Pour un développement stratégique, il est primordial d'identifier la technologie la plus appropriée. Dans notre étude, l'objectif est de préserver l'intégrité physique et/ou fonctionnelle des composants électroniques, en séparant sélectivement les sous-produits de ces équipements sans les détériorer. La technologie de fragmentation par les puissances pulsées, identifiée et expérimentée dans le chapitre 3, semble concluante pour cette problématique industrielle. Nous allons désormais proposer une ligne de traitement à une échelle industrielle.

4.3.3. Proposition d'une ligne de traitement à l'échelle industrielle

Améliorer sa productivité ne suffit plus, aussi bien en termes de quantité que de qualité. Les industriels tendent, aujourd'hui, de plus en plus vers la nécessité de proposer une offre personnalisée, répondant à des demandes spécifiques de la part d'une clientèle aux exigences croissantes. Pour satisfaire ces obligations de qualité, de quantité et de personnalisation industrielles, l'intégration de nouvelles technologies sur les lignes de production est désormais indispensable. La maîtrise et l'exploitation de l'information sont cruciales car elles contribuent à la performance [45]. L'entreprise recueille continuellement des données sur les futurs marchés potentiels, pour orienter, améliorer et mettre à jour son système de production.

Il est estimé que, chaque année, la population mondiale utilise 1,5 fois les ressources renouvelables de la Terre. Cette tendance ne peut aller qu'en s'accroissant dans un monde de plus en plus industrialisé, avec une classe moyenne qui se développe. Il y a trois mille ans, durant l'âge du bronze, l'homme a appris à maîtriser la métallurgie d'un alliage de cuivre et d'étain. Au rythme des avancées et des ruptures technologiques actuelles, dans vingt-cinq ans, l'étain sera l'objet de problèmes d'approvisionnement et le cuivre suivra une dizaine d'années plus tard. Si bien qu'ils ne resteraient que les stocks extraits auparavant disponibles dans les produits et les équipements de notre consommation courante [37] [46].

C'est dans ce contexte que l'économie circulaire suscite un intérêt croissant de la part des citoyens, des entrepreneurs, des gouvernements, ainsi que du monde académique. Cette économie de demain ne propose pas seulement l'intensification du recyclage, mais aussi une gestion intelligente et donc durable des ressources naturelles, pour éviter l'épuisement de ces dernières, avec la fin des déchets. Le gouvernement voit également l'intérêt de cette économie. Cela se traduit par des lois, auxquelles sont ajoutés des objectifs, des feuilles de route et des actions territoriales. Ainsi, notre mode de consommation est transposé vers un modèle de création de valeur positive et de richesse sur différents plans : technique, environnemental, économique et sociétal [46] [47].

En l'occurrence, l'entreprise ARTEMISE favorise l'économie circulaire par son activité. Elle augure la valorisation des équipements d'éclairage à LED, en fin de cycle de vie, avec l'objectif d'atteindre un taux de recyclage minimal de 80%, grâce à la séparation sélective et à la préservation physique des différents sous-ensembles. Pour permettre in fine la réutilisation de certaines parties, notamment les composants électroniques et le recyclage des autres parties, tels que les matériaux constitutifs, en les vendant à des entreprises spécialisées (recycleurs, fabricants de luminaires, etc.).

Cette filière de traitement spécifique, pour cette nouvelle catégorie de DEEE, est inexistante, à ce jour. Néanmoins, vu le potentiel de valorisation par la présence des métaux précieux [30] [37] [41] [42] et par la technologie identifiée, rappelons plus de 4000 € pour une tonne de lampes type E27 en plastique, il devient désormais envisageable et judicieux de proposer un outil de production, à une échelle industrielle. En 2030, le gisement annuel maximal de lampes à LED pour ARTEMISE est évalué à environ 2600 tonnes (cf. chapitre 2), soit un débit horaire de 650 kg (en 2 x 8). Des outils de traitement en flux continu sont proposés par les industriels pouvant atteindre des débits élevés, jusqu'à 10 t/h, tels que le proposent les sociétés SELFRAG [48] [49] et IMPULSTEC.

Pour valoriser les déchets des dispositifs d'éclairage à LED, il est proposé un exemple de ligne de traitement, fonctionnant en circuit fermé et reposant sur la technologie de fragmentation sélective par les puissances pulsées. L'outil industriel est composé de différents éléments :

- Convoyeur n°1 : entrée des lampes et spots à LED ;
- Basculeur ;
- Réacteur de puissances pulsées ;

- Dispositif de séchage à tambour rotatif ;
- Système de tri optique de spectroscopie infrarouge FTIR et de fluorescence X ;
- Convoyeur n°2 : plateaux à LED et drivers ;
- Convoyeur n°3 : bulbes ;
- Convoyeur n°4 : corps et culots ;
- Broyeur n°1 : bulbes ;
- Broyeur n°2 : corps et culots ;
- Système de tri Overband (acier) et à courants de Foucault (aluminium) ;
- Système de tri par flottaison.

La Figure 4-23 représente le schéma de principe de l'outil, à une échelle industrielle et en flux continu, proposé à l'entreprise ARTEMISE. Cette configuration n'est pas définitive et sera susceptible d'évoluer en fonction des contraintes des différents partenaires identifiés (SELFRAG ou IMPULSTEC, TOMRA, PELLENC ST, ABSCISSE INGENIERIE, etc.) à associer leur technologie entre elles.

Le principe de cette ligne industrielle, qui combine des technologies existantes, repose sur les étapes suivantes :

1. Les dispositifs à LED sont déversés, par les opérateurs, sur le convoyeur n°1. Ce déversement est régulé pour obtenir un espacement suffisant entre les lampes et les spots à LED. Ce qui permet de repérer facilement et donc d'extraire les fractions indésirables (seringues, tickets de caisse, cartouches de fusil, etc.).
2. Le contenu du convoyeur, constitué désormais uniquement de dispositifs à LED, est transvasé dans le basculeur, qui alimente en continu le réacteur de puissances pulsées, pour fragmenter sélectivement et en boucle fermée les produits.
3. Les équipements ainsi désolidarisés sont séchés par un tambour rotatif, puis triés par un dispositif de spectroscopie FTIR et FX pour récupérer trois sous-ensembles : les composants électroniques, les systèmes optiques et les corps sertis ou non à leur culot.
4. Les composants électroniques ainsi récupérés (plateaux LEDs et drivers) sont envoyés vers le convoyeur n°2, pour être stockés puis pour être valorisés en les vendant à des entreprises spécialisées dans l'extraction des métaux précieux et stratégiques, telles que les entreprises Umicore [54] et Morphosis [55].
5. Les systèmes optiques constitués en PC, matrices polymériques non bromées, sont acheminés vers le convoyeur n°3 pour être broyés à une granulométrie de 10 mm (pour réduire leur volume lors du transport).
6. Les corps constitués en aluminium et en PBT (dont une fraction est bromée et l'autre non bromée), ainsi que les culots constitués en acier, sont également broyés :
 - a. Un dispositif Overband (aimant permanent dynamique ou électroaimant) attire et sépare l'acier des broyats, sous l'effet de l'attraction magnétique ;
 - b. Un séparateur à courants de Foucault, utilisant un puissant champ magnétique, récupère par éjection l'aluminium ;
 - c. Les fractions de PBT non bromées sont séparées de celles bromées à l'aide de la technique de tri par flottaison, dans une solution de chlorure de calcium (CaCl_2).

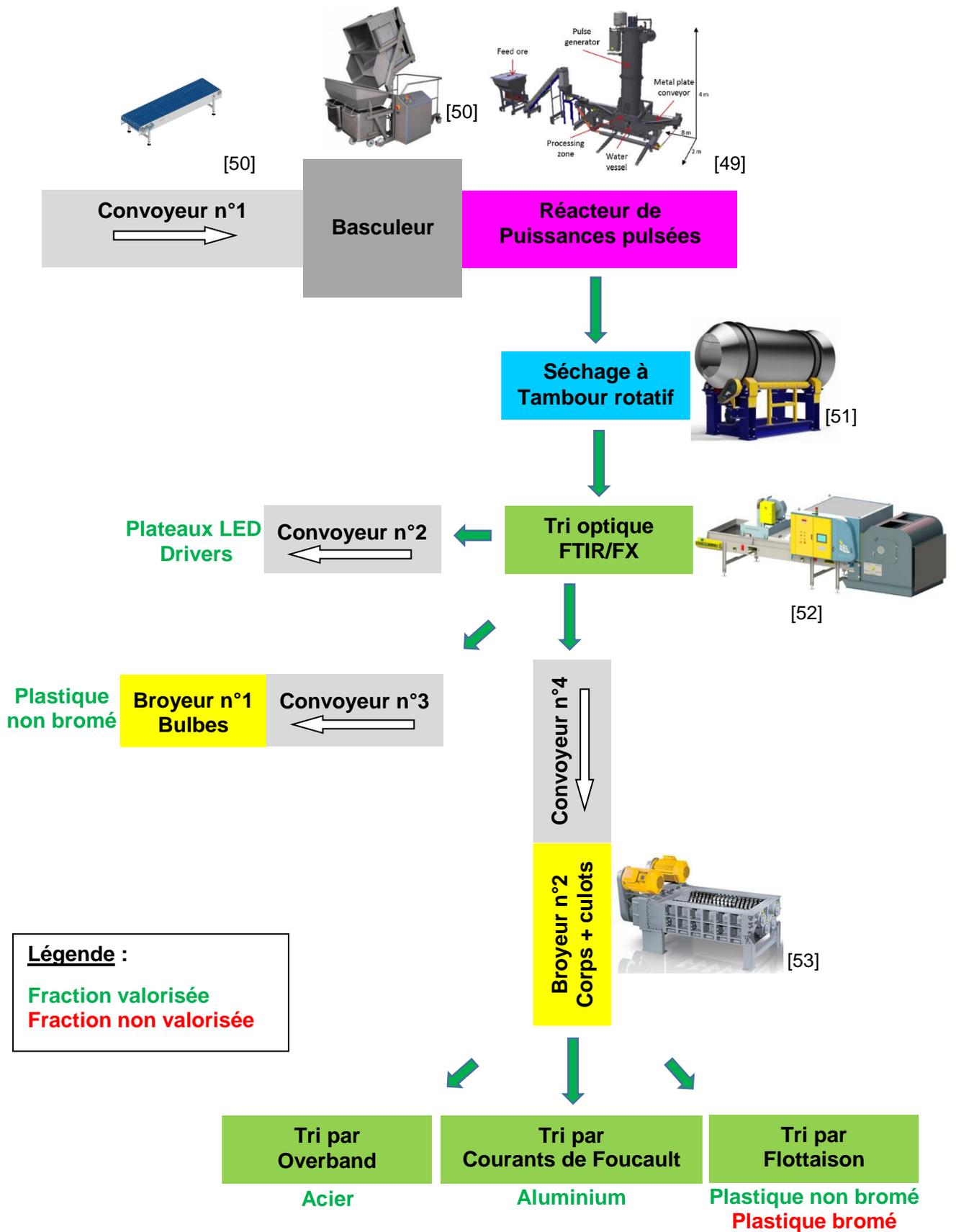


Figure 4-23 : Synoptique de l'outil de traitement par les puissances pulsées pour les lampes et spots à LED en fin de vie

Cette combinaison de différentes briques technologiques permet dès lors le traitement en fin de vie des lampes et des spots à LED, par la valorisation des plateaux LEDs, des drivers, des matrices plastiques (non bromées composant les systèmes optiques et les corps), des métaux ferreux et non ferreux. Cette valorisation est optimisée par la déstructuration sélective, des produits à LED. D'une part, elle minimise les pertes de matières (estimées à 0,26% avec l'outil SELFRAG Lab), d'autre part elle préserve l'intégrité de certains composants électroniques, contenant les métaux précieux [30] [37] [41] [42]. Concernant le traitement des tubes à LED, un exemple de synoptique reposant sur l'outil industriel ECM est aussi proposé et illustré dans l'annexe 7.

Intéressons-nous désormais à l'analyse du flux de matières pour les typologies à LED E27, B22 et E14, représentant 55% du gisement actuel. L'objectif est d'une part de démontrer la pertinence d'intégration de la technologie des puissances pulsées à une échelle industrielle, d'autre part de quantifier les fractions de matériaux et de métaux précieux récupérables. Cette approche comptable des flux permet une description globale du processus mis en œuvre. De ce fait, elle identifie des limites et des améliorations éventuelles, pour une application industrielle optimale dans une dynamique d'économie circulaire vertueuse.

4.4. Analyse du flux de matières (AFM)

A partir de la proposition de l'outil de valorisation, reposant sur la fragmentation sélective par la technologie des puissances pulsées, pour traiter la fin de vie des équipements à LED, nous souhaitons schématiser les flux de matières associés dans ce processus industriel. Cette analyse du flux de matières permet la visualisation globale des flux entrant des dispositifs à LED, des typologies en plastique représentant 55% du gisement (cf. chapitre 2), et de leurs flux sortant, constitués des composants électroniques et des matériaux constitutifs.

4.4.1. Contexte de l'étude

L'éclairage conventionnel a été supplanté par celui reposant sur la technologie des semi-conducteurs soulevant des inquiétudes, de la part des pouvoirs publics [7], pour mettre en place un système efficace de gestion de la fin de vie. Actuellement, les études des flux matières des équipements à LED sont réalisées pour des dispositifs de broyage traditionnel [41] ou des méthodes de séparation manuelle [30] [56]. Les résultats des caractérisations sont très souvent variés et non fidèles à la représentativité du gisement disponible [42]. En combinant les informations de récentes études, notamment celles sur les compositions en métaux stratégiques et précieux contenus dans les composants électroniques [30], nous analysons une distribution en flux de masses, à partir d'un échantillon d'une tonne des typologies LEDs E27, B22 et E14. Ces produits sont séparés sélectivement par la solution des puissances pulsées. Il est opportun de rappeler que l'avantage premier de cette technologie est qu'elle permet la préservation de l'intégrité physique des sous-produits, notamment celle des puces à LED et des drivers. Ce qui favorise leur réutilisation et/ou leur recyclage spécifique et donc une majoration de leur valeur commerciale, auprès des acteurs du recyclage. Cette approche correspond au scénario III³⁸ proposé dans le cadre du projet RECYLED.

Pour réaliser une étude exhaustive, nous intégrons également le scénario I³⁹ de réutilisation de ces dispositifs à LED. A partir d'un échantillon prélevé en septembre 2020 et constitué de 1152 unités,

³⁸ Scénario III : Le désassemblage des lampes et des tubes à LED, pour la réutilisation des composants électroniques, notamment des puces à LED.

³⁹ Scénario I : La réutilisation des lampes et des tubes à LED non endommagés.

nous estimons à 38% les lampes arrivant en fin de vie encore fonctionnelles. En conséquence, 62% peuvent être valorisées (cf. chapitre 1, partie 1.3.2). Pour finir, le broyage mécanique est également considéré, afin de valoriser les fractions des plastiques non bromées (en PC des systèmes optiques et en PBT des corps), d'aluminium et d'acier qui constituent respectivement les corps et les culots. Dès lors, le scénario II⁴⁰ est également pris en considération dans cette étude. La Figure 4-24 schématise le synoptique des flux de matières analysés.

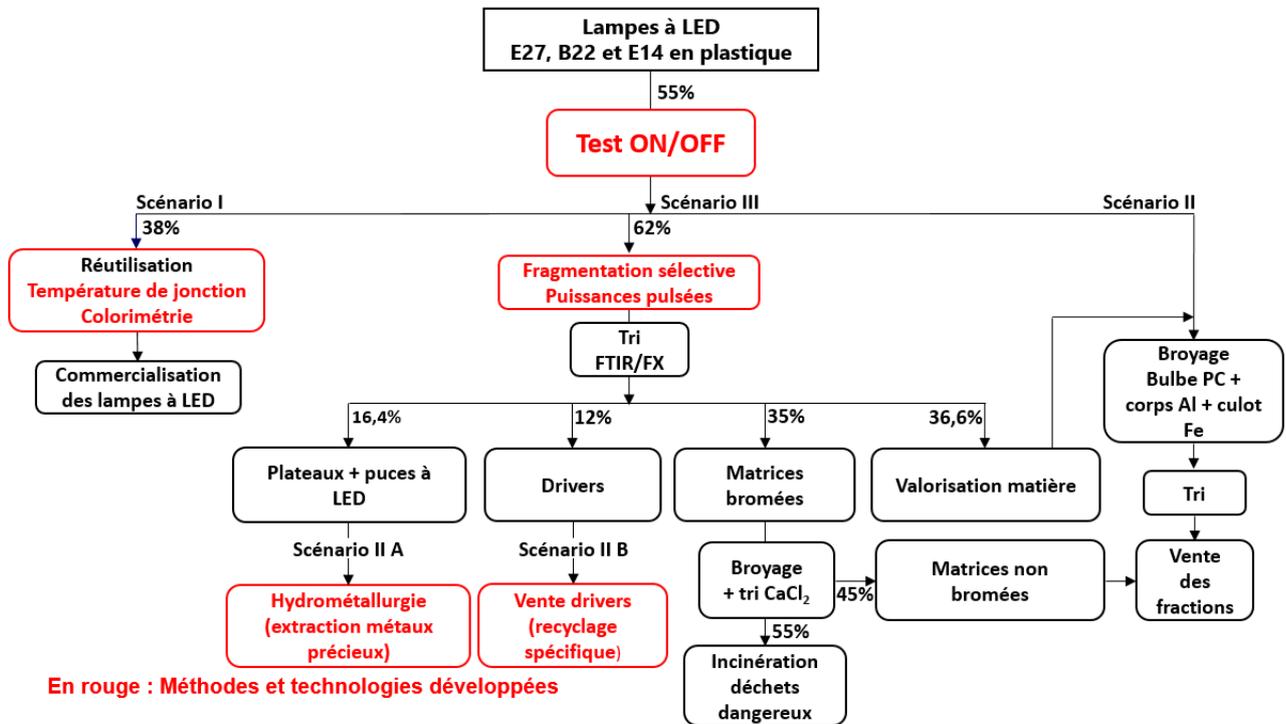


Figure 4-24 : Synoptique des flux de matières du traitement des lampes à LED E27, B22 et E14 en plastique

Par cette analyse, nous prenons en compte les trois scénarii déterminés pour la valorisation des systèmes d'éclairage à technologie LED. La réutilisation permet un allongement de leur longévité et donc une diminution de leurs impacts environnementaux. Les équipements sont réutilisés en globalité et sans aucun traitement préalable, ce qui constitue l'avantage de ce scénario. Il s'agit simplement de les remettre dans le circuit de consommation, par une seconde commercialisation. Ce scénario est par conséquent très favorable au niveau économique et environnemental. En combinant la technologie de déconstruction sélective, par les puissances pulsées, avec celle du broyage mécanique conventionnel, nous valorisons dans un premier temps les composants électroniques, puis dans un second temps les matériaux constitutifs revendus en broyats. A partir des composants ainsi récupérés, les industriels peuvent maximiser l'extraction en terres rares, en métaux précieux et stratégiques les constituant. Intéressons-nous dans la section suivante aux études menées jusqu'à présent.

4.4.2. Les avancées actuelles

Les professionnels du recyclage et l'éco-organisme traversent une phase critique concernant l'identification d'une ligne de traitement efficiente et durable pour les équipements à LED. Leur

⁴⁰ Scénario II : Le déchetage/broyage des lampes et des tubes à LED, en vue de la valorisation des matériaux constitutifs.

compréhension du flux de déchets reste encore limitée au niveau des composants et des matériaux des dispositifs. Leur approche de caractérisation suggère un questionnement entre un pré-broyage et/ou un broyage direct des produits [42].

L'étape de pré-broyage tend à éviter le broyage des composants électroniques, ce qui favoriserait une meilleure récupération des terres rares, des métaux précieux et stratégiques, contenus dans ces derniers [30] [41] [42] [57]. Cependant, à ce jour cette technologie n'est pas optimisée pour la récupération des composants. Alternativement, le broyage direct est basé sur les étapes de déchetage et de tri, qui doivent aussi être optimisées, pour améliorer les rendements [42]. Des fractions de métaux précieux et de terres rares se retrouvent sous forme d'impuretés puis de pertes, que les techniques de tri disponibles actuellement ne sont pas capables de récupérer [57].

En 2018, des essais de fragmentation sélective par les puissances pulsées ont été effectués sur un échantillon de huit lampes [58]. Elles ont été classées en trois catégories en fonction du type de matériaux constituant leur corps : le plastique, le verre et le métal. L'auteur a constaté que le processus de déstructuration fragmente avec succès les lampes dont les corps sont composés uniquement de matériaux plastiques. La fragmentation des lampes, conçues en verre et en métal, est grossière et les résultats ne sont donc pas satisfaisants.

En 2011, des expérimentations ont été réalisées sur neuf puces à LED DIP, de différentes couleurs et intensités [59] (cf. Figure 4-25). Le procédé utilisé dans cette étude est la lixiviation. Après avoir étudié les niveaux de toxicité en examinant leur teneur en métaux, l'auteur a découvert que les puces à LED de couleur blanche sont plus sûres, en raison de faibles teneurs en cuivre, plomb et arsenic. Alors que les autres puces présentent des niveaux élevés de toxicité, révélés par des taux importants d'arsenic, cuivre, nickel, plomb, fer et argent, qui pourraient avoir des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement [59].

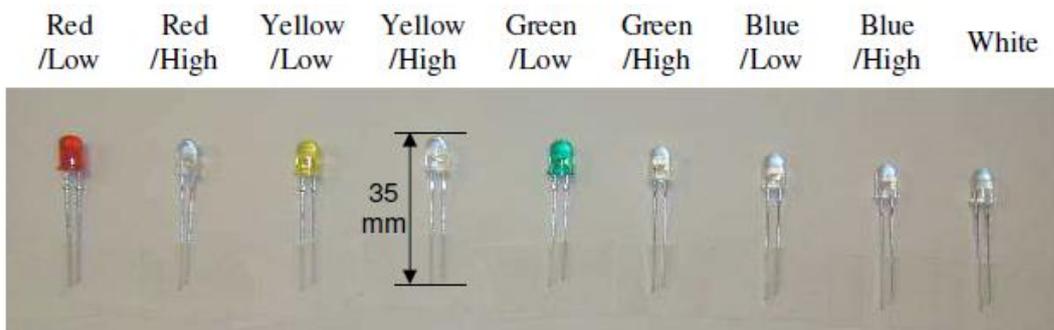


Figure 4-25 : Puces à LED DIP de différentes couleurs et intensités lumineuses [59]

Ces deux résultats soulignent l'importance des caractéristiques des produits à technologie LED, tant au niveau de leur structuration mécanique d'assemblage, qu'au niveau de leur composition en matériaux et en composants, qui sont essentielles pour toute prise de décision liée à l'optimisation de leur traitement en fin de cycle de vie [42]. Les typologies des produits à LED sont donc essentielles pour le choix de la filière de valorisation. Le nombre de huit échantillons fragmentés sélectivement n'est pas assez représentatif, pour conclure sur les résultats obtenus [58]. Des futures études, avec une sélection d'échantillons plus représentatifs, seront nécessaires en fonction des types de culots, de formes et de compositions matériaux [42].

Prenons le cas des drivers et des puces à LED qui sont collés sur les plateaux dans certaines lampes [60]. L'auteur a réalisé un bilan massique à partir de 17 lampes conçues, entre 2013 et 2016, par différents fabricants. Puis, le nombre d'éléments, le contenu en composants et matériaux, la complexité et le temps de désassemblage manuel ont été analysés, en fonction du prix d'achat des produits et de leur année de commercialisation (cf. Figure 4-26). L'auteur a souhaité mettre en avant les problèmes de démontage rencontrés, afin de les corrélés avec l'année de conception.

L'objectif de cette analyse est de faciliter le traitement en fin de vie par une approche d'éco-conception. Cependant, cette étude ne prend pas en considération les différences de morphologies et de structurations mécaniques ayant un impact sur la récupération des composants électroniques et des matériaux constitutifs. Par ailleurs, l'auteur n'applique pas de coefficients de pondération à son échantillonnage et n'indique pas de démarche pour l'identifier et le traiter [42] [60].

