



CARACTERISATION DES DECHETS D'EQUIPEMENTS ELECTRONIQUES ET
ELECTRIQUES (D3E) EN AFRIQUE SUB-SAHARIENNE POUR UNE
VALORISATION DURABLE: CAS DE OUAGADOUGOU AU BURKINA FASO

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2iE AVEC GRADE DE MASTER

SPECIALITE EAU ET ASSAINISSEMENT

Présenté et soutenu publiquement le 22 janvier 2019 par

Landrine NARE (N° 20150125)

Travaux dirigés par :

Dr. Harinaivo A. ANDRIANISA, Chef du Département Eau et Assainissement, 2iE
Dr. Seyram SOSSOU, Enseignant-chercheur, 2iE
Dr. Malicki ZOROM, Enseignant-chercheur, 2iE
M. Alassane SANOU, Directeur exécutif de l'ABPEV

Structure d'accueil : Association Burkinabè pour la Promotion des Emplois Verts

Jury d'évaluation du stage:

Président: Dr Yohann RICHARDSON

Membres et correcteurs: Dr Seyram SOSSOU

Dr Hela KAROUI

Promotion [2017/2018]

DEDICACE

Je dédie ce travail à:

Mes parents Feu NARE Raymond et KOUDOUGOU Clémence;

Mes frères et sœurs;

Ma femme VELEGDA W. Justine et ma fille W. G. Angéla;

Mon cousin NARE Charles SIDWAYA;

Et à tous ceux qui m'ont soutenu durant ces années d'études.

CITATION

«Un voyage de mille lieues commence toujours par un premier pas »: Lao Tseu

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements sont adressés à Dieu le Créateur pour ses bienfaits et son assistance constante tout au long de la réalisation de cette étude.

C'est l'occasion également pour moi, au terme de ce stage passionnant et riche en expériences, de témoigner ma gratitude à l'endroit de tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réalisation de ce document. Mes remerciements vont ainsi à l'endroit de:

- L'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et l'Environnement (2iE)
- Dr Harinaivo A. ANDRIANISA, Chef du Département Eau et Assainissement, 2iE
- Dr Seyram SOSSOU, Enseignant-chercheur, 2iE
- Dr Malicki ZOROM, Enseignant-chercheur, 2iE
- L'Association Burkinabè pour la Promotion des Emplois Verts (ABPEV)
- M. Alassane SANOU, Directeur Exécutif de l'Association Burkinabè pour la Promotion des Emplois Verts (ABPEV), pour leurs soutiens et leurs disponibilités dans la réalisation de cette étude.

Je tiens aussi à remercier tout le personnel de l'ABPEV en particulier M. KABORE Yacouba pour ses conseils et son accompagnement durant ce travail.

Je remercie enfin tous mes promotionnaires, mes collègues des Ministères de la Santé, de l'Eau et l'Assainissement, le corps enseignant et tout le personnel de 2iE pour leurs contributions diverses.

Résumé

La gestion des déchets d'équipements électroniques et électriques demeure une problématique particulièrement dans les pays en développement tel le Burkina Faso. L'objectif de cette étude est de contribuer au développement de l'économie verte à travers la gestion durable des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). Une typologie des DEEE de Ouagadougou a été faite à travers une recherche documentaire; une enquête et une observation directe. Aussi, une caractérisation des déchets a été réalisée par identification électromagnétique et visuelle des composantes. La recherche documentaire a permis d'identifier d'autres variables descriptives telles les teneurs moyennes en métaux. Une nouvelle classification des DEEE a été réalisée grâce à une analyse factorielle de ces variables. Des filières de valorisation ont également été identifiées grâce à la recherche documentaire. Selon les résultats, il existe à Ouagadougou près de 77 types de DEEE dominés par les téléphones portables (14,61%) suivis des chargeurs de téléphones (9,74%); des téléviseurs à tubes cathodiques (6,16%), etc. Il ressort de l'analyse factorielle trois groupes homogènes de DEEE. Pour chaque groupe, les moyennes en métaux de valeur et en métaux dangereux sont identifiées. Cela oriente les investisseurs qui désirent investir dans la filière. La classification proposée permet une appréciation claire des risques et avantages économiques au moment du choix des filières de valorisation. Le groupe des ordinateurs et des téléphones est très riches en métaux de valeur avec en moyenne 483,09 mg d'or et 18,48 mg d'argent par unité tandis que celui des téléviseurs à tubes cathodiques n'a aucun métal précieux et regorge de plomb avec en moyenne 1319 g par unité. Quant à la valorisation de ces déchets, la réutilisation des composantes électroniques, les procédés métallurgiques ainsi que la valorisation énergétique sont des filières envisageables. Au regard de leurs caractéristiques, une mauvaise gestion des DEEE peut causer de nombreux problèmes de santé et de pollutions environnementales mais aussi une perte de métaux. Toutefois, la mise en place des filières proposées permettra de protéger l'environnement et de créer de l'emploi grâce à la récupération des métaux.