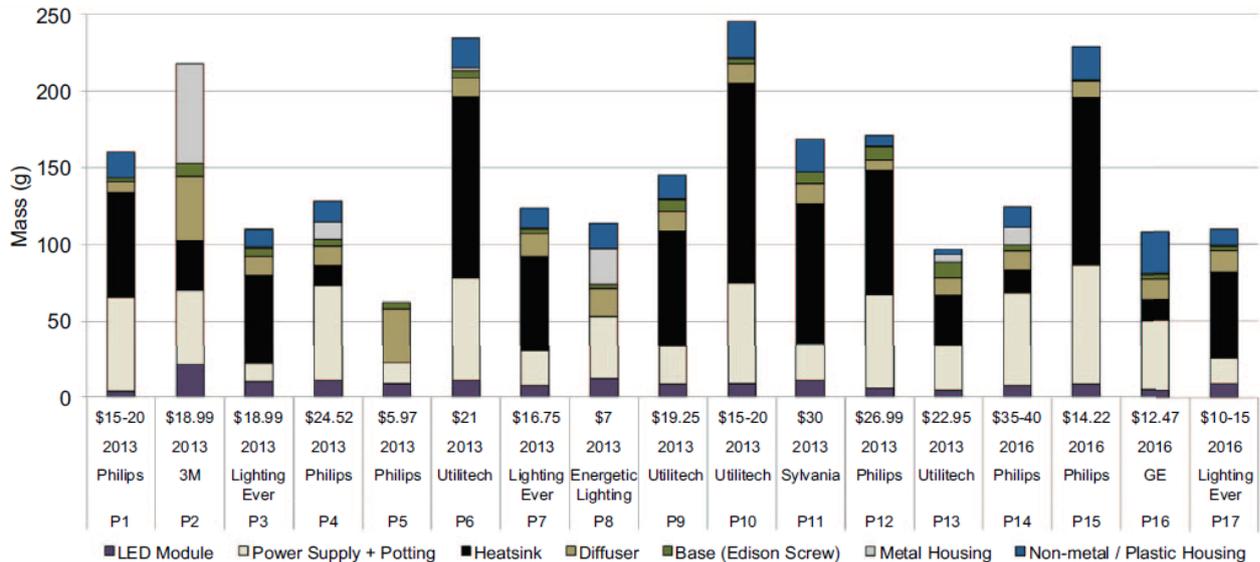


Figure 4-26 : Bilan massique des lampes à LED, entre 2013 et 2016 [60]

Les données de caractérisation des produits à LED sont indispensables, pour identifier et orienter le choix des décideurs vers un outil optimal de recyclage, déterminé en fonction de la typologie. La combinaison d'une technologie probante de traitement, en fonction des caractéristiques de compositions matériaux et de composants électroniques, détermine le niveau de criticité de récupération en matériaux constitutifs, en métaux stratégiques et précieux [42].

Les niveaux de caractérisation des sous-produits sont différents en fonction des auteurs. En 2010, une étude propose sept catégories : le système optique, le joint silicone, le plateau à LED, le dissipateur thermique, le driver, le corps et le culot. La Figure 4-27 représente ces éléments [61]. L'étude réalisée, en 2017, a également identifié sept sous-ensembles [60]. Cependant, l'auteur a fait une distinction entre les corps en métal et en plastique. Il n'a pas considéré les joints en silicone, sans doute à cause de la maturité de la technologie. Par ailleurs, rappelons que les produits arrivant dans les déchets actuellement, issus de la technologie datant de 2015, sont dépourvus de dissipateurs thermiques (cf. chapitre 2, partie 2.4.1).

Dans une étude brésilienne, réalisée par Thiago Martins, l'auteur a classé les éléments en neuf catégories : le système optique, le corps en métal, le corps en plastique, le plateau à LED, le driver, le condensateur, la bobine, le câble d'alimentation et le culot [41]. Ce qui est comparable à la classification d'une seconde étude brésilienne, réalisée par Marcelo Pilotto Cenci : la carcasse, le plateau à LED, les puces LEDs et le driver [30]. L'appellation de carcasse de la part de l'auteur inclut le système optique, le culot, le corps en plastique et en aluminium. Le driver considère tous les composants électroniques, ainsi que les câbles d'alimentation.

A partir du bilan massique réalisé sur les déchets 2019 dans le chapitre 2 (cf. partie 2.4.1), la fraction de la carcasse constitue 69% de l'ensemble, ce résultat est concomitant avec l'estimation de 70% obtenue par Mizanur Rahman S.M [42]. Marcelo Pilotto Cenci a également identifié que les systèmes optiques sont constitués de PC et les corps de PBT, similairement à notre étude [20]. Les 73 lampes, commercialisées au Brésil, analysées par l'auteur, sont constituées d'un corps en aluminium, enrobé par une matrice polymère en PBT. La Figure 4-28 (a et b) illustre la similitude

entre nos échantillons fragmentés sélectivement au SELFRAG Lab (Figure 4-28-a) et ceux de Marcelo Pilotto Cenci désassemblés manuellement (Figure 4-28-b). Les échantillons disponibles chez ARTEMISE sont donc équivalents à ceux de cette seconde étude brésilienne. Ainsi, nous supposons qu'ils ont la même composition en métaux [30] et nous appliquons les mêmes taux de métaux précieux et stratégiques, pour notre analyse AFM. Présentons ci-dessous la méthodologie adoptée.



Figure 4-27 : Démontage d'une lampe à LED : Système optique (a), joint silicone (b), plateau à LED (c), dissipateur thermique (d), driver (e), corps (f) et le culot (g) [61]

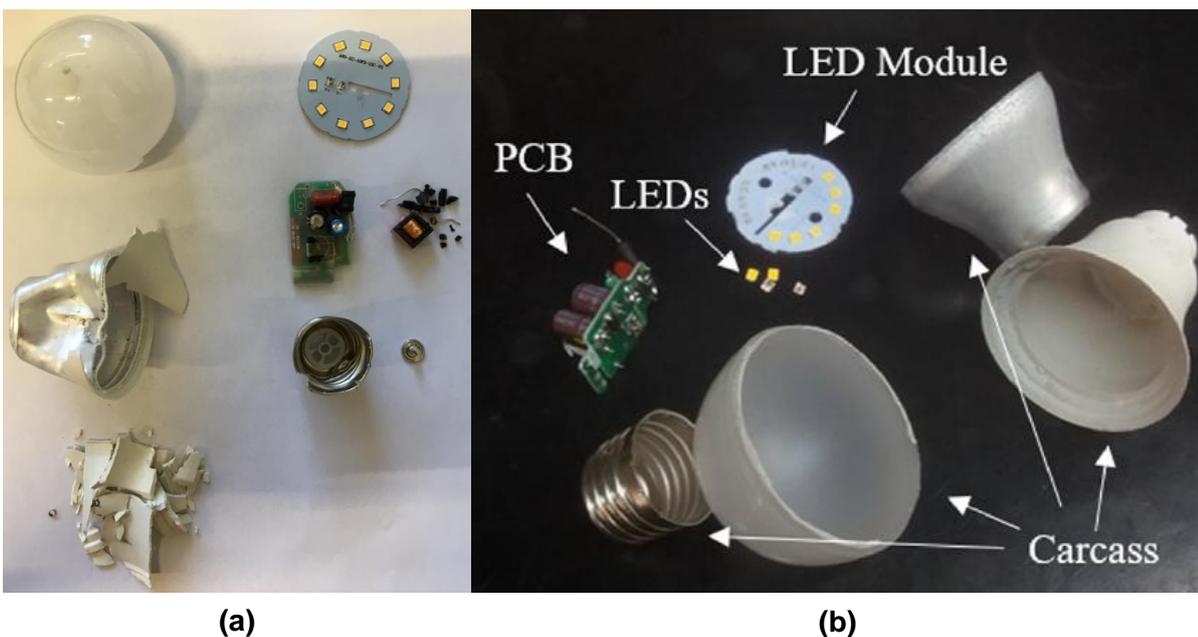


Figure 4-28 : Exemples de lampes E27 en plastique désassemblées : Sélectivement au SELFRAG Lab (a) et manuellement (b) [30]

4.4.3. La méthodologie et les données considérées

L'objectif principal consiste à isoler les plateaux à LED et les drivers, sans les détériorer. Ils représentent sur la technologie 2013-2014 respectivement 5,6% et 9,5% en masse, récupérés dans le gisement de déchets en 2019. Ces fractions vont augmenter sur la technologie 2020, qui arriverait dans le gisement des déchets à partir de 2025, avec durée moyenne d'utilisation estimée à $4,5 \pm 1,7$ ans, pour atteindre 9,8% et 13,6% (cf. chapitre 2).

A partir du gisement maximal de déchets de lampes et spots à LED, estimé en France à plus de 5000 tonnes, dont 2500-2600 tonnes allouées pour ARTEMISE à la fin de la décennie (correspondant à 50% du gisement français), nous pouvons évaluer les quantités totales de composants électroniques pour tous les produits à LED. Nous avons ainsi estimé un gisement maximal en 2030, pour ARTEMISE, pouvant atteindre 350 tonnes pour les drivers et 253 tonnes pour les plateaux à LED, dans le scénario d'un taux de collecte croissant de 42% à 100% (cf. chapitre 2). Ces fractions de composants électroniques des lampes et spots sont déterminantes pour le bilan économique, de par leur teneur en métaux précieux et stratégiques. Elles doivent donc être traitées avec le plus grand intérêt.

Comme évoqué précédemment, en fonction du type de traitement utilisé, ces matériaux risquent de se mélanger et de se perdre dans les fractions non récupérables. Ce point est soulevé dans le cas d'un Business as Usual (BaU) composé d'un broyeur mécanique traditionnel combiné aux techniques de tri actuelles.

Afin d'éviter ces pertes de fractions de métaux, nous proposons d'intégrer dans l'outil industriel de production la solution technologique des puissances pulsées, pour une déstructuration sélective des différents sous-produits. L'intégrité des éléments séparés est ainsi préservée, comme le présente la Figure 4-28-a, dans le cas d'une lampe à LED E27 en plastique, désassemblée avec l'outil EDF SELFRAG Lab. Cet aspect a été étudié et confirmé par les essais pré-industriels en flux continu avec le réacteur EHF IMPULSTEC (cf. chapitre 3).

Les modules LEDs, incluant les puces à LED, sont à haute valeur ajoutée et constituent la valeur commerciale de ces dispositifs d'éclairage. La matrice de LEDs est composée des matériaux semi-conducteurs qui sont le gallium et l'indium, $\text{In}_x\text{GaN}_{(1-x)}$ [62]. Les connectiques sont constituées d'or et d'argent [62]. Les puces sont collées ou soudées sur un substrat en aluminium ou en saphir, par l'intermédiaire de jonctions étain-bismuth [62]. Le dôme extracteur de lumière, constituée en résine luminescente, matrice polymérique qui permet la conversion de la lumière bleue en lumière blanche, contient des terres rares [7] [42] [62].

Le choix des trois catégories de lampes identifiées E27 petits bulbes (38%), E27 gros bulbes (10%), B22 (3%) et E14 (4,5%), à partir de l'étude du gisement, est pertinent et représentatif des flux arrivant actuellement en déchets en France (cf. chapitre 2). Ces produits sont collectés par l'éco-organisme et triés au sein de l'usine ARTEMISE. La proportion de ces équipements correspond à plus de 50% des flux de déchets totaux. Leur structuration mécanique étant semblable, les paramètres expérimentés et analysés pour les dispositifs E27 en plastique avec un bulbe standard de diamètre 40 mm, dans les études paramétriques du chapitre 3, peuvent s'appliquer à ces trois typologies d'équipements à LED.

L'échantillonnage ainsi établi est déterminant pour la validité des résultats. Cette sélection, étant donc cohérente, conforte la pertinence et la validité de notre étude AFM. Elle permet un aperçu global, essentiellement stratégique et économique pour la société ARTEMISE [42].

Rappelons qu'une déstructuration sélective par la technologie des puissances pulsées, de ces typologies de produits à LED en plastique, est considérée concluante (cf. chapitre 3), si nous observons :

- Une séparation totale du bulbe avec le corps de la lampe ;
- Une séparation totale du plateau à LED, avec plus de 50% des puces à LED encore positionnées sur leur support en aluminium ;
- Une séparation totale du driver à la fois au niveau du plateau à LED (soudé ou emboîté) et du culot (soudé) ;
- Un culot encore apparié avec le corps de la lampe.

A partir de ces critères et de l'évolution de la technologie⁴¹, nous considérons cinq sous-ensembles dans notre étude qui sont : les plateaux LEDs avec les LEDs appariées sur les supports, les drivers, les systèmes optiques en PC, les corps en PBT et en aluminium sertis ou non aux culots en acier. L'intégrité physique de certains composants électroniques étant préservée, grâce à la technologie des puissances pulsées identifiée, ARTEMISE pourra optimiser leur valeur commerciale et les vendre au meilleur prix. Les acteurs du recyclage peuvent ainsi maximiser les extractions des métaux précieux et stratégiques les constituant. Les éléments constitutifs considérés, qui ont été identifiés dans l'étude réalisée par Marcelo Pilotto Cenci [30] sont : l'argent (Ag), l'aluminium (Al), le cuivre (Cu), le fer (Fe), le gallium (Ga), le nickel (Ni), le plomb (Pb), l'or (Au), l'étain (Sn), le titane (Ti), le cérium (Ce) et l'yttrium (Y).

En outre, il est important d'estimer les quantités de ces typologies à LED en plastique. Rappelons que la durée de vie moyenne du gisement, représenté par un échantillon prélevé entre mai et juillet 2019, est évaluée à $4,5 \pm 1,7$ ans (cf. Figure 4-29). Nous appliquons la loi de Weibull pour modéliser le gisement potentiel des déchets de ces dispositifs, à partir de 2022 jusqu'en 2030. Pareillement au chapitre 2, nous appliquerons une durée de vie moyenne de 4,3 ans, issue d'une étude européenne [63]. Les valeurs correspondantes des paramètres sont $\alpha = 1,20$ (de forme) et $\beta = 4,57$ (d'échelle). Par conséquent, l'estimation du gisement de lampes à LED des typologies E27, B22 et E14 en plastique, arrivant en déchets, est basée sur les données des importations et des exportations de la direction générale des douanes françaises [64]. Nous supposons que la fraction de ces trois typologies restera constante à 55% jusqu'en 2030. Nous appliquons ensuite un taux de collecte constant à 42% (représentant le gisement minimal : scénario 1) et un taux évoluant de 42% à 100% (représentant le gisement maximal : scénario 2). En considérant le taux minimal et le taux maximal, nous représentons les valeurs basses et hautes du gisement de lampes à LED en plastique pour ARTEMISE. Nous sommes conscients que ces analyses ont un degré de fiabilité relatif sur les projections ainsi estimées, mais elles nous donnent une première approche quantitative des fractions valorisables pour ces trois types de lampes.

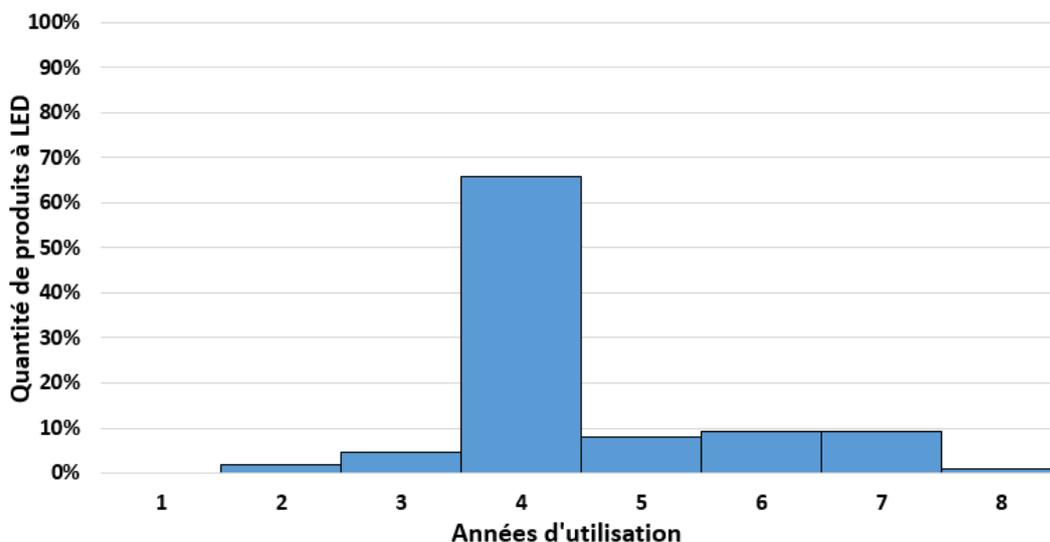


Figure 4-29 : Distribution de la durée de vie des dispositifs d'éclairage à LED, prélevés chez ARTEMISE en 2019

⁴¹ Absence des dissipateurs thermiques et des mousses isolantes répartitrices de chaleur en silicone.

Dans le scénario 1, fixant un taux de collecte constant à 42%, le gisement dépasserait les 500 tonnes à partir de 2027 et atteindrait 596 tonnes à la fin de la décennie. Alors que dans le cas du scénario 2, avec un taux croissant de 42% à 100%, le gisement serait estimé à plus de 1000 tonnes en 2027 et arriverait à 1420 tonnes en 2030. Ces données sont présentées sur la Figure 4-30. Cette analyse montre le potentiel de valorisation que pourrait réaliser la société ARTEMISE avec ces dispositifs à LED en plastique.

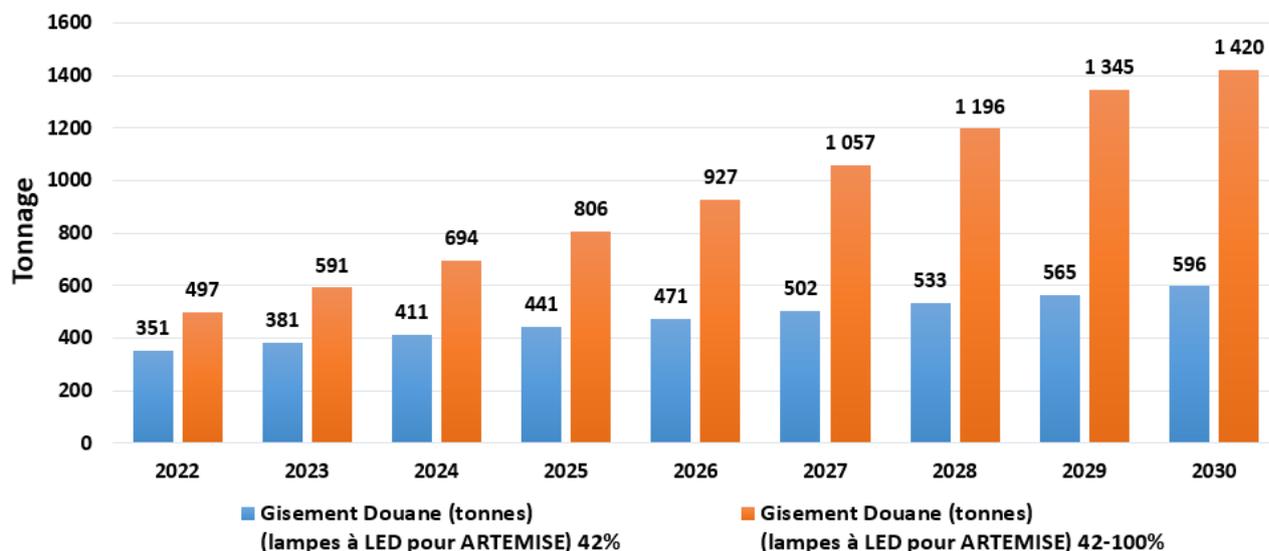


Figure 4-30 : Gisement de lampes E27, B22 et E14 en plastique pour ARTEMISE (Taux de collecte constant à 42% et croissant de 42% à 100%)

A partir de ce gisement annuel des typologies à LED en plastique et des bilans massiques réalisés (cf. chapitre 2), nous évaluons la répartition des fractions des matériaux constitutifs et des composants électroniques, que la société ARTEMISE valoriserait, entre 2022 et 2030. Cette répartition des fractions est récapitulée dans le Tableau 4-12 et sur la Figure 4-31.

Les dispositifs à LED en plastique seront séparés sélectivement, en cinq sous-ensembles, dans le réacteur des puissances pulsées. Après l'étape de séchage, les fractions sont triées par un dispositif optique de spectroscopie infrarouge FTIR et de fluorescence X. Ainsi, sont récupérés :

- Les plateaux à LED ;
- Les drivers ;
- Les systèmes optiques en PC ;
- Les corps en PBT et en aluminium ;
- Les culots en acier.

ARTEMISE pourrait ainsi traiter, à partir de 2022, entre 33 à 47 tonnes de drivers et entre 20 à 28 tonnes de plateaux à LED. A la fin de la décennie, elle valoriserait entre 81 à 193 tonnes de drivers et entre 58 à 139 tonnes de supports à LED. Les quantités dépendront du taux de collecte en fonction des scénarii 1 ou 2. Les métaux précieux et stratégiques, contenus dans ces composants électroniques, permettront à l'entreprise d'améliorer son bilan économique.

Les fractions de PC composant les bulbes, étant dépourvues de brome, seront broyées puis revendues aux industriels, pour la fabrication de nouveaux dispositifs à LED ou pour d'autres secteurs industriels. Les quantités maximales pourraient atteindre entre 57 à 136 tonnes.

Scénario	Année	Gisement ARTEMISE	Drivers	Puces + support	PC	PBT	Silicone	Acier	Aluminium
1	2022	351	33	20	34	45	38	12	152
	2023	381	40	25	37	48	36	13	144
	2024	411	47	32	40	51	32	15	132
	2025	441	55	39	42	55	27	16	116
	2026	471	64	46	45	58	21	19	98
	2027	502	68	49	48	61	23	21	104
	2028	533	72	52	51	65	24	22	111
	2029	565	77	55	54	69	26	23	117
	2030	596	81	58	57	73	27	24	124
2	2022	497	47	28	48	64	54	16	215
	2023	591	62	39	57	75	55	20	223
	2024	694	80	53	67	87	54	25	223
	2025	806	101	70	78	100	49	30	213
	2026	927	126	91	89	113	42	38	192
	2027	1057	143	104	101	129	48	43	219
	2028	1196	162	117	114	146	54	49	248
	2029	1345	182	132	129	164	61	55	279
	2030	1420	193	139	136	174	64	58	295

Tableau 4-12 : Gisement ARTEMISE des matériaux et composants de lampes à LED E27, B22 et E14 en plastique, pour les deux scénarii (valeurs en tonne)

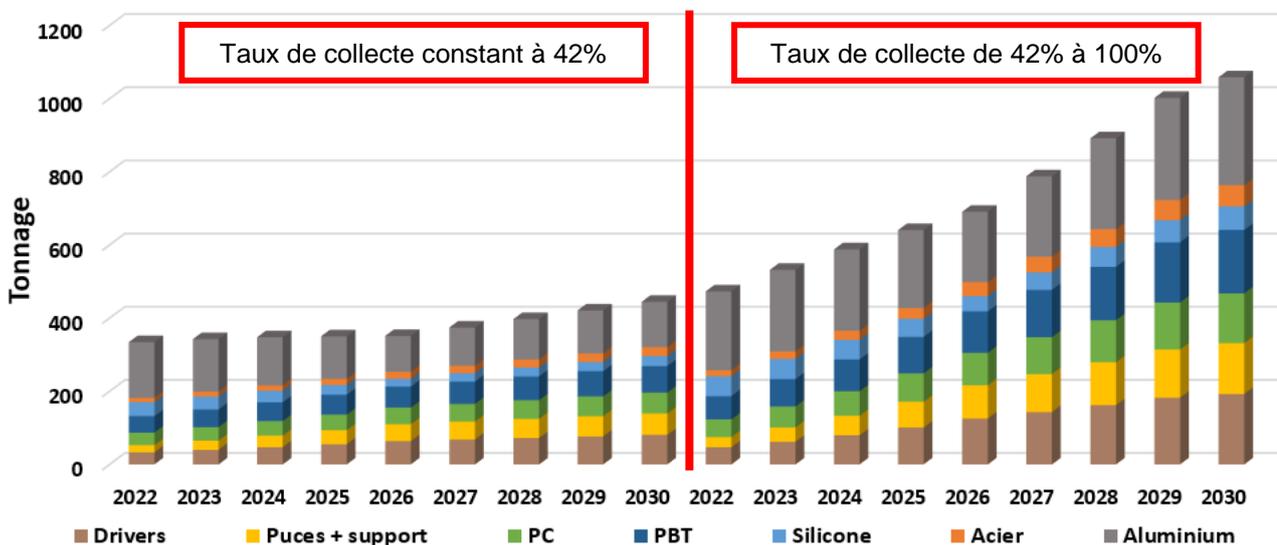


Figure 4-31 : Répartition des fractions de matériaux et composants des lampes à LED E27, B22 et E14 en plastique, pour les deux scénarii (gisement ARTEMISE)

Les corps sertis ou non aux culots seront également broyés, puis triés. Ainsi, un dispositif Overband attire et sépare l'acier. ARTEMISE pourrait valoriser entre 24 à 58 tonnes à la fin de la décennie. Un séparateur à champ magnétique puissant à courants de Foucault éjecte et récupère l'aluminium. Des quantités très intéressantes pourraient être recyclées, elles seraient évaluées entre 124 à 295

tonnes. Les fractions de PBT non bromées seront séparées des matrices contenant du brome avec un dispositif de tri par flottaison. Suite à notre étude collaborative avec les Arts et Métiers ParisTech - Institut ENSAM de Chambéry, 45% des fractions sont potentiellement non bromées [27]. Par conséquent en 2030, ARTEMISE pourrait valoriser entre 33 à 78 tonnes de fractions de PBT non bromées.