Mots Clés :

- 1 - DEEE**
- 2 - Typologie**
- 3 - Caractérisation**
- 4 - Classification**
- 5 – Valorisation**

ABSTRACT

Waste management of electronic and electrical equipment remains a problem particularly in developing countries such as Burkina Faso. The objective of this study is to contribute to the development of the green economy through the sustainable management of wastes of electronics and electrical equipments (WEEE). A typology of WEEE in Ouagadougou was made through a literature search; investigation and direct observation. Also, a characterization of the waste was carried out by electromagnetic and visual identification of their components. The literature search identified other descriptive variables such as average metal levels. A new classification of WEEE was carried out by means of a factor analysis of these variables. Valuation channels have also been identified thanks to documentary research. According to the results, there are 77 types of WEEE dominated by mobile phones in Ouagadougou (14.61%) followed by telephone chargers (9.74%); CRT TVs (6.16%), etc. The factor analysis shows three homogeneous groups of WEEE. For each group, the average value of metals and hazardous metals are identified. This guides investors who want to invest in the sector. The proposed classification allows a clear appreciation of the economic risks and rewards when choosing value chains. The group of computers and telephones is very rich in valuable metals with an average of 483.09 mg of gold and 18.48 mg of silver per unit while that of CRT TVs has no precious metal and is full of lead with an average of 1319 g per unit. As for the recovery of this waste, the reuse of electronic components; metallurgical processes as well as energy recovery are possible channels. In view of their characteristics, poor management of WEEE can cause many health problems and environmental pollution but also a loss of metals. However, the implementation of the proposed sectors will help protect the environment and create jobs through the recovery of metals.

Key words:

- 1 - WEEE**
- 2 - Typologie**
- 3 - Characterization**
- 4 - Classification**
- 5 -Valorisation**

SIGLES ET ABREVIATIONS

ABPEV: Association Burkinabè pour la Promotion des Emplois verts

ABS: Acrylonitrile Butadiène Styène

ACP : Analyse en Composantes Principales

ARCEP: Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes

CE: Conseil Européen

DEEE ou D3E: Déchets d'Equipements Electroniques et Electriques

HIPS: High Impact Poly Styène

LdSD (RoHS): Restriction de l'utilisation des Substances Dangereuse (Restriction of Hazardous Substances)

EEE: Equipements Electroniques et Electriques

MEEVCC: Ministère de l'Environnement, de l'Economie Verte et du Changement Climatique

PBB: Polybromobiphényl

PBDE: Polybromodiphényléthers

PC: Poly Carbonate

POP's: Polluants Organiques Persistants

PPO: Poly (Oxyde de Propylène)

PS: Poly Styène

RAM : Random Access Memory

RGPH: Recensement Général de la Population et l'Habitat

REP: Responsabilité Elargie du Producteur

2iE: Institut International d'Ingénierie de l'Eau et l'Environnement

WEEE: Wastes of Electronics and Electrical Equipements

Sommaire

Table des matières	
DEDICACE	ii
CITATION	iii
REMERCIEMENTS	iv
Résumé	v
SIGLES ET ABREVIATIONS	vii
Sommaire	viii
LISTE DES TABLEAUX	1
LISTE DES FIGURES	2
INTRODUCTION	3
I REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	5
1. Définitions de quelques termes	5
2. Cadre règlementaire et institutionnel	7
3. Quantités de DEEE dans le monde et en Afrique	8
4. Caractérisations des DEEE.....	8
5. Valorisation des DEEE.....	10
II MATERIEL ET METHODE	13
1. Présentation de la structure d'accueil et de la zone d'étude.....	13
2. Typologie des DEEE de Ouagadougou.....	13
3. Caractérisation orientée pour une valorisation des DEEE de Ouagadougou	15
4. Identification des filières de valorisation en vue d'une meilleure gestion des DEEE de Ouagadougou.....	16
III RESULTATS ET DISCUSSION	17
1. Typologie des DEEE de Ouagadougou.....	17
2. Caractérisation orientée des DEEE de Ouagadougou pour une valorisation durable	22
3. Filières de valorisation des DEEE de Ouagadougou	30
IV CONCLUSION ET PERSPECTIVES	36
V RECOMMANDATIONS	39
VI BIBLIOGRAPHIE	40
VII ANNEXES	44