Cette caractérisation complexe des briques technologiques de séparation sélective, de broyage et de valorisation est un outil d'aide à la prise de décision pour les décideurs politiques et les acteurs industriels. C'est une solution innovante, exhaustive et efficiente qui contribue à l'économie circulaire par le bouclage des flux de matériaux.

Par cette analyse, les scénarii II et III du projet RECYLED sont considérés. Nous allons désormais prendre en compte le scénario I, de réutilisation des dispositifs à LED encore fonctionnels qui sont évalués à 38%, puis discuter les résultats, en réalisant une simulation AFM avec une tonne d'équipements en plastique E27, B22 et E14.

4.4.4. Résultats et discussions

L'objectif de cette partie est d'appliquer la méthode AFM comme support d'aide à la prise de décision au niveau d'ARTEMISE, pour la mise en place d'un nouveau processus de traitement de la fin de vie des équipements à LED. De ce fait, l'objectif est double : d'une part évaluer le gisement des produits à LED en fin de vie et d'autre part analyser la faisabilité technique de mise en place du nouveau processus de recyclage, reposant sur la technologie des puissances pulsées.

Pour réaliser cette étude, les catégories de lampes à LED E27, B22 et E14 ont été sélectionnées. Un gisement type de 1000 kg récupéré et trié par ARTEMISE est évalué ensuite. Ce gisement provient aussi bien du flux professionnel que du flux domestique. Le processus introduit est celui des puissances pulsées, dont l'objectif est d'absorber tout le flux de déchets à LED, qui était destiné initialement au traitement de broyage dans le scénario conventionnel, dénommé BaU. Dès lors, le processus intégrant les puissances pulsées viendrait améliorer le traitement des dispositifs à LED en fin de vie, afin d'assurer un meilleur désassemblage de ces déchets. Les principaux composants seront ensuite récupérés (plateaux à LED, drivers, matrices polymères, etc.). Les deux scénarii, ainsi que leurs taux de récupération et de traitement seront présentés par la suite.

Les hypothèses utilisées dans ce modèle permettent à la fois de pallier le manque de données de certains processus et du gisement des dispositifs à LED. En addendum, le processus a permis de simplifier la simulation avec le logiciel STAN (<https://www.stan2web.net/>) [65] [66] [67], afin de permettre à l'entreprise d'avoir un premier aperçu des résultats pour une prise de décision économique sur le choix du processus à prendre en compte. Les hypothèses posées sont présentées ci-dessous :

- Au niveau du gisement, une variabilité du gisement de 10% a été considérée, afin de prendre en compte les incertitudes liées à la logistique et à la réception des déchets LEDs ;
- Au niveau du processus des puissances pulsées : un taux de perte de 0,26% a été considéré dans ce modèle. Ce taux a été évalué expérimentalement par la fragmentation sélective, lors de l'étude réalisée avec le dispositif SELFRAG Lab (cf. partie 3.6.3.1) ;
- Au niveau du scénario de réutilisation : ce processus prend en compte le flux des produits LEDs qui ont réussi les tests ON/OFF. Il est supposé que tout le flux, évalué à 38%, ne comporte pas de refus (cf. chapitre 1) ;
- Au niveau des compositions massiques des drivers, des puces et des plateaux à LED : nous supposons que les proportions massiques inconnues des puces et des plateaux à LED, non

caractérisées par Pilotto Cenci et al. [30], seront réinjectées dans la proportion massique de fibre de verre et de la résine époxy. Ces proportions sont respectivement de 0,004% et 0,028% pour les puces et les plateaux à LED. En effet, cette hypothèse nous permettra une conservation de la matière entre les entrées et les sorties, pour réaliser notre étude AFM ;

- Au niveau du broyage des bulbes, corps et culots : le processus a démontré expérimentalement un taux de perte dans la récupération et la revente des fractions de PC, d'aluminium et d'acier. A partir des bilans massiques du chapitre 2, les pertes représentent respectivement 1,23%, 0,80% et 0,25% pour les trois flux.

De plus, il est supposé que le processus des puissances pulsées proposé dans ce modèle préserve l'intégrité des matériaux et permet une meilleure séparation des composants. Quant à la récupération des métaux précieux et stratégiques, nous considérons un procédé externe à notre système (type hydrométallurgie ou autre) qui permettra leur récupération, puis leur valorisation.

Il existe en général quatre grandes techniques pour la modélisation et l'évaluation des flux, de matériaux et de stocks [65]. Ces techniques sont l'intensité d'utilisation [66], la courbe de demande [67], la fonction de production et l'analyse entrée-sortie (input-output). Ces techniques ont prouvé leur efficacité dans différents domaines et secteurs. Muller [65] a résumé ces différentes techniques en évaluant leurs points forts, domaines d'application approuvés, ainsi que leurs inconvénients. La dernière technique (entrée-sortie) inclut l'analyse des flux de matières et d'énergie (AFME ou AFM). Cette méthode se base sur le principe de conservation de masse dans l'économie. L'AFM a aussi pour objectif d'évaluer la durabilité et la faisabilité d'une économie circulaire, dans un écosystème avec une vision systémique [68].

L'état de l'art a aussi démontré l'intérêt de cette méthode pour évaluer le gisement d'un produit, d'un processus ou d'un écosystème sur un territoire. Par exemple, Kytzia [69] a utilisé cette méthode comme support pour évaluer les écosystèmes urbains. Bertram et al. [70] a modélisé la circulation mondiale et le dynamisme des flux et stocks d'aluminium. Agamuthu et al. (71) a évalué les flux, gisements et stocks de déchets EEE universitaires, en faisant intervenir différents scénarii de fin de vie. L'AFM peut aussi être utilisée comme support dans les modèles d'aide à la prise de décision (mono ou multi critères), afin d'apporter une vision systémique et globale pour les décideurs concernant la gestion des flux de matières et d'énergie, durant toutes les étapes du cycle de vie du système [72] [73].

L'AFM est une méthode normée (Önorm S2096-1 : 2005), dont le principe est la conservation massique du flux entre les entrées et les sorties (en kg), comme démontré par l'équation suivante [74].

$$\sum_{i=1}^{n_{\text{entrée}}} f_i = \sum_{o=1}^{n_{\text{sortie}}} f_o + \sum_{s=1}^{n_{\text{stock}}} S_s \quad (3)$$

Soit :

- i : flux d'entrée
- o : flux de sortie
- s : flux de stock

Le stock des matériaux peut être calculé en utilisant l'équation ci-dessous [74] [75] :

$$MS_{i,a}(t) = \sum I_{i,a}(t) \times P_a(t) \quad (4)$$

Dont « $MS_{i,a}(t)$ » est le stock et « $I_{i,a}(t)$ » est l'intensité d'utilisation de la matière « i » du produit « a » durant l'année « t ». Dans notre étude, le produit « a » représente les systèmes d'éclairage à LED et « i » symbolise les constituants massiques de ces dispositifs LEDs (Ag, Al, Cu, Fe, Au, etc.). Le stock initial peut être supposé nul. $P_a(t)$ regroupe les grandeurs physiques du produit, en l'occurrence pour notre étude la masse en kg, la composition matériaux, la typologie, etc.

Les données, présentées précédemment sur les deux scénarii de traitement des déchets à LED, seront ensuite injectées dans un modèle AFM. Nous utilisons le logiciel STAN (v.2.6.801) pour la modélisation en AFM, ainsi que la propagation des incertitudes [76]. Ces dernières, dans les deux scénarii proposés, sont au niveau du flux d'entrée. Les valeurs expérimentales (taux de traitement, etc.) contiennent un pourcentage d'erreur (intervalle de confiance) et ne sera pas considéré dans un premier temps.

Les résultats présentés dans cette section ont pour objectif la comparaison des deux scénarii discutés auparavant. Les données sont présentées pour un gisement standard d'une tonne sur lequel des expérimentations ont été réalisées. Ce flux d'entrée permet également de valider expérimentalement le taux de traitement des deux processus présentés. Les autres taux de traitement sont tirés de la littérature [30]. Ces taux traitent des produits à LED E27 en plastique, de structuration mécanique d'assemblage similaire aux échantillons étudiés dans cette AFM, constitués de bulbes en plastique et de corps en aluminium, enrobés par une matrice en plastique (cf. Figure 4-28).

4.4.4.1. Modèle 1 : Business as Usual

Ce premier modèle caractérise le traitement, du gisement des équipements à LED en plastique, par un outil de broyage traditionnel, en prenant en compte une fraction du flux qui sera réutilisée. Cette fraction est obtenue, après la vérification du fonctionnement des dispositifs à l'aide d'un banc de tests ON/OFF (cf. Figure 4-32).

Comme indiqué sur la Figure 4-32, 38% du gisement caractérisé peut être réinjecté dans le marché. Ce taux est obtenu expérimentalement en testant chaque déchet unitairement sur un tableau électrique ON/OFF, afin de s'assurer de son aspect fonctionnel. Ces tests montrent aussi la pertinence de la mise en place d'une économie circulaire dans le secteur de l'éclairage, en proposant dans le commerce des produits de « seconde main », à des prix abordables. En addendum, cette analyse expérimentale démontre qu'une fraction non négligeable des déchets collectés et récupérés n'a pas encore atteint la durée de vie « commerciale », annoncée par les fabricants (cf. Figure 4-29). Si bien que, la réintroduction de ces produits dans le marché permettra de réduire considérablement le gisement des déchets à LED en fin de vie à traiter.

Le second flux présenté sur la Figure 4-32 schématise le taux du gisement initial qui sera dirigé vers l'outil de broyage conventionnel. En effet, $620 \pm 6,2$ kg sont orientés vers ce processus afin de récupérer les fractions les plus simples à trier, ce qui représente un flux important à traiter. De plus, le taux de récupération est très faible puisqu'il ne concerne que les fractions aluminium, acier et polymères. Les fractions des métaux ferreux (8%) et non ferreux (26%) sont vendues. Tandis que celles des matrices plastiques (52%) sont incinérées. Le taux de fines et de pertes dans ce modèle est estimé à 14% (source entreprise ARTEMISE). Il est de ce fait important d'optimiser ce processus, afin d'améliorer le traitement de fin de vie des déchets des systèmes à LED, de maximiser le taux de recyclage et aussi de décrétement la fraction non récupérable de ces produits. Une telle optimisation permettrait aussi d'accroître les bénéfices du processus de recyclage des dispositifs à LED et de potentiellement réduire en parallèle l'impact environnemental du recyclage de cette catégorie de déchets. La section suivante présente et décrit le second scénario.

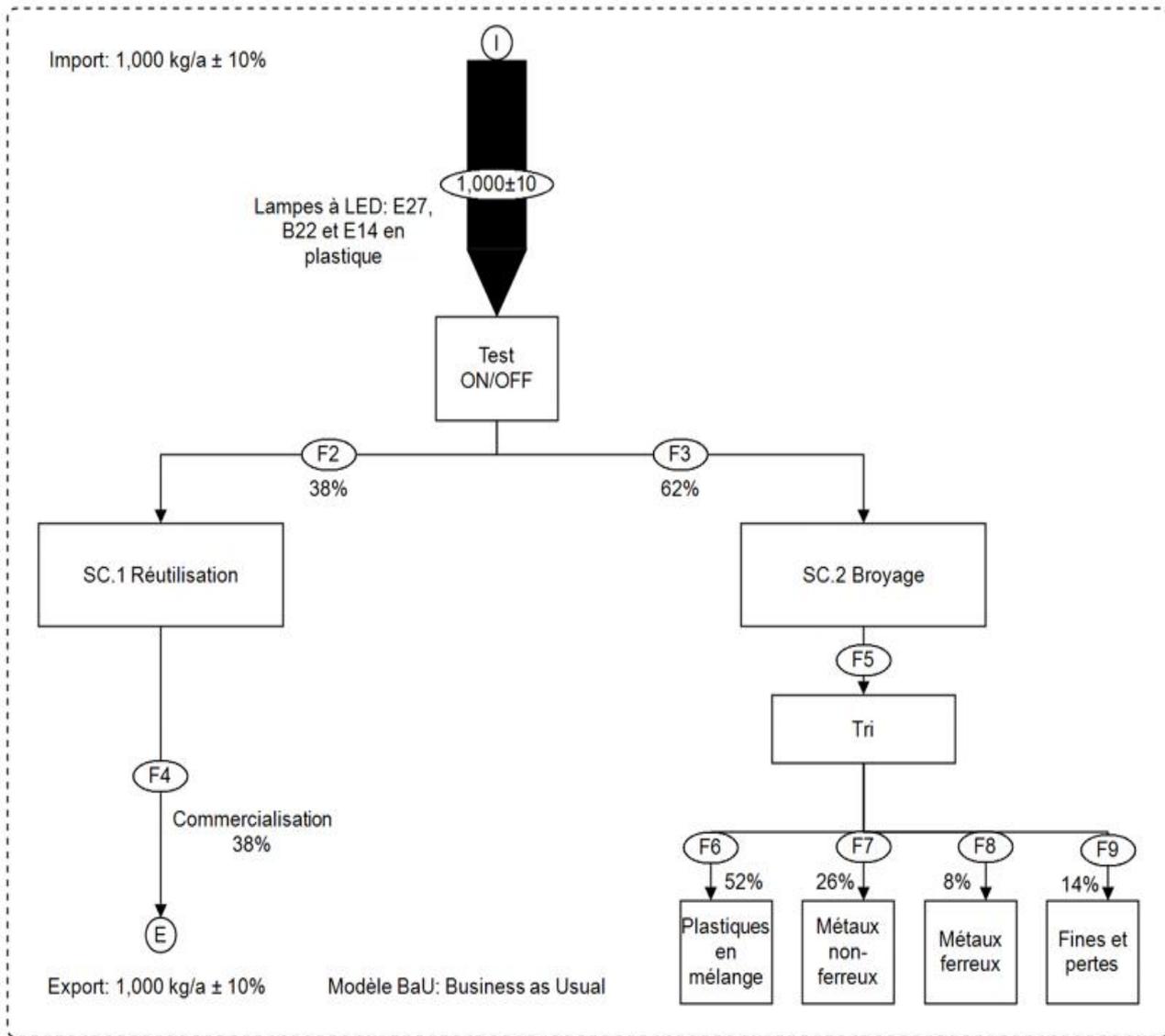


Figure 4-32 : AFM du premier scénario - BaU (réutilisation et broyage conventionnel)

4.4.4.2. Modèle 2 : Puissances pulsées

Le second scénario présenté est celui dont le broyage conventionnel, de la fraction des produits LEDs non réinjectée dans le marché, est supplanté par une méthode de séparation sélective basée sur l'innovante technologie des puissances pulsées. Elle permet un désassemblage non destructif de ces déchets. La Figure 4-33 démontre la faisabilité d'introduire une telle technologie dans le processus de recyclage étudié. Dans ce scénario, le même taux de produits réinjectés dans le marché est assuré avec le banc de tests « ON/OFF », afin de permettre la commercialisation des produits de « seconde main ». Cependant, le broyage conventionnel est remplacé par un ensemble de processus de séparation sélective et de tri, en utilisant la technologie des puissances pulsées. En addendum, nous supposons que l'incertitude sur le flux initial a été réduite à 0,5% par l'amélioration du processus de collecte.

Ce modèle permet à l'issue du traitement de trier de manière efficace les sous-produits plateaux, puces LEDs et les drivers qui composent les déchets. Le taux de tri est de 12% pour les drivers,

16,4% pour les plateaux et puces à LED. De plus, les techniques de tri FTIR/FX permettent de récupérer 35% des matrices plastiques en PBT, incorporées par le brome mais dont une fraction en est potentiellement dépourvue. Enfin, 36,6% des sous-produits, bulbes (en PC), corps de lampes (en Al) et culots (en Fe), sont valorisés par un dispositif de broyage conventionnel.

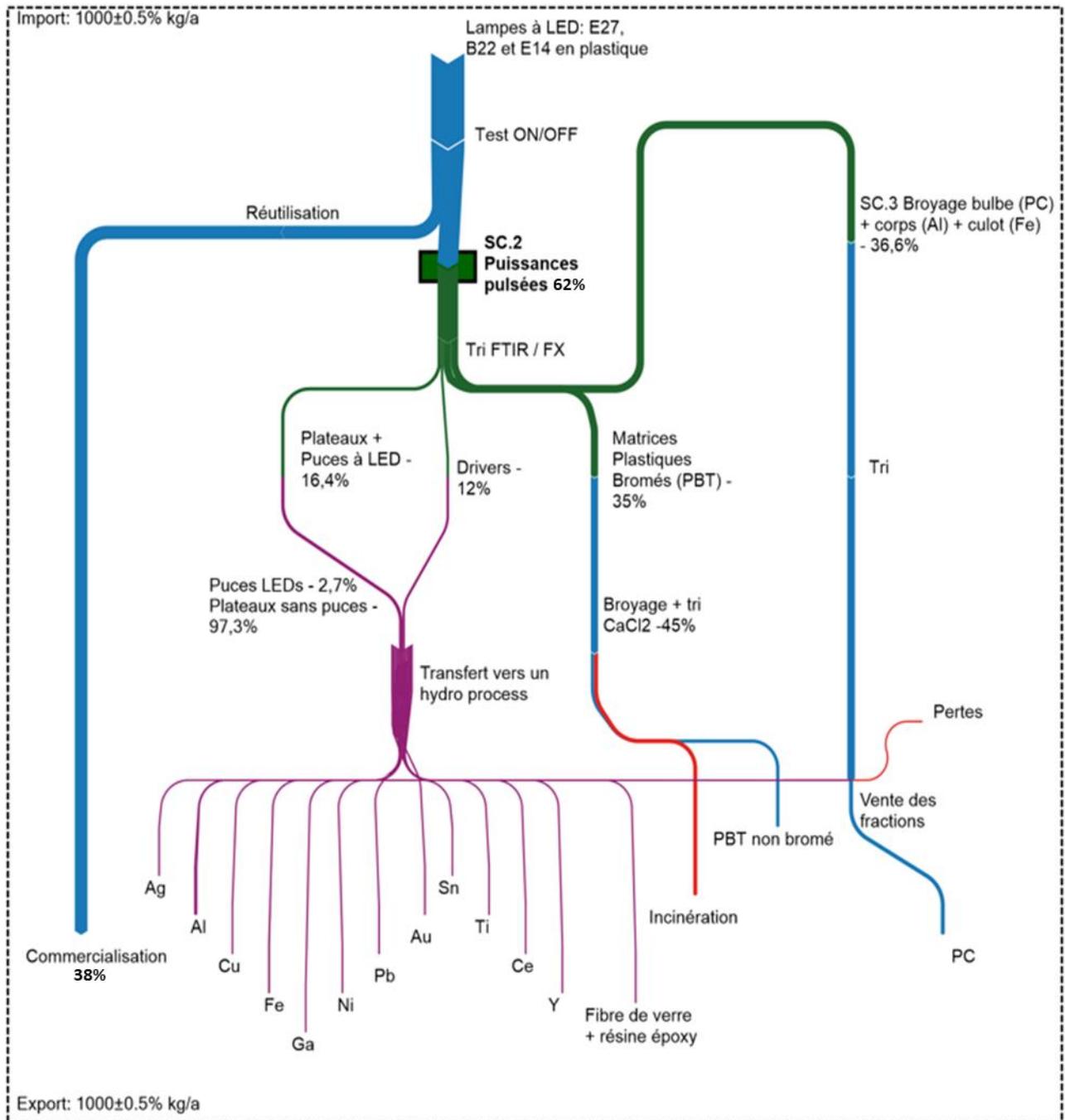


Figure 4-33 : AFM du second scénario - Séparation sélective par les puissances pulsées

D'un côté, une première évaluation de ce modèle montre que le scénario proposé permet de réduire la quantité à traiter par le broyage conventionnel de 28,4%. En effet, 71,6% des déchets ne contiennent pas des fractions pertinentes (drivers, plateaux et puces à LED). Cette fraction est renvoyée vers le broyage conventionnel, afin de récupérer les flux Al, Fe, PC et PBT non bromé qui seront revendus par la suite. En addendum, un taux de perte a été calculé à partir des essais réalisés. Ce taux contient la perte de matières dans le processus de broyage (SC.3) et représente 5,2 kg de la quantité du flux injecté dans ce processus.

D'un autre côté, les matrices plastiques en PBT, considérées bromées, subissent un broyage ainsi qu'un tri par flottaison en solution de chlorure de calcium (CaCl_2), afin de séparer la fraction bromée de celle non-bromée. Expérimentalement, cette méthode a permis d'éviter d'envoyer 45% de ce flux en incinération. Par conséquent, sur un gisement considéré de 1000 kg contenant environ $217 \pm 1,1$ kg de PBT, seul un flux $119,4 \pm 0,6$ kg est envoyé en incinération spéciale de produits dangereux, alors que $97,7 \pm 0,5$ kg de ce flux, représentant les matrices polymères (des corps et des culots) dépourvues de brome, est récupéré et valorisé pour la fabrication d'autres équipements électriques et électroniques.

Aussi, ce scénario suppose qu'à la suite de la séparation sélective, les plateaux, puces à LED et drivers seront acheminés vers un autre processus (type hydrochimie [37] ou autre), afin de récupérer les métaux précieux et stratégiques, ainsi que les autres fractions valorisables les constituant. Ces flux sont schématisés en rose sur la Figure 4-33.

La section suivante quantifie les taux de récupération et les fractions massiques des métaux et matériaux, récupérés par ces procédés. En se basant sur la Figure 4-33, différents flux sortant sont quantifiables en proposant un processus global de traitement. Cet outil de traitement est basé sur une combinaison de technologies : les puissances pulsées, le broyage conventionnel, le tri FTIR/FX, le tri par flottaison et l'hydrométallurgie, pouvant extraire les fractions des métaux et matériaux des plateaux, puces et drivers des équipements à LED. Le Tableau 4-13 quantifie les flux sortant de cette analyse AFM.

Flux sortant	Masse (kg)
Commercialisation (lampes ON)	$380 \pm 1,9$
PBT non bromé	$97,7 \pm 0,5$
Pertes	$5,2 \pm 0,03$
Incinération	$119,4 \pm 0,6$
PC	$119,9 \pm 0,6$
Al	$136,1 \pm 0,7$
Cu	$15,9 \pm 0,08$
Fe	$32,1 \pm 0,2$
Sn	$15,8 \pm 0,08$
Fibre de verre + résine époxy	$77,8 \pm 0,4$

(a)

Flux sortant	Masse (g)
Ag	$20,9 \pm 1,05$
Ga	$5,6 \pm 0,3$
Ni	$90,2 \pm 0,5$
Au	$44 \pm 0,22$
Ti	$121 \pm 0,6$
Y	$18,8 \pm 0,09$

(b)

Flux sortant	Masse (mg)
Pb	$989 \pm 4,9$
Ce	$247,1 \pm 1,2$

(c)

Tableau 4-13 : Flux des matériaux du scénario SC.2 des puissances pulsées :
En kilogramme (a), gramme (b) et milligramme (c)

Le nombre de chiffres significatifs et les unités ont été choisis pour représenter l'ensemble des éléments constitutifs, y compris ceux présents en très faible quantité

Ce tableau informe aussi les décideurs sur la concentration de matériaux dans le gisement des déchets à traiter. Le flux de déchets de « seconde main », à réinjecter dans le circuit de commercialisation dans une démarche d'économie circulaire, représente 380 kg. En outre, les fractions des flux sortant, des matrices polymères (PC et PBT non bromé), fibre de verre et résine époxy à recycler, sont estimées à 295,4 kg. Ensuite, le flux d'aluminium représente 136,1 kg, suivi par l'acier et le cuivre, évalués respectivement à 32,1 kg et 15,9 kg. Le reste des matériaux, y compris l'or et l'argent, peut être récupéré par un procédé d'hydrochimie par exemple, en cours d'optimisation à l'échelle académique [37].

Cette évaluation permet par ailleurs d'obtenir un aperçu sur les retombés économiques du recyclage des déchets des dispositifs à LED, ainsi que sur la faisabilité de la mise en place d'un marché de produits à LED de « seconde main ». Une analyse similaire a été réalisée sur une fraction de déchets des typologies E27 en plastique, à bulbe standard de diamètre 40 mm (cf. partie 4.3). Cette étude AFM pourrait être complétée par des emplois potentiels pouvant être générés, par la mise en place de tels procédés de recyclage, pour cette nouvelle catégorie de DEEE. Ce scénario de création d'emplois, basé sur le gisement des déchets à traiter, sera programmé en perspectives. En effet, le gisement de déchets dans ce scénario devrait prendre en compte la chronologie de sortie des dispositifs à LED en fin de vie, durant la décennie (cf. Figures 4-30 & 4-31).

L'analyse AFM réalisée dans cette partie a permis d'évaluer le gisement, les flux et les stocks de matériaux à traiter en fin de vie, pour les lampes à LED E27, B22 et E14 en plastique. En addendum, elle a permis d'évaluer la faisabilité d'introduire un nouveau procédé pour le désassemblage et le tri de ces déchets. Le procédé basé sur la technologie des puissances pulsées, introduit dans le second scénario (SC.2), a permis d'augmenter le taux de valorisation matière des déchets à LED et de proposer un procédé à haute valeur ajoutée, dans le traitement de leur fin de vie. Ce procédé, combiné avec un traitement de récupération des métaux précieux et des matériaux constitutifs de ces déchets, de type hydrochimie, permet d'éviter l'incinération de ces déchets et les pertes de matières. En mettant en place un tel procédé, nous arriverons à valoriser plus de 80% du flux entrant, comparé au scénario de broyage conventionnel (voir scénario BaU - SC.2). L'objectif réglementaire imposé par les pouvoirs publics, représentés par l'éco-organisme ECOSYSTEM, dans le cadre de la Directive européenne 2012/19/EU du 4 juillet 2012 relative aux DEEE, est donc atteint (cf. partie 4.2.7). Aussi, les pertes dans le nouveau scénario proposé sont réduites et maîtrisées, par la capacité de la technologie des puissances pulsées à préserver l'intégrité physique des sous-ensembles.

De plus, en mettant en place un banc de tests « ON/OFF », au début du processus de traitement de la fin de vie des déchets, 38% du gisement à traiter peuvent potentiellement être revalorisés et réutilisés. Cette fraction améliore la fin de vie d'une partie des déchets, en introduisant une démarche d'économie circulaire par le réemploi. Ce qui permettrait une commercialisation des produits de « seconde main » avec une qualité donnée. Cependant, la limite principale de ce scénario est la détermination de la durée de vie résiduelle de ce produit de réemploi.

Une telle étude permet aussi à la société ARTEMISE d'obtenir des données et d'aider les cadres dirigeants de l'entreprise sur la prise de décision, concernant le financement d'un outil innovant de traitement de la fin de vie des déchets à LED. Elle permet aussi de lier ces gisements, flux et stocks avec des données économiques, afin d'évaluer les bénéfices et les emplois potentiellement générés, par chaque scénario de traitement en fin de vie des matériaux issus des déchets d'équipements à LED.

Une perspective de ce travail serait d'orienter cette ligne de traitement industrielle pour la valorisation d'autres typologies de DEEE à haute valeur ajoutée. Une autre perspective serait de lier cette étude AFM à un système SIG (Système d'Information Géographique), afin de localiser les points de collecte, traitement et recyclage de ces déchets. L'objectif étant de décrétement l'impact environnemental de la chaîne de valeur des produits d'éclairage à LED.

4.5. Conclusion

Ce chapitre a pour objectif d'étudier le potentiel de valorisation des flux de matières des dispositifs à LED. Dans un premier temps, nous avons analysé celui des matières plastiques, en déterminant la nature des matériaux des matrices polymères constituant les systèmes optiques, les corps et les culots, puis en identifiant les fractions dopées par le brome et celles qui en sont dépourvues, et enfin en déterminant les taux de brome dans ces dernières. Il est aussi proposé une solution de séparation des fractions non bromées de celles incorporées par le brome, pour être en conformité avec la législation et pouvoir recycler mécaniquement la matière dépourvue de brome. Dans un second temps, nous avons évalué celui des métaux précieux constituant ces équipements, pour confronter la rentabilité économique des composants électroniques à celle de l'ensemble des éléments constitutifs.

Aujourd'hui, nous constatons que l'ensemble des plastiques des équipements d'éclairage à LED est incinéré, ce qui constitue une charge pour l'entreprise ARTEMISE. Ce scénario n'est pas viable économiquement. Des études ont donc été menées sur des échantillons de lampes et de tubes à LED. Elles ont permis de comprendre que la nature du matériau composant les systèmes optiques est le PC et celle constituant les corps et les culots est le PBT. Par ailleurs, il a été déterminé que le TBBPA était le retardateur de flamme bromé, incorporé dans les matrices polymères des dispositifs à LED. Celui-ci est additivé seulement dans les matrices PBT, à une concentration moyenne de $7,98 \pm 0,02\%$, soit 79 800 ppm.

Pour éviter que le brome ne se propage dans les flux de recyclage, le seuil de tri réglementaire est fixé à 2000 ppm, imposé par la Directive européenne 2012/19/EU du 4 juillet 2012 relative aux DEEE. Un traitement de sublimation est proposé, afin de réduire la concentration en brome dans les matrices PBT, mais ce procédé est trop contraignant techniquement et réglementairement pour la société ARTEMISE. Ces fractions bromées seront donc traitées par des incinérateurs de produits dangereux. Cependant, nous avons confirmé la non dangerosité des systèmes optiques, qui sont dépourvus de brome. En conséquence, il est possible de promouvoir le recyclage durable des matrices plastiques PC et PBT non bromées, à l'aide du broyage conventionnel, de solutions de tri optique FTIR/FX et de tri densimétrique par flottaison. Les taux de recyclage sont ainsi majorés, entre 2013 et 2020, pour les lampes et les spots à LED de 74% à 83% et pour les tubes et les dalles à LED de 94% à 97%. Ce qui est favorable à la préservation des ressources naturelles, tout en améliorant la viabilité et la pérennité économiques de l'entreprise.

Le choix de l'intégration de la technologie des puissances pulsées dans une unité de traitement à l'échelle industrielle s'est révélé pertinent, pour déstructurer sélectivement les différents sous-ensembles, des produits LEDs en plastique (E27, B22 et E14). Cette technologie présente l'intérêt de préserver l'intégrité physique de certains composants électroniques et d'améliorer la valorisation des sous-produits, telle que l'étude AFM réalisée dans ce chapitre l'a illustré. En effet, de nombreuses puces à LED sont encore potentiellement fonctionnelles, à l'issue de la fragmentation sélective des déchets, ce qui appuie le scénario de leur réutilisation pour la fabrication de nouveaux luminaires.

Par ailleurs, la richesse de leur composition, par la présence des plateaux, des puces à LED et des drivers contenus dans une tonne de produits, est évaluée à **4373 €**. Alors que, la valeur de l'ensemble des matériaux et des composants est estimée à **4579 €**. La composition en métaux précieux, contenus dans les composants, permet d'atteindre un taux de recyclage estimé à **55,9%**. Les fractions massiques les plus importantes ne sont pas les plus rentables économiquement. Malgré leur petite fraction, les puces à LED sont les composants électroniques les plus avantageux par unité de masse. L'or s'avère être le matériau le plus intéressant, avec une fraction massique de **0,03%**, pour une valorisation à hauteur de **83,6%** de l'ensemble des composants. Des recherches sont en cours, pour valoriser leurs métaux précieux et terres rares stratégiques, afin de permettre l'industrialisation d'un procédé d'extraction des métaux, à une échelle industrielle.

Ce marché de valorisation est émergent et serait optimisé à partir de la seconde moitié de la décennie. Par conséquent, il est fortement conseillé à ARTEMISE de stocker l'ensemble des puces à LED et de spéculer sur les cours des matières premières secondaires, pour les vendre aux entreprises spécialisées au meilleur prix. Les résultats de ces recherches vont concourir, à moyen terme, au profit de l'entreprise. En somme, cette innovante brique technologique des puissances pulsées, combinée dans un procédé global, semble très concluante pour recycler les dispositifs d'éclairage à LED, afin d'atteindre le seuil réglementaire de 80%, imposé par l'éco-organisme ECOSYSTEM.

L'étude AFM présentée montre que l'intégration de la technologie des puissances pulsées améliore les taux de recyclage des déchets à LED. Une perspective de ce travail serait de réaliser une AFM dynamique permettant de paramétrer la composition des déchets des dispositifs LEDs, ainsi que d'estimer la chronologie des flux sur les prochaines années. Une telle étude, combinée avec une étude technico-économique, comme réalisée sur les métaux précieux, permettra d'évaluer la faisabilité de création d'emplois dans une démarche d'économie circulaire vertueuse.

Concernant les tubes à LED en aluminium, en plastique et en verre, leur valorisation est réalisée sur la ligne industrielle de la machine ECM, disponible chez ARTEMISE depuis 2012. Cet outil de traitement industriel permet une séparation des culots et une segmentation efficace des tubes en longueurs de 30 cm, 32 cm et 40 cm. Les culots sont scindés des tubes à 8 cm des extrémités, pour laisser une distance de sécurité et éviter de sectionner les drivers appariés dans ces derniers. La valorisation de ces produits est optimisée par le tronçonnage des tubes pour éviter que les rubans LEDs ne bloquent le système de broyage, au niveau de la vis sans fin. Les tronçons ainsi récupérés sont ensuite broyés. Après leur traitement, les fractions récupérées sont composées de métaux ferreux et non ferreux, de bandeaux LEDs, de drivers, de plastiques et de verre. Ces fractions sont triées respectivement par des dispositifs de tri existants : Overband, courants de Foucault, crible à doigts, flottaison et crible vibrant.

Références bibliographiques

- [1] Marianne Fleury, Arnaud Parenty, Thomas Etien, Magali Palluau et Charlotte Hugrel. Webinar de l'étude « RECYCLAGE CHIMIQUE DES PLASTIQUES - Application aux plastiques issus des DEEE » menée par les cabinets Bleu Safran, Lavoisier Circular Transition et Procetech pour ECOSYSTEM, 18 juin 2021
- [2] Flore Rebischung, Marianne Fleury et François David. Rapport INERIS-DRC-17- 164547-01461C « Tri et classement des plastiques des Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques », octobre 2017
- [3] Marc Mortureux. Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif aux analyses de retardateurs de flamme bromés (RFB) à mettre en œuvre dans le cadre des prochains plans de surveillance. Saisine n°2010-SA-0225, 14 septembre 2012
- [4] Cancer environnement, comprendre informer prévenir « <https://www.cancer-environnement.fr/499-Retardateurs-de-flamme.ce.aspx> », 23 juillet 2021
- [5] Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants (POP). Les 9 Nouveaux POP. 2010
- [6] G. Rychen, C. Ducoulombier-Crepineau, N. Grova, S. Jurjanz et C. Feidt. INRA « Modalité et risques de transfert des polluants organiques persistants vers le lait », décembre 2015
- [7] Xavier Lantoinette et Romain Lesage, « Tri et traitement des lampes LED », Appel à projet, RECYLUM, 4 décembre 2017
- [8] Organisation Mondiale de la Santé, « <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/> », Programme international sur la sécurité des substances chimiques, 23 juillet 2021
- [9] Règlement (CE) n°166/2006 du Parlement européen et du Conseil du 18 janvier 2006 concernant la création d'un registre européen des rejets et des transferts de polluants, et modifiant les directives 91/689/CEE et 96/61/CE du Conseil
- [10] FEDREC, La Fédération professionnelle des entreprises du recyclage, « Rappel des obligations relatives à la gestion des plastiques bromés », mars 2019
- [11] FEDREC, La Fédération professionnelle des entreprises du recyclage, « Gestion des plastiques bromés », mars 2019
- [12] NOR : DEVP1238608C. Circulaire du 30 novembre 2012 relative à la gestion des plastiques issus des Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques (DEEE)
- [13] Schlummer, M. Recycling of Postindustrial and Postconsumer Plastics Containing Flame Retardants. In Polymer Green Flame Retardants; Elsevier, 2014; pp 869-889. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53808-6.00025-1>
- [14] UNEP. Guidance on Best Available Techniques and Best Environmental Practices for the Recycling and Disposal of Wastes Containing Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) Listed under the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants, Stockholm Convention, 2017
- [15] Gundupalli, S. P.; Hait, S.; Thakur, A. A Review on Automated Sorting of Source-Separated Municipal Solid Waste for Recycling. Waste Manag. 2017, 60, 56-74. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.015>
- [16] CRITT. Techniques de Tri / Séparation Des Matières Plastiques : Avantages, Limitations et Nouveautés Technologiques, 2011
- [17] Delavelle, C. Etat de l'art des technologies d'identification et de tri des déchets ; ADEME, 2012 ; p 169

- [18] Turner, A. Black Plastics: Linear and Circular Economies, Hazardous Additives and Marine Pollution. *Environ. Int.* 2018, 117, 308-318. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.036>
- [19] Schlummer, M.; Mäurer, A. Recycling of Styrene Polymers from Shredded Screen Housings Containing Brominated Flame Retardants. *J. Appl. Polym. Sci.* 2006, 102 (2), 1262-1273. <https://doi.org/10.1002/app.24377>
- [20] Daniel Froëlich. Mesure des taux de brome par FX dans des échantillons de dispositifs à LED. Arts et Métiers ParisTech - Institut de Chambéry (ENSAM). Mars 2020
- [21] Layla Gripon, « Contribution au recyclage et à la valorisation des matières plastiques issues des déchets d'équipements électriques et électroniques contenant des retardateurs de flamme bromés ». Thèse de doctorat, soutenue le 15 décembre 2020 à l'Université de Lille
- [22] Kyle W. Strabala, « The Effects of Combined Compression and Aging on the Properties of Glassy Polycarbonate », University of Nebraska-Lincoln, 2009
- [23] Ting Wu, Hui Lian Hu, Yi Ping Du, Dong Jiang, Bo Hao Yu. Discrimination of Thermoplastic Polyesters by MALDI-TOF MS and Py-GC/MS. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 2014. <https://doi.org/10.1080/1023666X.2014.920126>
- [24] Layla Gripon, Imane Belyamani, Benoît Legros, Karine Seaudeau-Pirouley, Eric Lafranche, Laurent Cauret. Brominated flame retardants extraction from waste electrical and electronic equipment-derived ABS using supercritical carbon dioxide. *Waste Management* 131 (2021) 313-322. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.06.020>
- [25] PerkinElmer « www.perkinelmer.com », 31 juillet 2021
- [26] Ghilhem Simon. Spectroscopie vibrationnelles, Théorie, aspects pratiques et applications - Ouvrage collectif du Groupe Français de Spectroscopie Vibrationnelle - Editions des archives contemporaines (1 novembre 2020) - ISBN-10 : 2813002550 - ISBN-13 : 978-2813002556
- [27] Daniel Froëlich, Bardia Esmellou. Retardateur de flamme bromés et caractérisation des plastiques des dispositifs à LED en vue de leur tri. Arts et Métiers ParisTech - Institut de Chambéry (ENSAM). Avril 2020
- [28] Jin Guo, Xiao Li, Yuwen Guo, Jiuli Ruan, Qi Qiao, Jianqiang Zhang, Yinyin Bi, Fei Li. Research on Flotation Technique of separating PET from plastic packaging wastes. *Procedia Environmental Sciences* Volume 31, 2016, 178-184. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.024>
- [29] Keith Freegard, Gayle Tan, Roger Morton, Chris Coggins, Dion Froes, Mark Alger, Peter Cracknell, Andreas Maeurer, Phil Studds, Emily Freer and Jaco Huisman. Develop a process to separate brominated flame retardants from WEEE polymers. *Wrap. Creating markets for recycled resources*. 1st October 2004 - 31st May 2006. ISBN: 1-84405-315-6
- [30] Pilotto Cenci, M., Christ Dal Berto, F., Schneider, E-L., Veit, H-M., 2020. Assessment of LED lamps components and materials for a recycling perspective. *Waste Management* 107 (2020) 285-293. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.028>
- [31] Reuter, M.A., Ballester, M., Van Schaik, A., 2018. Limits of the circular economy: Fairphone modular design pushing the limits. *World of Metallurgy*. 71, 68-79
- [32] Isildar, A., Rene, E.R., Van Hullebusch, E.D., Lens, P.N., 2018. Electronic waste as a secondary source of critical metals: Management and recovery technologies. *Resour. Conserv. Recycl.* 135, 296-312. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.031>
- [33] Van Schaik, A., Reuter, M.A., 2016. Recycling indices visualizing the performance of the circular economy. *World of Metallurgy*. 69, 5-20
- [34] Murakami, H., Nishihama, S., Yoshizuka, K., 2015. Separation and recovery of gold from waste LED using ion exchange method. *Hydrometallurgy* 157, 194-198. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.08.014>

- [35] Magasine RECYCLAGE RECUPERATION - N°38 - 16 novembre 2020 - Les cours des matériaux recyclés
- [36] Kumar, A., Kuppusamy, V.K., Holuszko, M., Song, S., Loschiavo, A., 2019. LED lamps waste in Canada: Generation and characterization. *Resources, Conservation & Recycling*. 146, 329-336. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.04.006>
- [37] Chaire Mines Urbaines. « <http://mines-urbaines.eu/fr/la-recherche/missions-et-objectifs/metaux-strategiques/> », Métaux stratégiques : développement de nouvelles technologies à haute valeur ajoutée, 26 juillet 2021
- [38] Baldé, C.P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., Stegmann, P., 2017. The global e-waste monitor - 2017, United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA). Bonn/Geneva/Vienna. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2014.05.148>
- [39] Kumar, A., Holuszko, M., Espinosa, D.C.R., 2017. E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices. *Resour. Conserv. Recycl.* 122, 32-42. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.018>
- [40] CORNEC, industriel disposant d'un broyeur à marteau type BECKER 500 chevaux, spécialisé dans la valorisation des métaux ferreux et non ferreux et dans le recyclage des DEEE, 18 rue Jacquard 77400 Lagny-sur Marne (France). Tél : +33 (0)1 64 02 29 10
- [41] Thiago R. Martins, Eduardo H. Tanable, Daniel A. Bertuol, 2020. Innovative method for the recycling of end-of-life LED bulbs by mechanical processing. *Resources, Conservation & Recycling*. 161 104875. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104875>
- [42] Mizanur Rahman, S.M., Bertrand Laratte, Stéphane Pompidou, Thècle Alix, 2021. Waste LED lamp characterization: A call for more consistent and well-documented study. doi: 10.20944/preprints202107.0427.v1
- [43] Jean-Yves Saulquin et Guillaume Schier. Responsabilité sociale des entreprises et performance : complémentarité ou substituabilité ? *La Revue des Sciences de Gestion*, janvier-février 2007/1 (n°223), pages 57 à 65 - ISSN 1160-7742 - ISBN 9782916490076
- [44] Anne Peeters. La responsabilité sociale des entreprises, *Courrier hebdomadaire du Centre de Recherche et d'Information Socio-Politiques*, 2004/3 n°1828, pages 1 à 47 - ISSN 0008-9664
- [45] Vincent Clivillé, « Approche systémique et méthode multicritère pour la définition d'un système d'indicateurs de performance », Thèse de doctorat, soutenue le 9 septembre 2004 à l'université de Savoie, Spécialité Génie Industriel
- [46] Sébastien Sauvé, Daniel Normandin, Mélanie McDonald. *L'économie circulaire : une transition incontournable* - Institut de l'environnement, du développement durable et de l'économie circulaire (EDDEC) ISBN 978-2-7606-3675-0
- [47] Guilhem GRIMAUD, « Conception des scénarios de recyclage pilotée par l'évolution des performances des procédés ». Thèse de doctorat, soutenue le 18 février 2019 à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Spécialité Génie Industriel
- [48] Kathy Bru, Solène Touze, Pascal Auger, Svatopluk Dobrusky, Jérôme Tierrie, Daniel B. Parvaz. Investigation of lab and pilot scale electric-pulse fragmentation systems for the recycling of ultra-high performance fibre-reinforced concrete. *Minerals Engineering* 128 (2018) 187-194. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.08.040>
- [49] SELFRAG, La technologie de fragmentation électrodynamique « <http://www.selfrag.com/> », 04 août 2021
- [50] GRILLET, entreprise spécialisée dans les convoyeurs et basculeurs « <https://www.grilletsas.com/> », 05 août 2021

- [51] General Kinematics, Sécheur à tambour rotatif « <https://www.directindustry.fr/prod/general-kinematics/product-222617-2271450.html> », 05 août 2021
- [52] PELLENC ST, entreprise spécialisée dans le tri des déchets et recyclage des plastiques « <https://www.pellencst.com/fr/produits/> », 05 août 2021
- [53] UNTHA, entreprise spécialisée dans les technologies de déchiquetage « <https://www.untha.com/fr> », 05 août 2021
- [54] Umicore, acteur mondial de la technologie des matériaux par recyclage des cartes électroniques des DEEE « <https://www.umicore.fr/fr/> », 05 août 2021
- [55] Morphosis, leader de l'extraction et l'affinage des métaux rares et précieux issus principalement des équipements électriques et électroniques en Europe « <https://www.morphosis.fr/page/accueil.html> », 05 août 2021
- [56] Pilotto Cenci, M., Christ Dal Berto, F., Silva Silveira Camargo, P., Veit, H.-M., 2021. Separation and concentration of valuable and critical materials from wasted LEDs by physical processes. *Waste Management* 120 (2021) 136-145. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.11.023>
- [57] LED professional, 2016. LED Lamps Recycling Technology for a Circular Economy « <https://www.led-professional.com/resources-1/articles/led-lamps-recyclingtechnology-%20for-a-circular-economy> » 15 août 2021
- [58] Kumar A., Kuppusamy V. K., Holuszko M., 2018. Liberation in waste LED lamps using high pulse fragmentation, International Mineral Processing Council conference paper. September 15-21, 2018, Moscow, Russia
- [59] Lim, S.-R., Kang, D., Ogunseitan, O.A., Schoenung, J.M., 2011. Potential Environmental Impacts of Light-Emitting Diodes (LEDs): Metallic Resources, Toxicity, and Hazardous Waste Classification. *Environ. Sci. Technol.* 45, 320-327. <https://doi.org/10.1021/es101052>
- [60] Dzombak, R.; Padon, J.; Salsbury, J.; Dillon, H. Assessment of end-of-life design in solid-state lighting. *Environmental Research Letters*. 2017, 12, 084013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa7ab1>
- [61] Hendrickson, C., Matthews, D., Ashe, M., Jaramillo, P., 2010. Reducing environmental burdens of solid-state lighting through end-of-life design. *Environmental Research Letters* 5, 014016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/1/014016>
- [62] Zhan, L., Xia, F., Ye, Q., Xiang, X., Xie, B., 2015. Novel recycle technology for recovering rare metals (Ga, In) from waste light-emitting diodes. *Journal of Hazardous Materials* 299, 388-394. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.06.029>
- [63] Lang R., Zataari R., Blumenthal K., Wirthmann A., Magpantay E., Gray V., Teltscher S., Bourassa F., De Panizza A., Fondeur S., Fredriksson T., Korke D., Faye M., Kern M., Baldé K., Huisman J., Kuehr R., E-waste statistics Guidelines on classification, reporting and indicators 2015. United Nations University (UNU), Institute for the Advanced Study of Sustainability (IAS)
- [64] Le chiffre du commerce extérieur. Direction générale des douanes et des droits indirects « http://lekiosque.finances.gouv.fr/site_fr/NC8/Resultat_nc.asp?lanc=85395000 », nomenclature NC8 85395000 : lampes et tubes à diodes émettrices de lumière (DEL), 17 août 2021
- [65] D.B. Müller. Stock dynamics for forecasting material flows-case study for housing in The Netherlands. *Ecol. Econ.*, 59 (2006), pp. 142-156. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.09.025>
- [66] J.E. Tilton, J. Tilton. World metal demand: trends and prospects. *Resources for the Future* (1990) RFF Press. <https://doi.org/10.4324/9781315682082>
- [67] T. Choudhry. Real stock prices and the long-run money demand function: evidence from Canada and the USA. *J. Int. Money and Finance*, 15 (1996), pp. 1-17. [https://doi.org/10.1016/0261-5606\(95\)00041-0](https://doi.org/10.1016/0261-5606(95)00041-0)

- [68] J.H. Rademaker, R. Kleijn, Y. Yang. Recycling as a strategy against rare earth element criticality: a systemic evaluation of the potential yield of NdFeB magnet recycling. *Environ. Sci. Technol.*, 47 (2013), pp. 10129-10136. <https://doi.org/10.1021/es305007w>
- [69] S. Kytzia. Material flow analysis as a tool for sustainable management of the built environment. *The Real and Virtual Worlds of Spatial Planning*, Springer (2004), pp. 281-298. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-10398-2>
- [70] M. Bertram, S. Ramkumar, H. Rechberger, G. Rombach, C. Bayliss, K.J. Martchek, D.B. Müller, G. Liu. A regionally-linked, dynamic material flow modelling tool for rolled, extruded and cast aluminium products. *Resour. Conserv. Recycl.*, 125 (2017), pp. 48-69. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.05.014>
- [71] P. Agamuthu, P. Kasapo, N.A.M. Nordin. E-waste flow among selected institutions of higher learning using material flow analysis model. *Resour. Conserv. Recycl.*, 105 (2015), pp. 177-185. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.018>
- [72] M. Klinglmair, O. Zoboli, D. Laner, H. Rechberger, T.F. Astrup, C. Scheutz. The effect of data structure and model choices on MFA results: a comparison of phosphorus balances for Denmark and Austria. *Resour. Conserv. Recycl.*, 109 (2016), pp. 166-175. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.009>
- [73] L. Makarichi, K. Techato, W. Jutidamrongphan. Material flow analysis as a support tool for multi-criteria analysis in solid waste management decision-making. *Resour. Conserv. Recycl.*, 139 (2018), pp. 351-365. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.024>
- [74] P.H. Brunner, H. Rechberger. *Practical Handbook of Material Flow Analysis: for Environmental, Resource, and Waste Engineers*. CRC press (2016). <https://doi.org/10.1201/9781315313450>
- [75] N. Tazi, R. Idir, A. Ben Fraj. Towards achieving circularity in residential building materials: Potential stock, locks and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 281 (2021), 124489. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124489>
- [76] O. Cencic. Nonlinear data reconciliation in material flow analysis with software stan. *Sustainable Environment Research*, 26 (2016), pp. 291-298. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2016.06.002>

Conclusion générale

L'industrie de l'éclairage a subi une rupture technologique liée au progrès de la technologie des semi-conducteurs marqué par la baisse des volumes des systèmes traditionnels en faveur des systèmes à LED. La première émission de lumière par un semi-conducteur date de 1907. Conséquemment, la diode électroluminescente est née. Les LEDs sont des composants qui n'ont commencé à prendre leur place parmi les systèmes d'éclairage modernes et à des prix abordables, seulement depuis une dizaine d'années. La baisse inéluctable des volumes des dispositifs d'éclairage classiques, constituant actuellement le cœur de son activité et qui sont donc voués à disparaître, pousse l'entreprise ARTEMISE à s'intéresser à cette nouvelle technologie, afin d'anticiper ce nouveau marché. En mai 2016, elle a initié un projet de recherche et développement régional RECYLED, incluant ce projet doctoral en collaboration avec l'UTT.

Ce rapport de thèse présente une partie des travaux réalisés dans le cadre du projet qui à terme a pour ambition l'industrialisation d'un outil de production innovant, pour la valorisation des dispositifs d'éclairage à technologie LED en fin de cycle de vie. Ces dispositifs sont les lampes, spots, tubes et luminaires, qui constituent une nouvelle catégorie de DEEE. L'objectif était d'atteindre un taux de valorisation matière de 80%, pour respecter le seuil réglementaire imposé par les pouvoirs publics, représentés par l'éco-organisme ECOSYSTEM, dans le cadre de la Directive européenne 2012/19/EU du 4 juillet 2012 relative aux DEEE. Cette thèse CIFRE a participé aux avancées du projet, par une approche globale en considérant les aspects environnementaux, technologiques et économiques. Elle a permis l'identification de technologies efficaces de séparation de ces équipements, en différents sous-ensembles. Ce travail a consisté à développer des méthodes et des procédés de traitement en fonction des typologies de ces équipements, et ce, en vue d'une valorisation et d'une réutilisation de certains composants élémentaires. Plusieurs possibilités technologiques et scientifiques ont été établies, telles que la réutilisation de l'équipement dans sa totalité sans traitement préalable, la récupération du composant électronique à l'aide d'une technologie pertinente de séparation sélective du produit et le recyclage des matériaux constitutifs.

Contrairement aux autres projets de recherche actuels travaillant sur le sujet, dont l'objectif se limite uniquement à la valorisation matière, l'originalité du projet RECYLED repose sur la réutilisation des composants électroniques. Le succès de la mise en place de ce scénario, à plus forte valeur ajoutée que le recyclage seul, n'est envisageable que par le développement d'un procédé susceptible de conserver l'intégrité physique et fonctionnel des composants. Cette nouvelle activité, reposant sur le concept d'une économie circulaire, est génératrice d'emplois. Ce scénario devrait donc permettre d'une part de maintenir et d'autre part de développer l'activité au sein de la société ARTEMISE.

Dans le but d'optimiser l'outil de production de l'entreprise, une étude exhaustive du gisement potentiel français a d'abord été menée. Elle a permis de caractériser et de quantifier les sources d'éclairage LEDs à valoriser durant la décennie. Le périmètre de cette analyse concerne les déchets actuels, mais également les produits commercialisés qui arriveront dans le flux des déchets futurs, avec une durée de vie moyenne du gisement estimée à $4,5 \pm 1,7$ ans.

Aujourd'hui, les dispositifs à LED sont collectés par l'éco-organisme, puis triés et seulement stockés, en attendant de trouver des solutions de traitement viables pour les valoriser. Le gisement de ces équipements en fin de cycle de vie est en forte augmentation depuis 2016. Cette tendance va s'amplifier durant les années à venir, mais avec une prédominance des systèmes d'éclairage traditionnels jusqu'au milieu de la décennie, pour ensuite s'inverser en faveur des systèmes d'éclairage à LED, durant la seconde moitié de la décennie. La cartographie, du gisement caractérisé, est constituée de différents modèles qui sont les lampes E27, E14 et B22, ainsi que les spots GU10 et GU5.3. Les typologies majoritaires sont les lampes E27 (bulbe standard de diamètre 40 mm) et les spots GU10 en plastique, représentant respectivement 38% et 22% du gisement total. Ces données de caractérisation sont essentielles pour identifier les technologies de valorisation et donc orienter efficacement le choix des investissements de l'industriel.

Les développements des solutions finales de valorisation des équipements à LED, au sein de l'entreprise ARTEMISE, ont été considérés pour dimensionner et optimiser un outil de traitement

industriel, à partir des prévisions maximales estimées jusqu'en 2030. Ce travail de recherche et d'analyse a permis d'évaluer un gisement annuel maximal pour les lampes et spots à LED à 2600 tonnes et pour les tubes et dalles à LED à 1600 tonnes, correspondant à des débits respectifs de 650 kg/h et 400 kg/h. L'outil est orienté pour permettre à l'entreprise de maximiser son bilan économique, en améliorant son expertise sur la valorisation des fractions à haute valeur commerciale, tout en minimisant les pertes de matières, par la préservation de l'intégrité physique de certains composants électroniques. Les métaux précieux et stratégiques, contenus dans ces derniers, attirent les convoitises de nombreux chercheurs et industriels. Ils constituent un gisement complexe, dispersé et hétérogène, dont la qualité et la quantité évoluent au rythme des avancées technologiques et des contraintes géopolitiques mondiales.

Les études de déconstruction, qui ont été menées, ont montré le potentiel de la technologie des puissances pulsées, pour traiter la fin de vie des lampes et des spots à LED, par une séparation sélective de ces produits en différents sous-ensembles. Elles ont permis la récupération des matériaux constitutifs et des composants électroniques, tout en préservant l'intégrité physique de ces derniers. La limite de cette technologie concerne la valorisation des tubes à LED. En effet, à la suite du traitement les rubans de puces à LED ne sont pas dissociés de leur support en aluminium. Une opération supplémentaire de découpe mécanique permettrait leur désolidarisation. Il a donc été retenu d'orienter la valorisation des tubes à LED avec un outil industriel purement mécanique et automatisé, disponible chez ARTEMISE, en apportant des modifications à celui-ci. Subséquemment, différentes cadences ont été expérimentées en fonction de la typologie des tubes. Les débits de traitement annuels peuvent atteindre plus de 4000 tonnes, notamment pour la catégorie des tubes en aluminium.

Concernant les lampes et les spots, nous avons orienté les expérimentations en fonction des résultats obtenus lors de l'analyse du gisement. En l'occurrence, ce sont les systèmes prédominants, de types E27 et GU10, qui ont été étudiées. L'objectif a été de comprendre puis d'établir des briques technologiques de séparation sélective de ces dispositifs d'éclairage en fonction de leur structuration mécanique d'assemblage, pour tendre vers le seuil réglementaire de 80% imposé. Des couples de tension-nombre de décharges électriques ont été appliqués, pour ces deux catégories d'équipements, afin de révéler des déconstructions favorables et leur reproductibilité. Des énergies spécifiques moyennes de fragmentation sélective « optimisée » sont estimées en laboratoire pour les typologies E27 et GU10. Elles s'élèvent respectivement à hauteur de $5,2 \pm 0,6$ kWh/t et $13,9 \pm 2,5$ kWh/t, correspondant à des libérations globales moyennes de 64% et 91%. Ces résultats sont corrélés avec la préservation de l'état de certains composants électroniques. Pour la lampe E27, 80% des plateaux à LED et 65% des drivers sont en très bon et bon état. Pour le spot GU10 les valeurs sont estimées respectivement à 70% et 84%.

En outre, les essais réalisés avec le réacteur pré-industriel en flux continu et circuit fermé, proposé par la société allemande IMPULSTEC, sont probants et confirment que la technologie des puissances pulsées est bien adaptée pour le traitement industriel en fin de vie des dispositifs à LED en plastique et métalliques : E27, B22, E14, GU10 et GU5.3. Ces équipements représentent plus de 80% du gisement et sont déconstruits sélectivement en cinq sous-ensembles. L'intégrité physique et fonctionnelle de certains composants électroniques est par ailleurs préservée. Pour obtenir une fragmentation optimale de ces dispositifs à LED, sans la typologie verre, 600 décharges électriques sont nécessaires sur la totalité des électrodes avec 600 J par décharge, à une fréquence de 1 Hz. L'énergie spécifique correspondant à cette valorisation pré-industrielle est donc estimée à 50 kWh/t. En comparant cette valeur, à celle du broyeur disponible aujourd'hui chez ARTEMISE, évaluée à 152 kWh/t, nous apprécions un gain énergétique potentiel de 67%.

Ces résultats montrent la pertinence et la capacité de cette technologie pour une future ligne de traitement, à une échelle industrielle au sein de l'usine ARTEMISE. La technologie des puissances pulsées, ainsi expérimentée, devra nécessairement être associée à d'autres dispositifs de traitement. L'ensemble de ces techniques constitue une solution technologique globale de valorisation des dispositifs d'éclairage à technologie LED.

A l'issue de la fragmentation sélective, l'état des éléments constitutifs récupérés peut favoriser leur valorisation dans le cadre des scénarii de recyclage et/ou de réutilisation. Notons la particularité des matrices plastiques qui sont incinérées, à hauteur de 540 € la tonne. Cette incinération spéciale en tant que déchets dangereux, sans possibilité de récupération d'énergie, est rendue obligatoire par les pouvoirs publics, en cas de concentration en brome supérieure à 2000 ppm. Ce traitement spécifique constitue une charge pour la société, impliquant un bilan économique non rentable. L'étude des plastiques a permis de conclure que les systèmes optiques en PC sont dépourvus de brome et que seuls les corps et les culots en PBT sont bromés, par le retardateur de flamme bromé TBBPA, à une concentration moyenne en brome de 47 100 ppm ($4,71 \pm 0,02\%$). Aussi, la combinaison des étapes de broyage mécanique et de tri par flottaison des matrices bromées permettrait de récupérer les fractions non bromées des corps et des culots. Ipso facto, il devient possible de promouvoir le recyclage durable des matrices plastiques exemptées de brome et d'améliorer les taux de valorisation matière. Les taux de recyclage sont ainsi optimisés, entre les technologies 2013 et 2020, pour les lampes et les spots à LED de 74% à 83% et pour les tubes et les dalles à LED de 94% à 97%. Ce qui permet la préservation des ressources naturelles, d'éviter la destruction et le gaspillage de la matière, par la réintroduction de ces plastiques pour la fabrication d'autres produits industriels.

La fraction fonctionnelle des équipements à LED en fin de vie est estimée à 38%. Ces produits peuvent être commercialisés et remis dans le circuit de consommation sans aucun traitement préalable. Ce scénario de réutilisation permet un allongement de leur durée d'utilisation et donc une diminution de leurs empreintes écologiques. L'analyse des flux de matières des typologies plastiques, représentant 55% du gisement, montre la capacité de la technologie des puissances pulsées dans le processus global de recyclage, à une échelle industrielle. Elle permet de récupérer et de préserver les matériaux et les composants électroniques, ce qui favorise l'extraction des terres rares, des métaux précieux et stratégiques constituant ces derniers.

De nombreuses puces à LED sont par ailleurs fonctionnelles à l'issue du traitement de séparation sélective des équipements. Ce qui rend possible le scénario de réutilisation pour la fabrication de nouveaux luminaires et/ou leur réparation. ARTEMISE pourra maximiser leur valeur commerciale et les vendre au meilleur prix, pour optimiser son bilan économique. Les acteurs du recyclage peuvent ainsi améliorer l'extraction en métaux précieux et en terres rares les constituant. Dans cette mesure, le traitement par les puissances pulsées minimise les pertes de matières, surtout celles des composants électroniques. Le taux de recyclage des métaux précieux contenus dans les puces à LED, leur plateau et les drivers est estimé à 55,9%. La richesse de leur composition, contenue dans une tonne de produits en plastique, est évaluée à plus de 4000 €. Enfin, les fractions massiques les plus importantes ne sont pas les plus rentables économiquement. Malgré leur petite fraction, les puces à LED sont les composants électroniques les plus avantageux par unité de masse. L'or s'avère être le matériau le plus intéressant, avec une fraction massique de 0,03%, pour une valorisation économique à hauteur de 83,6% de l'ensemble des composants électroniques.

Cette thèse CIFRE, associée au projet RECYLED, s'intègre dans une démarche de développement soutenable, en préservant les ressources non renouvelables. Ce travail a permis d'étudier la valorisation de la fin du cycle de vie des dispositifs d'éclairage à technologie LED, tout en optimisant le modèle économique de la société ARTEMISE.

In fine, les solutions technologiques proposées dans ce travail de thèse, émergentes d'une économie circulaire, visent à décrétement la consommation des ressources naturelles et la production de déchets, en développant l'économie de fonctionnalité, le réemploi, la réparabilité et la valorisation matière de ces nouveaux équipements électriques et électroniques. La conception de cette économie de demain repose indéniablement sur un bouclage des flux de matières et d'énergie. Le succès du développement d'une telle économie suppose à la fois l'introduction de nouvelles technologies innovantes, de nouvelles formes d'organisation, une responsabilisation des fabricants des systèmes d'éclairage, l'acceptation de nouveaux modes de vie sociétaux, mais également de nouvelles logiques de création de valeur et de richesse.

Perspectives

L'un des objectifs de la thèse était d'identifier des technologies efficaces de désassemblage des équipements à LED, en fonction des typologies, en vue d'une valorisation et d'une réutilisation des composants électroniques. Les premiers résultats expérimentaux obtenus par la déconstruction sélective des sous-ensembles, à partir des typologies plastiques et métalliques, sont très concluants pour la mise en place d'un futur outil de production à une échelle industrielle, au sein de l'entreprise ARTEMISE. D'autant plus que ces résultats peuvent s'appliquer à plus de 80% du gisement actuel.

La technologie des puissances pulsées identifiée, présentée et expérimentée dans le chapitre 3, reposant sur la fragmentation sélective électrohydraulique (EHF) et électrodynamique (EDF), devra obligatoirement être combinée à d'autres technologies de traitement, tels que le broyage mécanique et le tri sélectif. L'ensemble des technologies identifiées constitue une solution technique globale de valorisation des produits d'éclairage à LED, potentiellement applicable à d'autres types de DEEE à haute valeur ajoutée, à l'instar des smartphones, télécommandes, etc.

Pour permettre une telle industrialisation, il serait judicieux d'envisager de futures études, de modélisation et de simulation numérique du réacteur de puissances pulsées. En effet, les études menées expérimentalement ont permis la variation de grandeurs physiques du réacteur, qui sont la tension, le nombre de décharges électriques, la fréquence, etc. Le réacteur constituera le cœur de la ligne industrielle, auquel seront associées des installations périphériques, qui devront nécessairement être dimensionnées pour s'adapter à ses cadences de traitement.

Pour optimiser le démantèlement des dispositifs, l'étude d'autres paramètres est essentielle, tels que les dimensions du réacteur (avec un système qui maintient en immersion les lampes), la disposition, la nature, la forme et le nombre d'électrodes, etc. Ainsi, nous proposons d'étudier, par l'utilisation d'un logiciel de simulation numérique, tel que COMSOL Multiphysics® :

- Le champ électrostatique entre les électrodes, avec le module AC/DC ;
- La probabilité de création d'un arc électrique associée au module Plasma, en fonction de la température, la dilatation thermique et la pression ;
- La modélisation de l'onde de choc, avec le module CFD ;
- La propagation de l'onde de pression générée dans le réacteur, avec le module Acoustics ;
- Les contraintes induites dans les dispositifs à LED, avec le module Structural Mechanics.

La méthodologie de ces travaux de simulation nécessite la réalisation d'un modèle au juste suffisant (pièces, matériaux, géométries, conditions initiales, conditions limites et frontières). Puis, les hypothèses du système seront posées (forces et contraintes appliquées). La cohérence du système établi sera vérifiée (grandeurs physiques, unités, formules, etc.). Des simulations de convergence en maillage seront lancées, afin de comprendre les résultats de traitement et d'améliorer le modèle si besoin par des itérations. En somme, le modèle sera vérifié par des expériences en laboratoire, en collaboration avec les fabricants des réacteurs de puissances pulsées.

Le développement des futures lampes à LED, dans une démarche d'éco-conception, devrait répondre à la prise de conscience environnementale, ce qui faciliterait leur désassemblage par la technologie des puissances pulsées. Des études systémiques pourraient être menées sur ces nouveaux produits, à base d'oxydes biodégradables à l'instar du ZnO, pour apprécier non seulement le gain énergétique potentiel mais aussi l'état des constituants après le traitement de fragmentation sélective. Ce matériau semi-conducteur est plus abondant que le GaN et l'émission de ses défauts cristallins dans le visible en font un potentiel candidat pour se passer de l'utilisation des terres rares dans les puces LEDs. Des travaux sur ce nouveau matériau font l'objet de recherche au L2n (Nomenyo PhD 2014, Chevalier Postdoc 2018 et Zhu PhD 2019).

Par ailleurs, concernant le scénario de réutilisation des puces à LED et dans la continuité de ces travaux de recherche, à l'issue de la séparation sélective des sous-produits des dispositifs, nous avons montré que la technologie des puissances pulsées préserve l'intégrité physique de certaines

configurations de puces. Ce traitement favorise leur fonctionnement et donc leur potentielle de réutilisation. Notamment, des puces verticales sur lesquelles le contact électrique est assuré par un fil en or « wire bonding » très fragile, de diamètre 10 μm . Ces points sont incontestablement essentiels. Cependant, il serait désormais judicieux d'évaluer la durée de vie résiduelle des puces sur leur support, pour un profil de mission donnée, afin de garantir une durée de fonctionnement. Ceci permettrait de les vendre aux fabricants des systèmes d'éclairage pour la réparation et/ou la production de nouveaux produits.

Le travail scientifique consistera à mettre en place un modèle analytique représentant le phénomène opto-thermique, qui prévoit l'évolution du flux lumineux émis en fonction de la température. Au regard des critères des industriels, ces puces de « seconde main » pourront servir à équiper des produits d'éclairage techniques avec un profil de mission sévère et une durée de vie longue (cuisine, salle de bains, bureau, etc.), ou seulement pour un usage ornemental avec une durée de vie relativement faible et une utilisation occasionnelle (lumière d'ambiance, décoration de Noël, etc.).

Aujourd'hui, les technologies des lampes et des tubes sont arrivées à maturité, mais de nouveaux dispositifs, telles que les dalles n'ont pas encore atteint la leur et ont besoin d'être optimisées. En effet, nous observons la présence d'une mousse siliconée englobant leur driver, mais celle-ci devrait tendre à disparaître dans les années à venir. Des caractérisations devront continuer à être réalisées annuellement, afin de suivre et de comprendre l'évolution du gisement liée aux besoins des utilisateurs, en termes de puissance lumineuse, de températures de couleur ou d'esthétique, etc. Ces études permettront donc à l'entreprise d'ajuster les bilans matériaux et composants effectués dans cette thèse, afin d'adapter et d'améliorer son modèle économique, notamment pour la seconde moitié de la décennie. Aussi, les tubes à LED étant voués à disparaître, la machine ECM adaptée pour la valorisation de cette catégorie de gisement à LED ne serait donc plus utilisée. Par conséquent, une nouvelle adaptation de cet outil de traitement industriel pourrait être envisagée pour traiter les futurs déchets de dalles à LED en fin de vie.

En outre, cette nouvelle typologie d'équipements à LED est plutôt destinée à un usage professionnel. Si bien que, leur durée d'utilisation pourrait être réduite par les campagnes de « relamping LED » des industriels, alors que les produits seraient encore potentiellement fonctionnels. D'autant plus que le choix et la maîtrise des matériaux semi-conducteurs ne pourraient qu'optimiser et allonger leur durée de vie. Subséquemment, le développement du scénario de réutilisation pourrait être considéré dans les perspectives de cette thèse, pour permettre la création d'une nouvelle activité liée à la réutilisation du produit à LED. Cette activité d'économie circulaire pourrait être génératrice d'emplois, dans la région Grand EST. La commercialisation de ces produits de « seconde main » serait à des prix abordables pour les consommateurs. Aussi, les aspects juridiques devront être pris en compte pour la création d'une future filiale de l'entreprise ARTEMISE.

La mise en place d'une unité de dé-bromage par le procédé de sublimation, à la suite du broyage conventionnel et du tri par flottaison des plastiques des corps et des culots issus des lampes, afin de capter le brome sous forme vapeur, pourrait constituer une piste de recherche intéressante à approfondir. Cette perspective devra prendre en compte les contraintes techniques et réglementaires des autorités françaises ainsi que celles liées à la capacité financière de l'entreprise ARTEMISE. Elle permettrait à la société d'optimiser le potentiel de valorisation matière et énergétique des systèmes à LED.

Ce travail de thèse CIFRE, par une approche globale, a introduit une méthodologie de valorisation des dispositifs d'éclairage à LED. Les perspectives énoncées s'inscrivent dans la continuité des travaux menés dans le cadre du projet RECYLED. Elles s'orientent vers des sujets de recherche à la fois plus fondamentaux et à visées industrielles, qui permettront de compléter l'exhaustivité du travail accompli par l'UTT et la société ARTEMISE depuis 6 ans, date de début du projet RECYLED. Ces sujets serviront à l'entreprise pour améliorer son expertise sur une activité à plus forte valeur ajoutée.

Sommaire des annexes

ANNEXE 1 : Etude du gisement ARTEMISE	253
ANNEXE 2 : Cartographie du gisement ARTEMISE	261
ANNEXE 3 : Composition moyenne des tubes à LED en 2013	262
ANNEXE 4 : Composition moyenne des lampes à LED en 2020	264
ANNEXE 5 : Composition moyenne des dalles à LED en 2020	267
ANNEXE 6 : Convention de Stockholm	268
ANNEXE 7 : Outil ECM de traitement des tubes à LED	269

Annexe 1

Etude du gisement ARTEMISE

Septembre 2019 :

Typologie	Masse (kg)	Pourcentage (%)
E14	17	4,8
E27 petits verre	126,5	35,4
E27 petits plastique	91	25,5
E27 gros plastique	34,5	9,7
B22	3,5	1,0
GU10	59,5	16,7
GU5.3	16	4,5
Divers	9	2,5
Masse totale (kg)	357	100

Tableau 1 : Bilan massique d'un big-bag (septembre 2019)

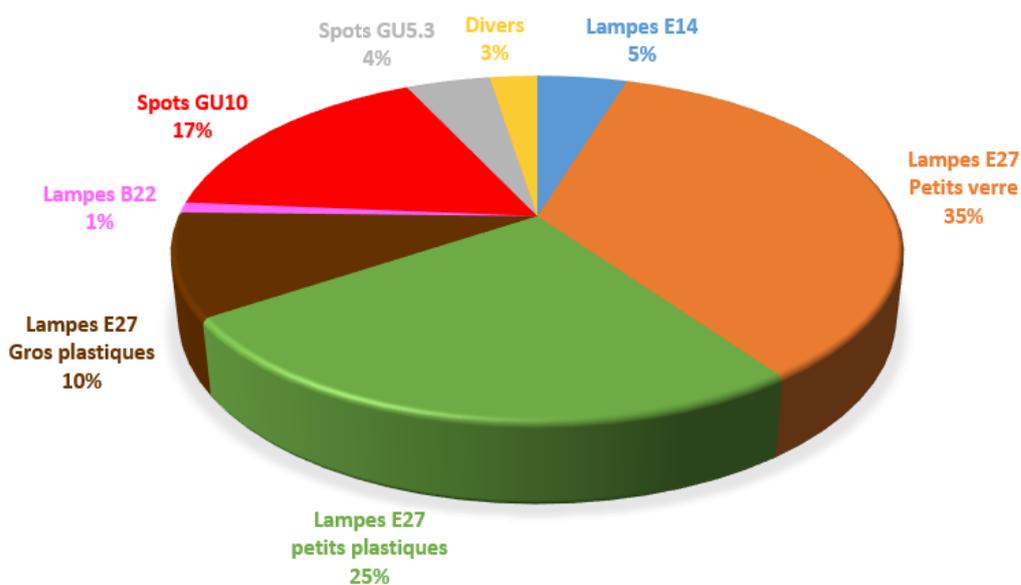


Figure 1 : Répartition du gisement de lampes et de spots à LED 357 kg (septembre 2019)

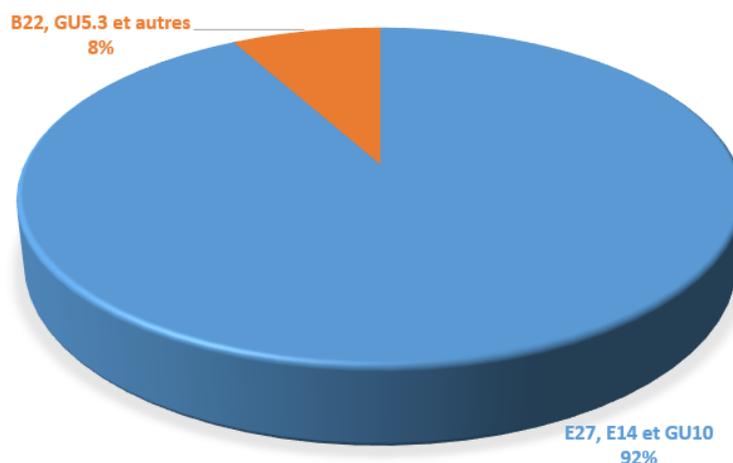


Figure 2 : Répartition du gisement des typologies E27-E14-GU10 et B22-GU5.3 (septembre 2019)

Octobre 2019 :

Typologie	Masse (kg)	Pourcentage (%)
E14	8	2,8
E27 petits verre	31	11,0
E27 petits plastique	147,5	52,1
E27 gros plastique	28,5	10,1
B22	9,5	3,4
GU10	45	15,9
GU5.3	5,5	1,9
Divers	8	2,8
Masse totale (kg)	283	100

Tableau 2 : Bilan massique d'un big-bag (octobre 2019)

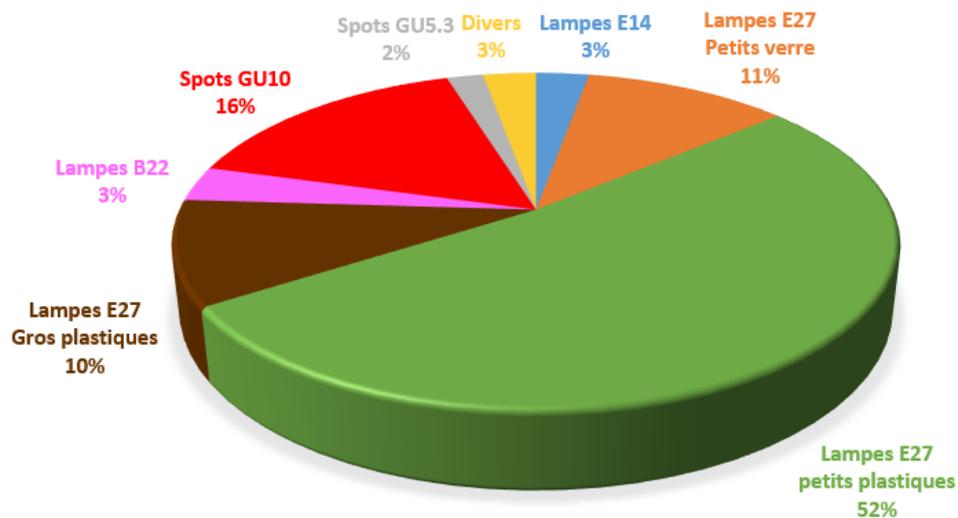


Figure 3 : Répartition du gisement de lampes et de spots à LED 283 kg (octobre 2019)

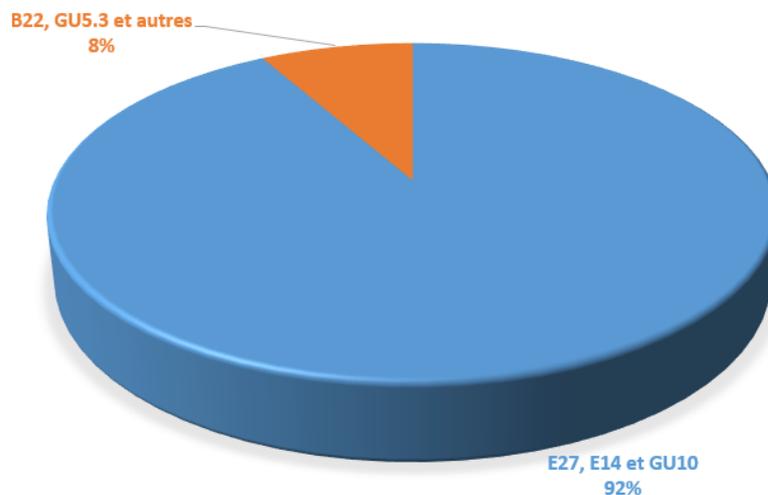


Figure 4 : Répartition du gisement des typologies E27-E14-GU10 et B22-GU5.3 (octobre 2019)

Novembre 2019 :

Typologie	Masse (kg)	Pourcentage (%)
E14	8,5	2,5
E27 petits verre	47	13,7
E27 petits plastique	129,5	37,8
E27 gros plastique	21,5	6,3
B22	11	3,2
GU10	100	29,2
GU5.3	11,5	3,4
Divers	14	4,1
Masse totale (kg)	343	100

Tableau 3 : Bilan massique d'un big-bag (novembre 2019)

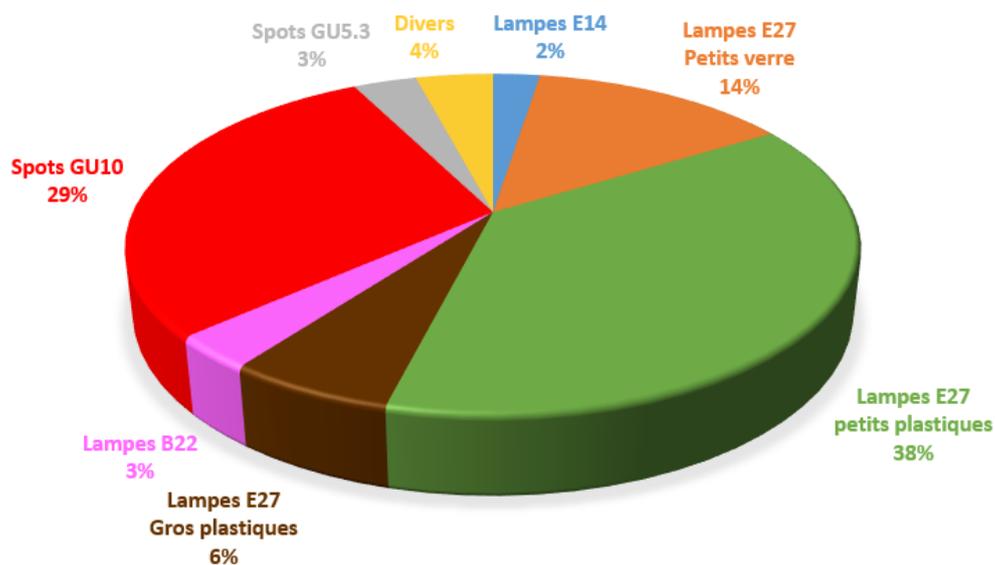


Figure 5 : Répartition du gisement de lampes et de spots à LED 343 kg (novembre 2019)

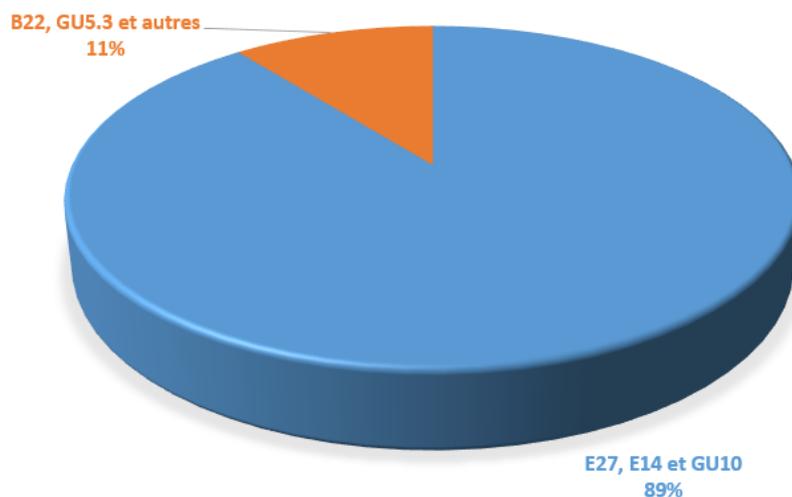


Figure 6 : Répartition du gisement des typologies E27-E14-GU10 et B22-GU5.3 (novembre 2019)

Décembre 2019 :

Typologie	Masse (kg)	Pourcentage (%)
E14	13,5	4,1
E27 petits verre	23	7,0
E27 petits plastique	157	47,6
E27 gros plastique	20	6,1
B22	10,5	3,2
GU10	85	25,8
GU5.3	10,5	3,2
Divers	10,5	3,2
Masse totale (kg)	330	100

Tableau 4 : Bilan massique d'un big-bag (décembre 2019)

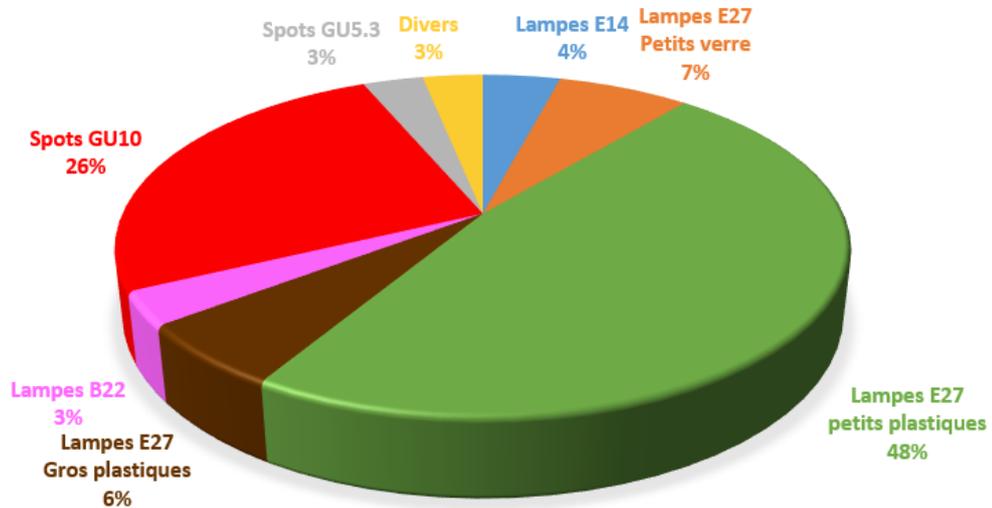


Figure 7 : Répartition du gisement de lampes et de spots à LED 330 kg (décembre 2019)

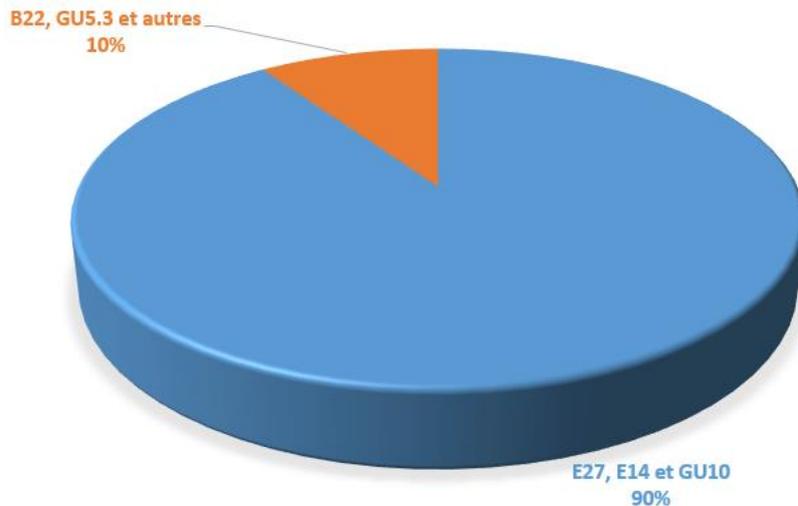


Figure 8 : Répartition du gisement des typologies E27-E14-GU10 et B22-GU5.3 (décembre 2019)

Mars 2020 :

Typologie	Masse (kg)	Pourcentage (%)
E14	12,5	3,7
E27 petits verre	51,5	15,3
E27 petits plastique	113,5	33,7
E27 gros plastique	48	14,3
B22	9,5	2,8
GU10	69,5	20,7
GU5.3	8	2,4
Divers	24	7,1
Masse totale (kg)	337	100

Tableau 5 : Bilan massique d'un big-bag (mars 2020)

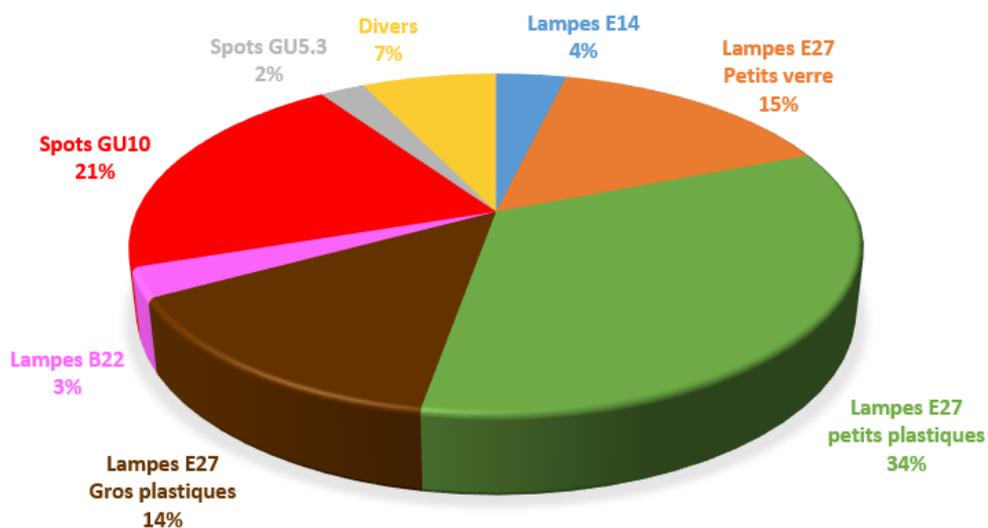


Figure 9 : Répartition du gisement de lampes et de spots à LED 337 kg (mars 2020)

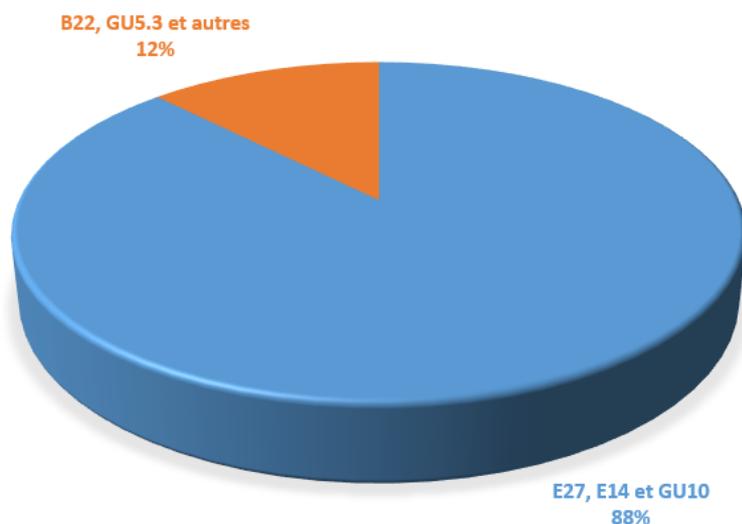


Figure 10 : Répartition du gisement des typologies E27-E14-GU10 et B22-GU5.3 (mars 2020)

Juin 2020 :

Typologie	Masse (kg)	Pourcentage (%)
E14	24	6,6
E27 petits verre	50	13,8
E27 petits plastique	123	33,8
E27 gros plastique	43	11,8
B22	17	4,7
GU10	83	22,8
GU5.3	8,5	2,3
Divers	15	4,1
Masse totale (kg)	364	100

Tableau 6 : Bilan massique d'un big-bag (juin 2020)

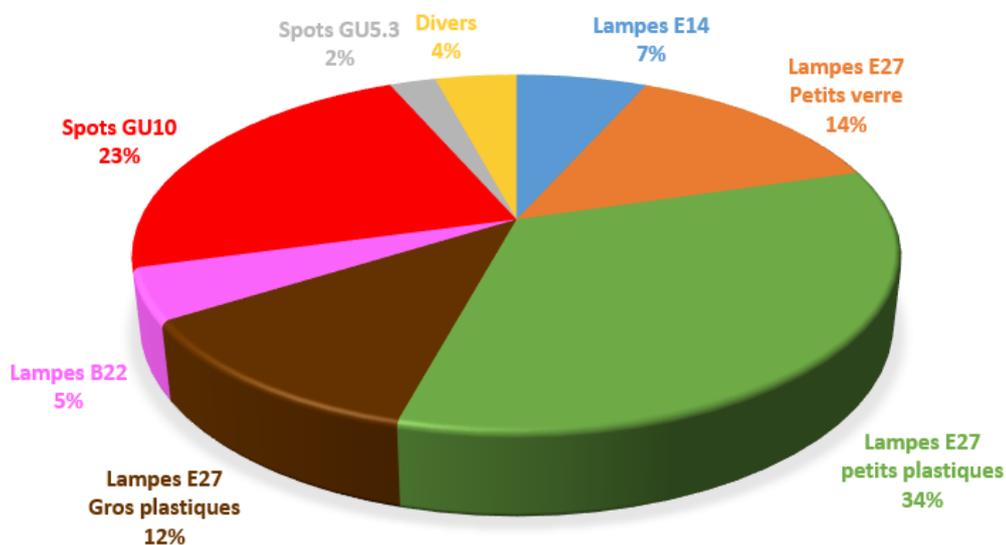


Figure 11 : Répartition du gisement de lampes et de spots à LED 364 kg (juin 2020)

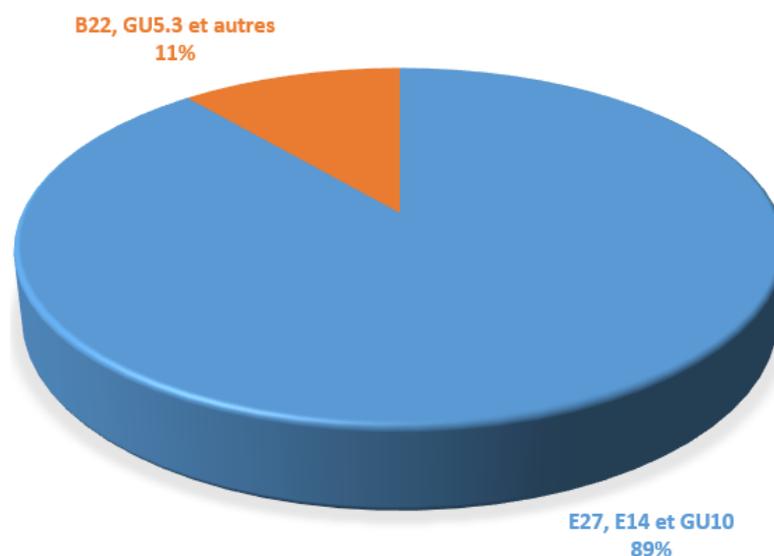


Figure 12 : Répartition du gisement des typologies E27-E14-GU10 et B22-GU5.3 (juin 2020)

Mars 2021 :

Typologie	Masse (kg)	Pourcentage (%)
E14	22	8,6
E27 petits verre	20,5	8,0
E27 petits plastique	106,5	41,7
E27 gros plastique	23,5	9,2
B22	13,5	5,3
GU10	52	20,4
GU5.3	11	4,3
Divers	6,5	2,5
Masse totale (kg)	256	100

Tableau 7 : Bilan massique d'un big-bag (mars 2021)

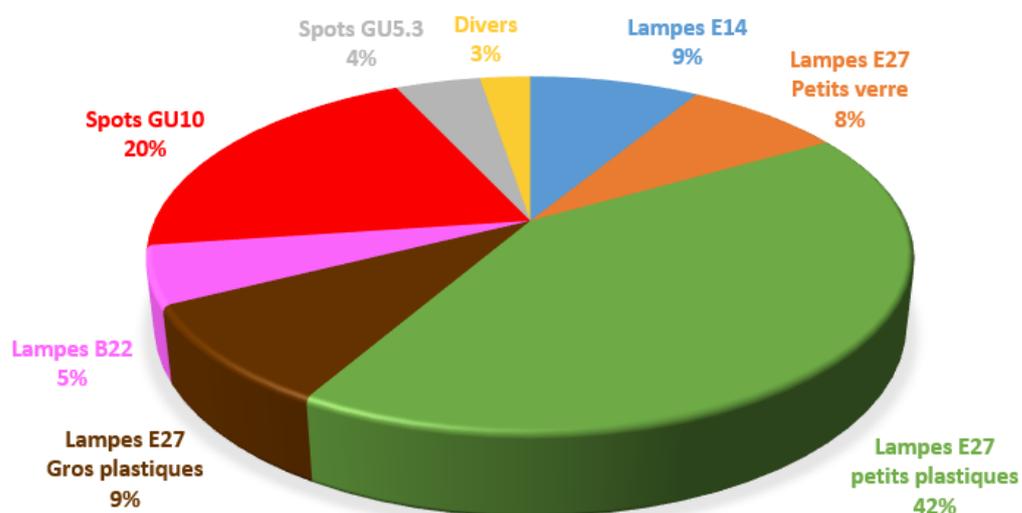


Figure 13 : Répartition du gisement de lampes et de spots à LED 256 kg (mars 2021)

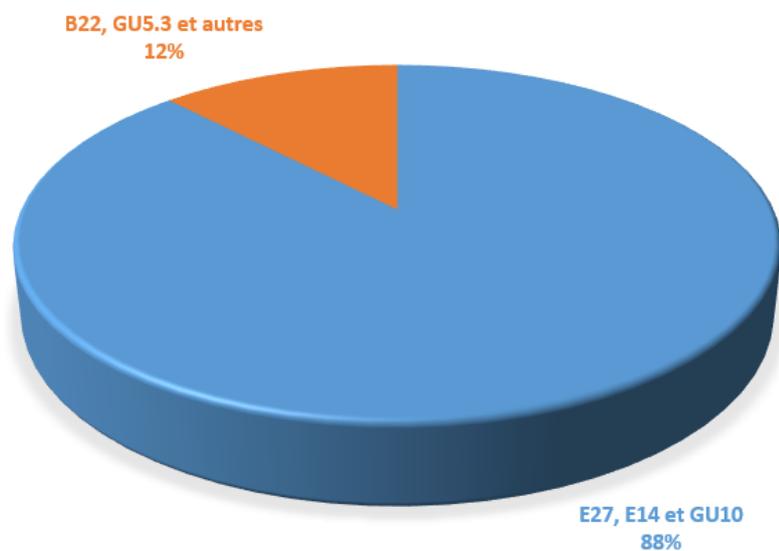


Figure 14 : Répartition du gisement des typologies E27-E14-GU10 et B22-GU5.3 (mars 2021)

Juin 2021 :

Typologie	Masse (kg)	Pourcentage (%)
E14	14,5	4,1
E27 petits verre	57	16,3
E27 petits plastique	132,5	37,8
E27 gros plastique	34	9,7
B22	10,5	3,0
GU10	77	22,0
GU5.3	10,5	3,0
Divers	14	4,0
Masse totale (kg)	350	100

Tableau 8 : Bilan massique d'un big-bag (juin 2021)

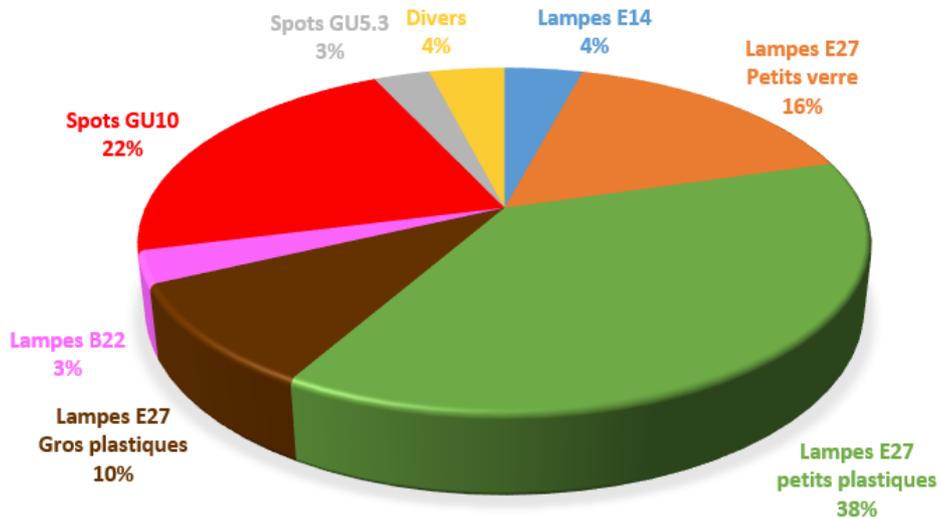


Figure 15 : Répartition du gisement de lampes et de spots à LED 350 kg (juin 2021)

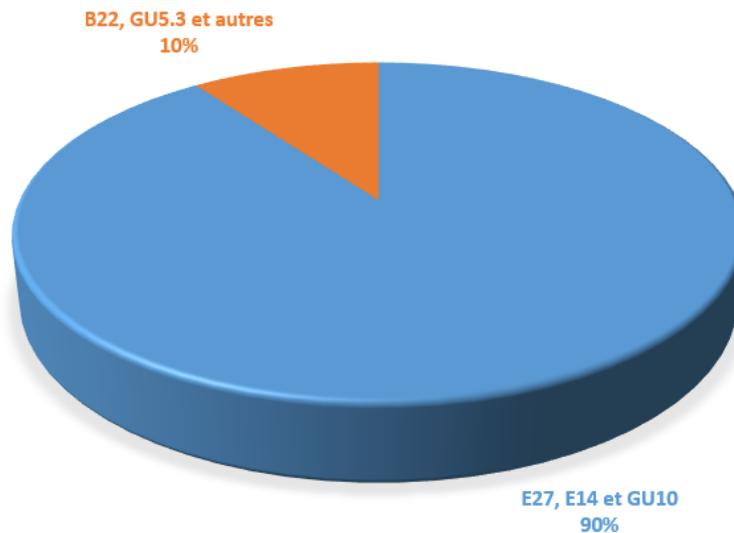


Figure 16 : Répartition du gisement des typologies E27-E14-GU10 et B22-GU5.3 (juin 2021)

Annexe 2

Cartographie du gisement ARTEMISE

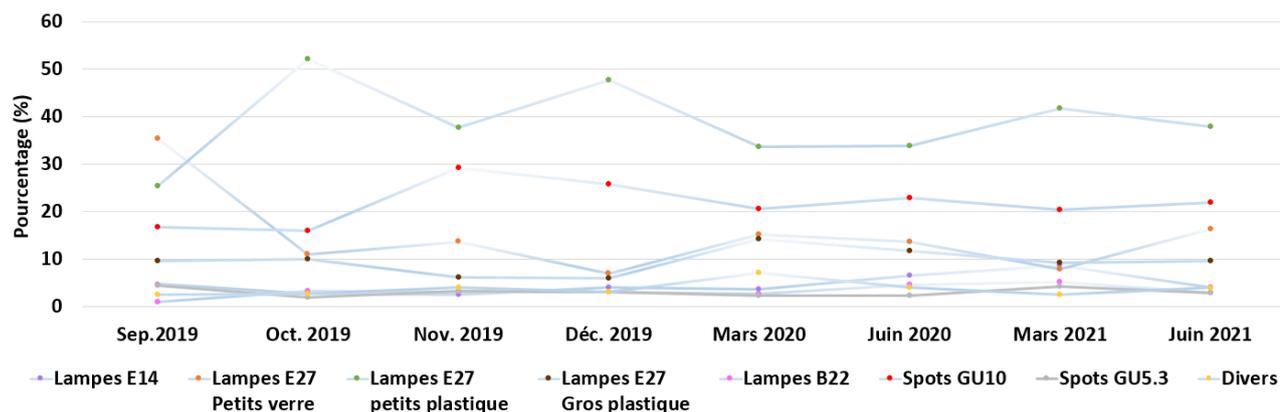


Figure 1 : Proportion de 8 big-bags, triés entre septembre 2019 et juin 2021

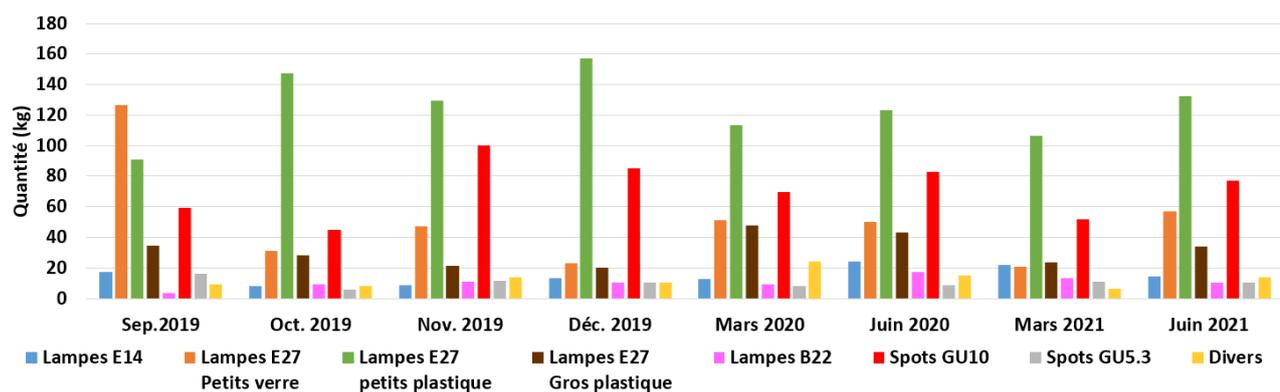


Figure 2 : Représentation massique de 8 big-bags, triés entre septembre 2019 et juin 2021

Annexe 3

Composition moyenne des tubes à LED en 2013

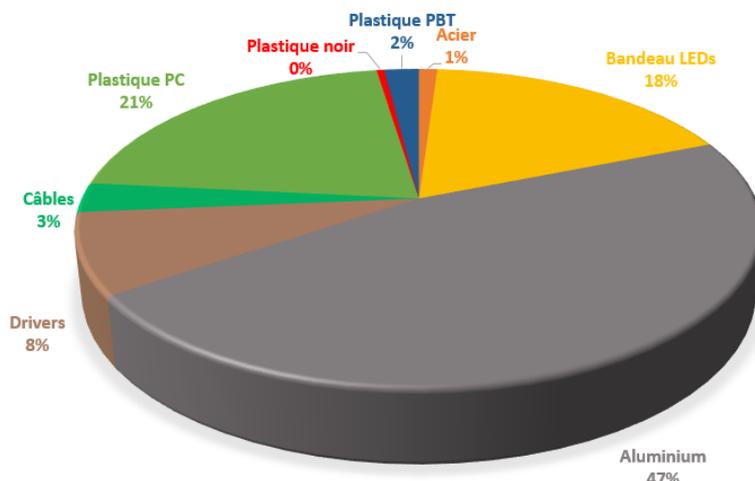


Figure 1 : Composition moyenne d'un tube à LED en aluminium 150 cm (déchets 2019)

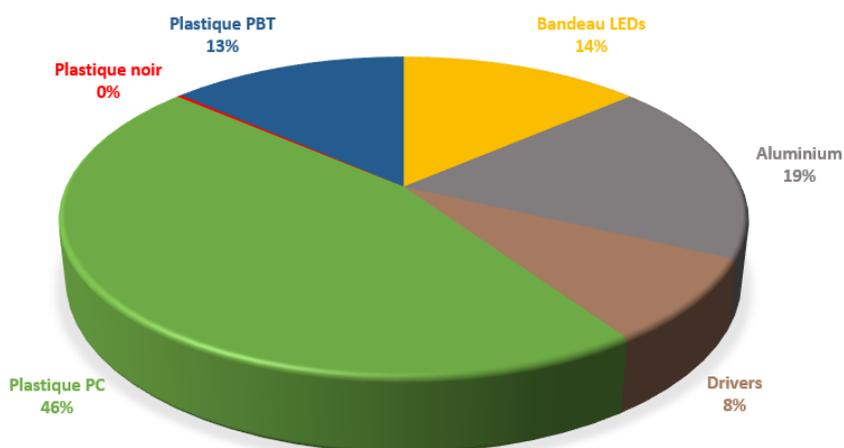


Figure 2 : Composition moyenne d'un tube à LED en plastique 120 cm et 150 cm (déchets 2019)

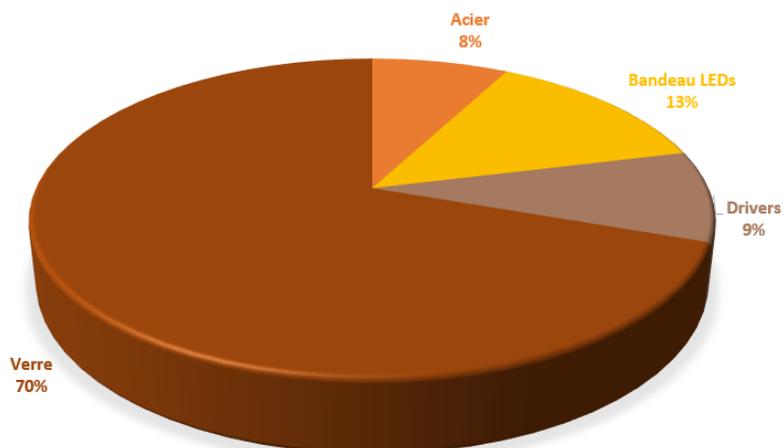


Figure 3 : Composition moyenne d'un tube à LED en verre 150 cm (déchets 2019)

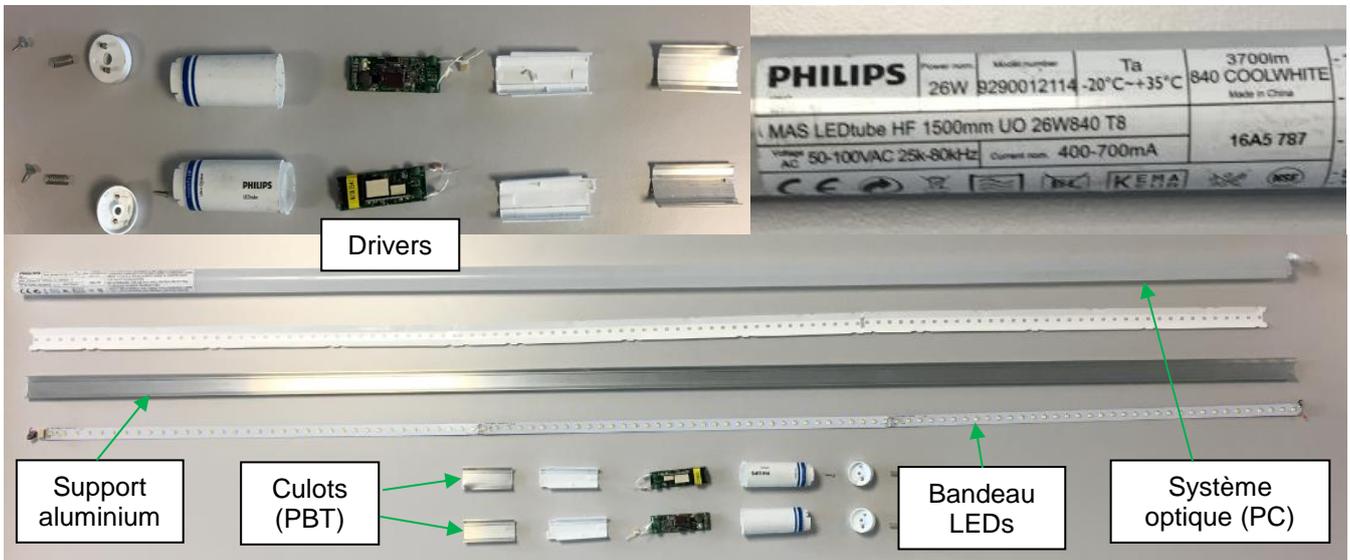


Figure 4 : Désassemblage manuel d'un tube à LED plastique Philips, 26 W, 150 cm, masse 310 g et 108 puces LEDs



Figure 5 : Désassemblage manuel d'un tube à LED verre OSRAM, 19,1 W, 150 cm, 6500 K, masse 236 g et 84 puces LEDs (fabrication 2014)

Annexe 4

Composition moyenne des lampes à LED en 2020

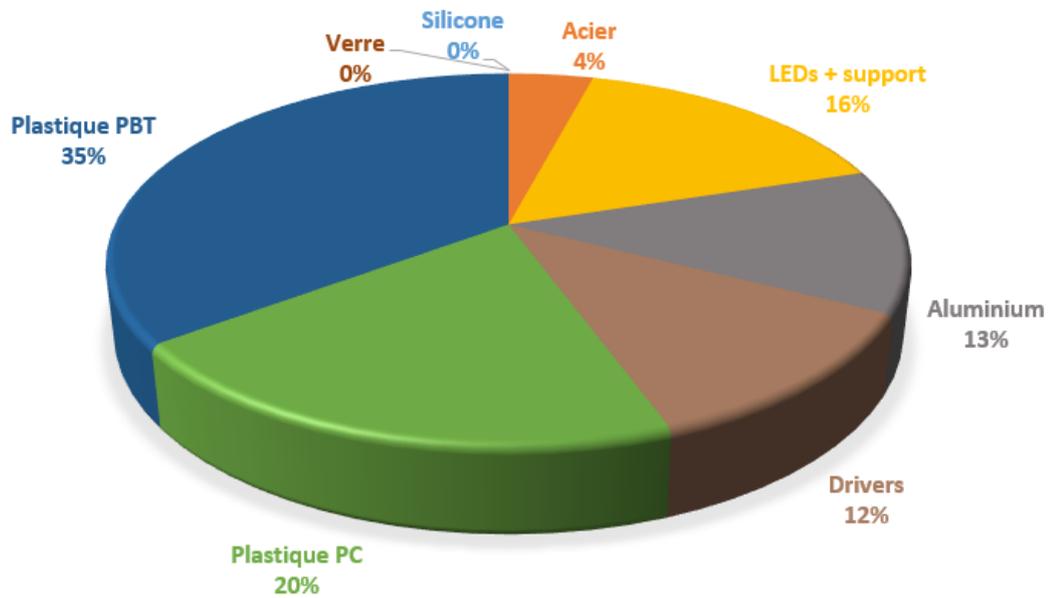


Figure 1 : Composition moyenne d'une lampe à LED E27 en plastique (technologie 2020)

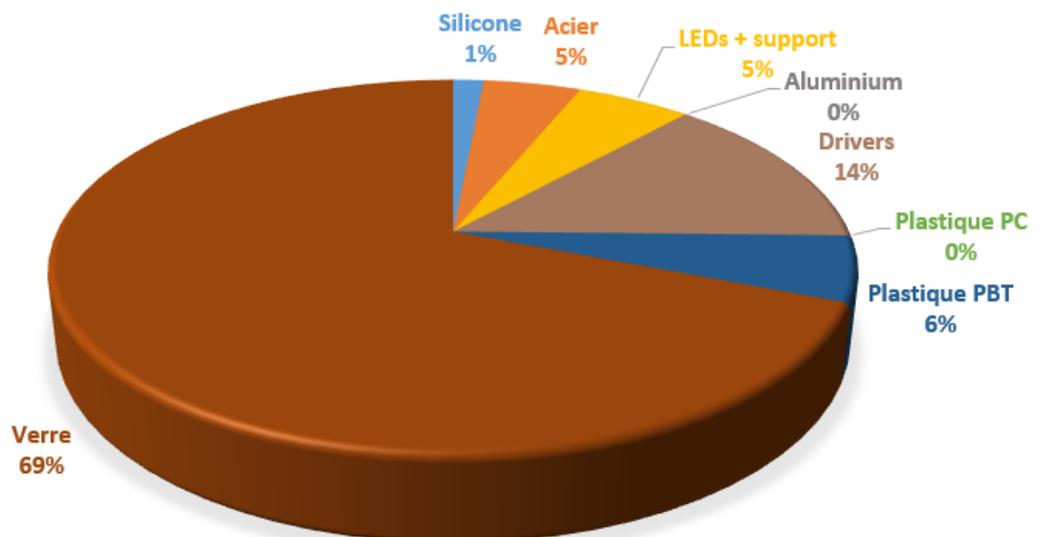


Figure 2 : Composition moyenne d'une lampe à LED E27 en verre (technologie 2020)

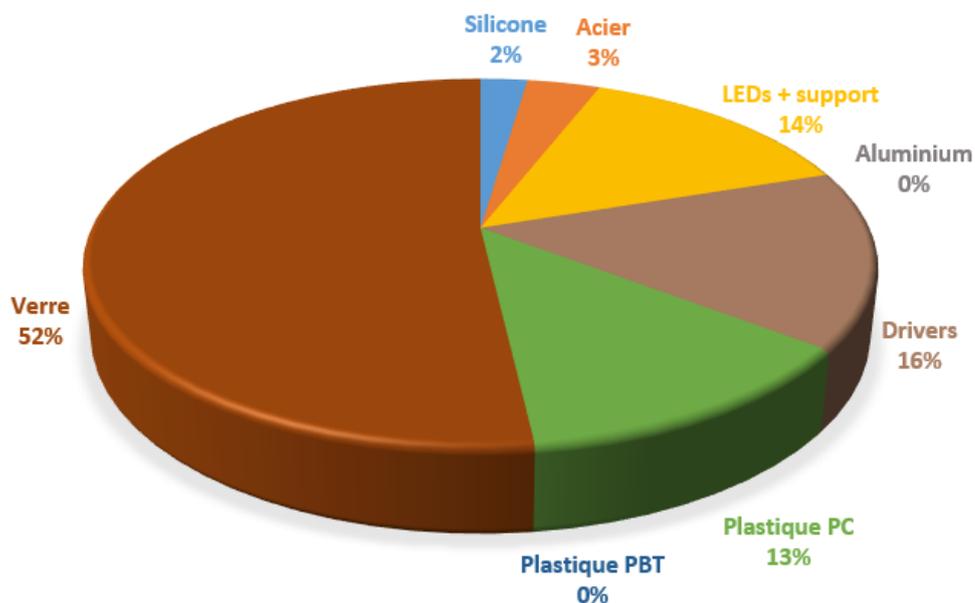


Figure 3 : Composition moyenne d'un spot GU10 (technologie 2020)

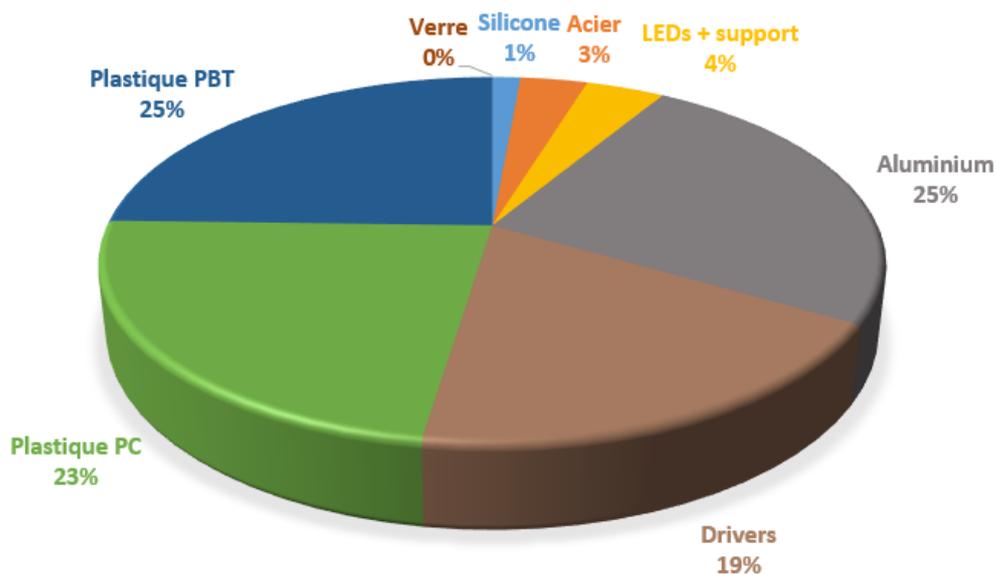


Figure 4 : Composition moyenne d'une lampe à LED E14 en plastique (technologie 2020)

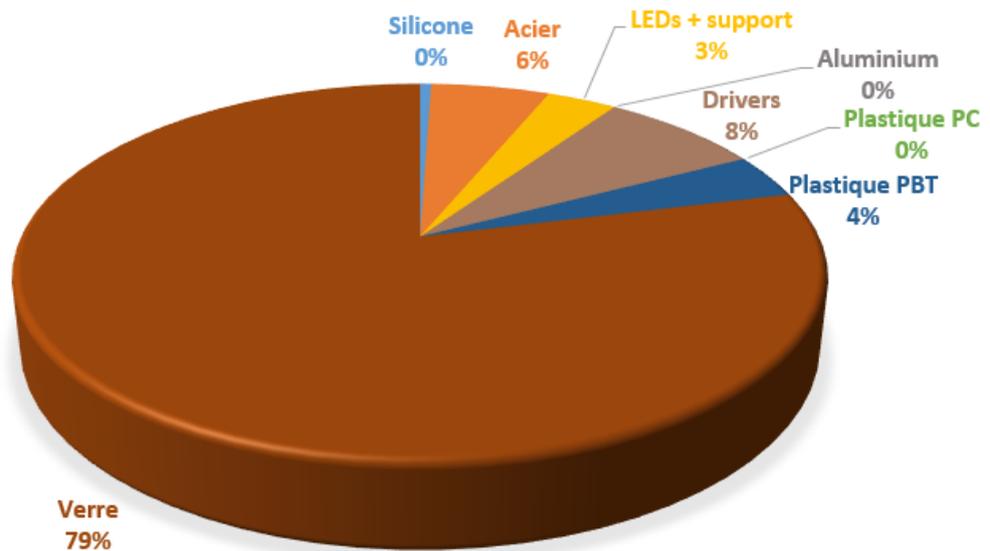


Figure 5 : Composition moyenne d'une lampe à LED E14 en verre (technologie 2020)

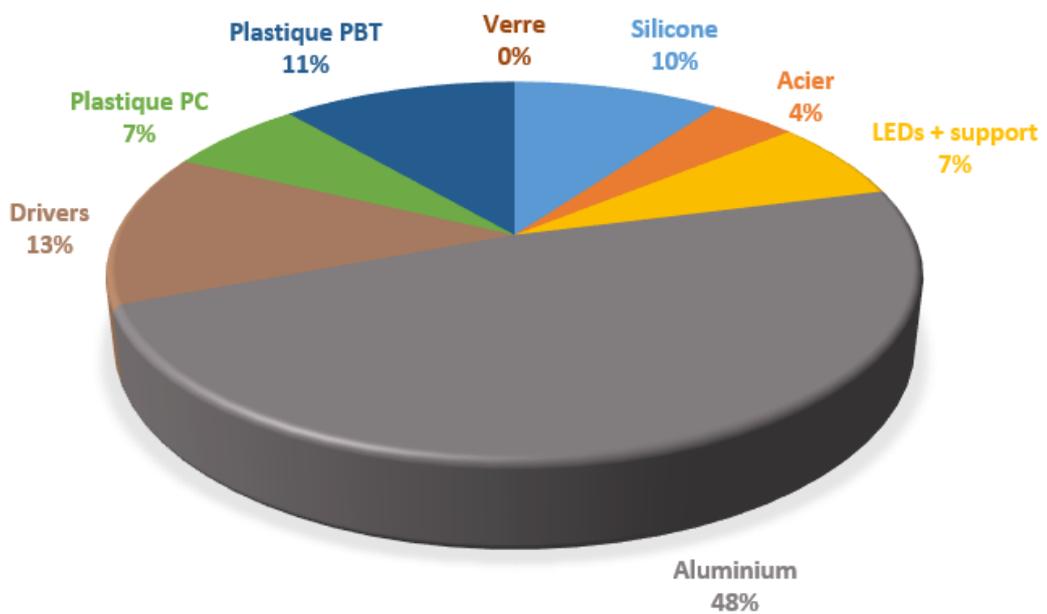


Figure 6 : Composition moyenne d'une lampe à LED E40 (technologie 2020)

Annexe 5

Composition moyenne des dalles à LED en 2020

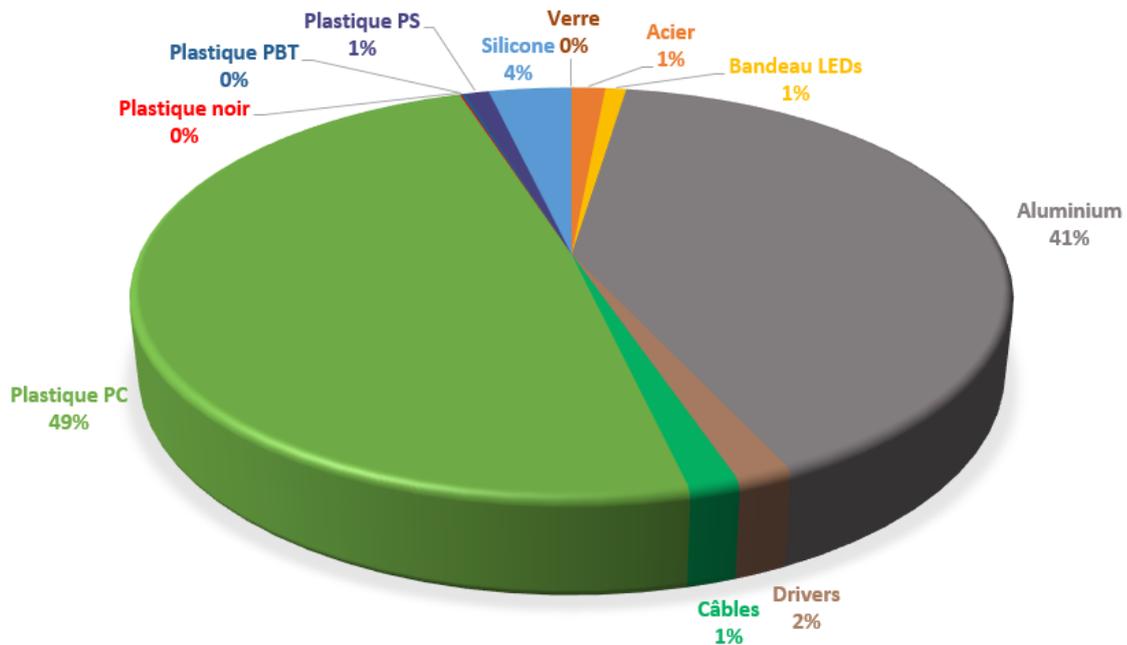


Figure 1 : Composition moyenne d'une dalle à LED 60 x 60 (technologie 2020)

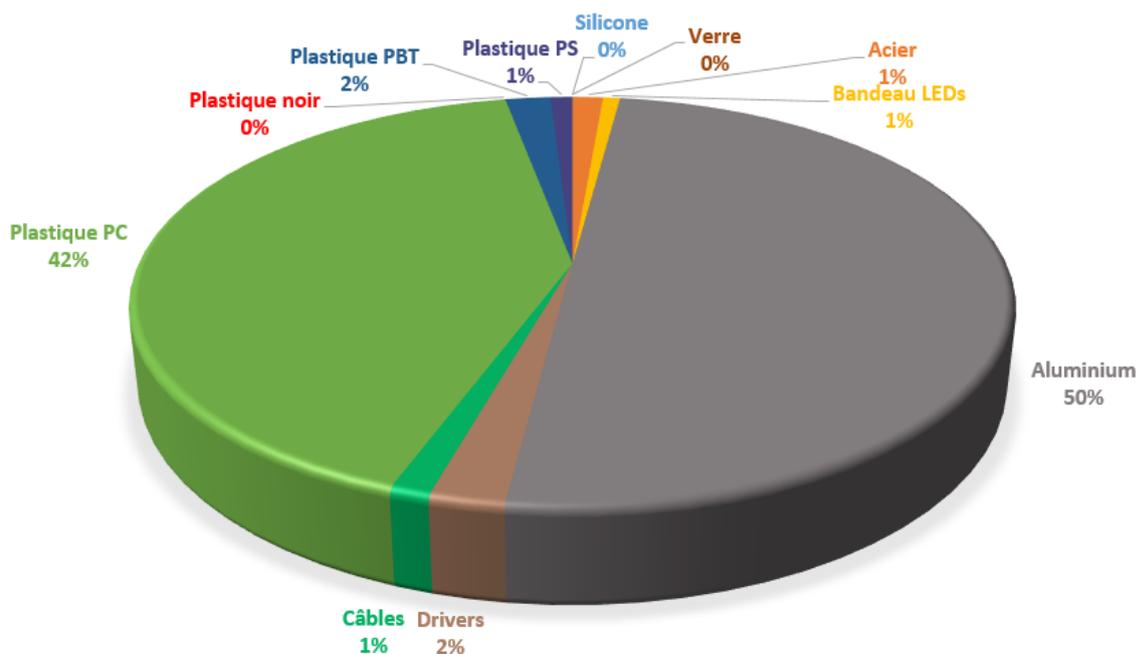


Figure 2 : Composition moyenne d'une dalle à LED 120 x 30 (technologie 2020)

Annexe 6

Convention de Stockholm

La convention de Stockholm est un traité international qui vise à régler l'utilisation des POPs⁴², afin de protéger l'environnement et la santé humaine. Le Comité d'étude des POPs examine les propositions d'inscription des nouvelles substances chimiques présentées par les Parties⁴³. En fonction des résultats obtenus, les substances peuvent être inscrites sur les annexes A, B ou C de la convention. Si la substance est inscrite dans l'annexe A, les Parties doivent prendre des mesures afin d'éliminer la production et l'utilisation de cette substance. L'annexe B vise à réduire la production et l'utilisation des substances chimiques qui sont inscrites. Enfin, l'annexe C cible la réduction des rejets non intentionnels, dans le but d'abaisser continuellement leur volume au minimum et de les éliminer à terme, si possible [5].

Les molécules POPs recouvrent un ensemble de substances organiques. Elles sont définies par le protocole d'Aarhus depuis 1998 (Commission Economique des Nations Unies), à partir de quatre propriétés [6] :

- Persistantes : très résistantes aux dégradations biologiques naturelles ;
- Bioaccumulables : s'amoncelant dans les tissus vivants et dont les concentrations augmentent le long de la chaîne alimentaire ;
- Toxiques : ayant des effets délétères sur la santé humaine et l'environnement ;
- Mobiles⁴⁴ : à fort potentiel de dissémination à l'échelle planétaire, au-delà des frontières, sur de longues distances et pouvant se déposer loin du lieu d'émission (typiquement des milieux chauds à forte activité humaine vers les milieux froids, tel que l'Arctique).

En 2010, le centre d'expertise en analyse environnementale du Québec a montré que les concentrations moyennes de RFBs dans les tissus humains doublent environ tous les 5 ans. Par ailleurs, une étude menée en Arctique a permis d'identifier la présence de RFBs dans l'air et dans les organismes des animaux marins, prouvant ainsi leur fort potentiel de dissémination à l'échelle planétaire. Néanmoins, leurs concentrations les plus élevées sont surtout à la périphérie des usines les produisant et les recyclant. Toutefois, très peu de données scientifiques sur les risques humains sont disponibles aujourd'hui. Des données sur l'exposition des jeunes enfants (moins de trois ans) sont attendues, afin de confirmer que cette population à risque n'est pas exposée à des concentrations trop élevées de RFBs, tels que le PolyBromoDiphénylEthers (PBDE) ou le TétraBromoBisPhénol A (TBBPA). Des études chez l'animal montrent qu'ils ont une influence sur le développement neurologique et qu'ils peuvent agir à l'instar des perturbateurs endocriniens⁴⁵ [4].

Notons qu'en France, entre 2014 et 2016, à la demande du Ministère en charge de l'Environnement, les éco-organismes ont coordonné et financé plusieurs campagnes nationales de mesures. Elles ont permis de définir des règles simplifiées et de clarifier quelles étaient les filières de traitement autorisées, pour les fractions de plastiques issues de DEEE contenant des RFBs, en fonction de leur dangerosité et/ou de la présence ou non de POPs [10]. La dernière campagne d'analyse et de qualification des plastiques, réalisée entre octobre 2015 et janvier 2016, a été menée avec le Ministère de l'Environnement, L'INERIS, FEDEREC, la FNADE⁴⁶ et le laboratoire de services analytiques de contrôle de la qualité des produits commerciaux SGS Multilab. Le rapport de l'INERIS a été diffusé officiellement en octobre 2017 [2] [11].

⁴² Polluant Organique Persistant.

⁴³ Les 152 Etats signataires de la convention de Stockholm.

⁴⁴ De par leurs propriétés de persistance et de bioaccumulation.

⁴⁵ Molécules ou agents chimiques xénobiotiques, ayant des propriétés hormono-mimétiques, décrits comme causes d'anomalies physiologiques et notamment reproductives.

⁴⁶ Fédération Nationale des Activités de la Dépollution et de l'Environnement.

Annexe 7

Outil ECM de traitement des tubes à LED

Pareillement aux lampes et aux spots à LED, nous proposons un exemple de ligne de traitement industrielle, basée sur la machine ECM, pour la valorisation des tubes à LED en aluminium, en plastique et en verre. Rappelons que cet outil industriel, disponible chez ARTEMISE, permet une séparation des culots et une segmentation efficace des tubes en différentes longueurs : 30 cm, 32 cm et 40 cm. Les tronçons ainsi récupérés sont ensuite broyés dans une vis de broyage. Après le traitement, les fractions récupérées sont composées de métaux ferreux et non ferreux, de bandeaux LEDs, de drivers, de plastiques et de verre. La Figure 1 présente le schéma de principe de l'outil global proposé pour l'entreprise ARTEMISE.

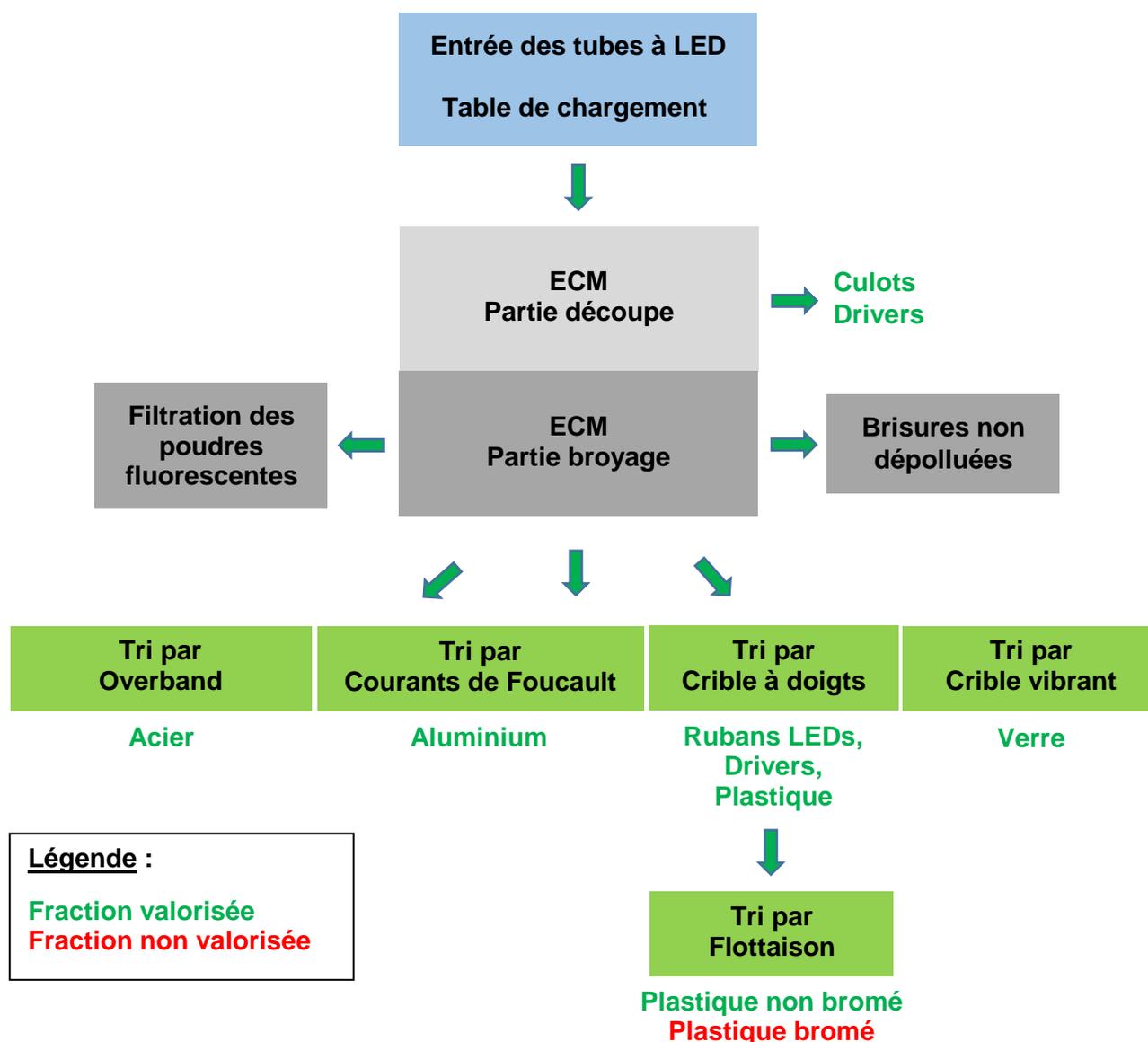


Figure 1 : Synoptique de l'outil ECM pour le traitement en fin de vie des tubes à LED en aluminium, plastique et verre

L'outil industriel ECM est composé de différents éléments :

- Machine ECM
 - Table de chargement
 - Partie découpe : convoyeur, chaînes à taquets et scies circulaires
 - Partie broyage : vis de broyage
 - Système de module filtrant des poudres fluorescentes
 - Système de récupération des brisures non dépolluées
- Dispositifs de tri :
 - Système Overband (acier)
 - Système à courants de Foucault (aluminium)
 - Système par crible à doigts (rubans LEDs, drivers et plastique)
 - Système par flottaison (plastique non bromé/plastique bromé)
 - Système par crible vibrant (verre)

Le principe de cette ligne industrielle ECM repose sur les étapes suivantes :

1. Les tubes à LED sont déposés par les opérateurs, sur la table de chargement.
2. Un système de chaînes à taquets bloque les tubes unitairement en butée et les achemine jusqu'aux scies circulaires, pour découper les tubes en tronçons et leurs extrémités.
3. Les culots sont détachés, tombent dans un convoyeur, puis sont transportés et stockés dans un fût.
4. Les tubes, ainsi découpés en tronçons, sont déplacés vers la vis de broyage.
5. La poudre fluorescente résiduelle (effet de pollution croisée issue des tubes traditionnels) est aspirée par un système de filtration, constitué d'un seul module filtrant. Les brisures non dépolluées sont récupérées dans un fût.
6. A l'issue du traitement de broyage dans la vis, les fractions récupérées sont triées par :
 - a. Un dispositif Overband pour récupérer l'acier ;
 - b. Un dispositif de courants de Foucault pour récupérer l'aluminium ;
 - c. Un système de crible à doigts pour récupérer les rubans à LED, les drivers et les plastiques ;
 - d. Un dispositif de tri par flottaison, dans une solution de chlorure de calcium (CaCl_2), pour la séparation des matrices plastiques non bromées de celles bromées ;
 - e. Un système de crible vibrant en forme de « V », pour récupérer le verre.

Cette combinaison de la machine ECM avec les dispositifs de tri permet ainsi le traitement en fin de vie des tubes à LED en aluminium, en plastique et en verre, par la valorisation des métaux ferreux et non ferreux, des bandeaux LEDs, des drivers, des plastiques et du verre. Cette valorisation est optimisée par le tronçonnage des tubes pour empêcher que les rubans LEDs ne bloquent le système de broyage, au niveau de la vis sans fin. Par ailleurs, les culots sont scindés des tubes à 8 cm de leurs extrémités. Cette distance de sécurité évite de sectionner les drivers apparés dans ces derniers.

Rappelons que pour chaque catégorie de tubes à LED, nous avons identifié des vitesses optimales du système de convoyeur des chaînes à taquets, équipant le dispositif ECM, afin de transporter ces produits vers les scies circulaires (cf. chapitre 3). Par conséquent, ARTEMISE procédera à des campagnes d'essais. Subséquemment, une seule catégorie de tubes sera traitée simultanément, dans cet équipement industriel ECM.

Productions scientifiques

Les résultats de recherche, obtenus durant ces trois années de thèse CIFRE, ont été valorisés sous la forme d'un article scientifique et de quatre conférences :

A1 : L. Benmamas, G. Housset, K. Nomenyo, K. Bru, M. Beaulieu, P. Leclere, L. Clerget, G. Léronnel, Y. Bouzidi, 2021. Selective separation of plastic LED lamp components using electrodynamic fragmentation for material recovery. Waste Management. Article soumis le 26 juillet 2021.

C1 : 8^{ème} Colloque sur les nouvelles technologies de l'éclairage 2019, 5 et 6 novembre 2019, Université de Technologie de Troyes.

C2 : International Conference on Recycling and Waste Management, Theme : Recycling of wastes, recovery and reuse of materials. Oral Presentation « Technological solutions for the recovery of a LED lighting component at the end of the cycle », August 28-29 2020, Washington, USA.

C3 : Rencards de l'ACEtylène⁴⁷ « Comment la LED a changé ma vie ». Table ronde ayant pour thématique « impact écologique, économique et sociétal de la LED dans l'éclairage », 17 juin 2021, Paris, France.

C4 : 9^{ème} Colloque sur les nouvelles technologies de l'éclairage 2021, 29 et 30 septembre 2021, Université de Technologie de Troyes.

⁴⁷ Association des concepteurs lumière et éclairagistes.

Arezki Lotfi BENMAMAS

Doctorat : Matériaux, Mécanique, Optique, Nanotechnologie

Année 2021

Valorisation des systèmes d'éclairage à LED en fin de cycle de vie

Si l'éclairage solide permet une réduction conséquente de la consommation d'électricité, reste posé la problématique des dispositifs à base de LED. Cette thèse associée au projet RECYLED a consisté à identifier puis à développer des méthodes et des procédés en fonction des typologies des dispositifs (lampes, tubes et luminaires) et ce en vue d'une valorisation et d'une réutilisation de certains composants élémentaires. L'objectif, par une approche globale, incluant à la fois les aspects techniques, économiques et environnementaux était d'aboutir à un taux de recyclage de 80%. Trois scénarii ont été identifiés pour le recyclage des lampes et des tubes à LED, la réutilisation, le broyage et le désassemblage des lampes et des tubes à LED. Des études des déchets et des produits commercialisés, ont été menées afin de caractériser le gisement et de dimensionner les solutions de traitement proposées et estimer le potentiel de valorisation global. Concernant le désassemblage identifié comme le point bloquant, la technologie des puissances pulsées reposant sur la fragmentation est proposée. En ce qui concerne les tubes des solutions purement mécaniques ont été validées. Les méthodes proposées permettent d'obtenir un taux de valorisation matière de 74% pour les lampes et 94% pour les tubes. Ces taux sont à relier avec les prévisions estimées pour 2030 dans le cadre de ce travail qui aboutissent à un gisement annuel maximal évalué pour les lampes à LED à 2600 tonnes et pour les tubes et dalles à LED à 1600 tonnes.

Mots clés : économie circulaire – diodes électroluminescentes – gisement – puissances pulsées – fragmentation sélective – recyclage.

Study of the Added Value of End-of-life LED Lighting Systems

While solid-state lighting allows for a significant reduction in electricity consumption, the problem of the end-of-life of the LED-based devices remains. This thesis associated with the RECYLED project consisted in identifying and then developing methods and processes according to the typologies of the devices (lamps, tubes and luminaires) with a view to recovery and reuse of certain elementary components. The objective, through a comprehensive approach, including both technical, economic and environmental aspects, was to achieve a recycling rate of 80%. Three scenarios have been identified for the recycling of LED lamps and tubes, reuse, shredding and disassembly. Studies of waste and marketed products have been carried out in order to characterize the deposit and size the proposed treatment solutions and estimate the overall recovery potential. Regarding the disassembly identified as the blocking point, the technology of pulsed powers based on fragmentation is proposed. With regard to the tubes, purely mechanical solutions have been validated. The proposed methods make it possible to obtain a material recovery rate of 74% for the lamps and 94% for the tubes. These rates are to be linked with the forecasts estimated for 2030 as part of this work, which lead to a maximum annual deposit estimated for LED lamps at 2600 tons and for LED tubes and panels at 1600 tons.

Keywords: circular economy – LED lighting diodes – deposit – High voltage fragmentation technology – selective fragmentation – recycling.

Thèse réalisée en partenariat entre :