LISTE DES TABLEAUX

Tableau Ia: réactifs utilisés dans les procédés hydrométallurgiques et bio-hydrométallurgiques	11
Tableau Ib : réactifs utilisés dans les procédés hydrométallurgiques et biohydrométallurgiques	12
Tableau II: échantillonnage	14
Tableau III: compositions des DEEE démantelés	22
Tableau IV: proportion des équipements avec des codes de résine sur leurs coques plastiques ..	24
Tableau V: proportion du plastique identifié grâce aux codes de résine.....	24
Tableau VI: formation des composantes principales	27
Tableau VII: caractéristiques du groupe 1	31
Tableau VIII: caractéristiques du groupe 2	32
Tableau IX: proposition de filières de valorisation des DEEE de Ouagadougou	34

LISTE DES FIGURES

Figure 1a: typologie des DEEE de la Ville de Ouagadougou	19
Figure 1b: typologie des DEEE de la Ville de Ouagadougou	19
Figure 1c: typologie des DEEE de la Ville de Ouagadougou	20
Figure 1d: typologie des DEEE de la Ville de Ouagadougou	20
Figure 2: quantité de DEEE collectés et exportés par l'ABPEV	21
Figure 3: proportion des DEEE collectés et éliminés à Ouagadougou	21
Figure 4: proportion des fractions obtenues du démantèlement.....	22
Figure 5: teneur moyennes en matériaux par type de DEEE	23
Figure 6: types de polymères identifiés grâce aux codes de résines	25
Figure 7: classification des DEEE selon la directive européenne	27
Figure 8a: représentation des groupes dans le premier plan factoriel	30
Figure 8b: représentation des individus dans le premier plan factoriel.....	30

INTRODUCTION

Le marché des équipements électroniques et électriques s'est accru considérablement dans le monde ces dernières décennies. En conséquence, la quantité de déchets électroniques et électriques communément appelés DEEE a aussi augmenté à un rythme effrayant et constitue de nos jours un grand défi commun à tous les Etats. En effet, la production mondiale des DEEE est estimée entre 20 et 50 millions de tonnes chaque année et croît entre 3 à 5% par an (Cucchiella et al., 2015). C'est d'ailleurs l'un des groupes de déchets dont les volumes augmentent le plus rapidement au monde (Crowe et al., 2003; Cucchiella et al., 2015; Morf et al., 2007). Durant les dernières décennies, la production mondiale des DEEE a augmenté d'environ 8,8 % de 2004 à 2011 et d'environ 17.6% entre 2011 et 2016 (Alzate et al., 2016). Ces énormes quantités de déchets constituent de nos jours une préoccupation environnementale majeure dans le monde.

Dans de nombreux pays en développement, la situation est encore plus préoccupante au regard de la fragilité des législations en matière de gestion de ces déchets. Cette situation devient de plus en plus inquiétante du fait de l'importation d'équipements électroniques dits de seconde main des pays développés vers les pays en voie de développement. Ces équipements qui le plus souvent sont obsolètes ou irréparables et ne font qu'augmenter le volume des DEEE dans les pays d'accueil. Le Burkina Faso à l'instar des pays de l'Afrique subsaharienne n'est pas en reste vis-à-vis de ce fléau. En effet, la grande majorité des pays en développement y compris le Burkina Faso n'ont ni un système bien établi de collecte, de stockage ou d'enfouissement ni de textes réglementant la gestion des DEEE (Mundada et al., 2004).

Mais cette classification n'est pas adaptée pour une valorisation en ce sens qu'elle ne tient pas compte de leurs teneurs en métaux. Cette classification ne convainc pas suffisamment les investisseurs qui hésitent en effet, à s'investir dans la filière DEEE. Chez les recycleurs à faibles capitaux comme l'ABPEV, la situation est encore délicate à tel point que certains déchets collectés ne trouvent pas une classification et sont par conséquent rétrés de la chaîne de valorisation. En effet, ce qui distingue les déchets, c'est surtout leurs teneurs en métaux tels l'or, le cuivre, l'étain, l'argent, le cérium, le cadmium ou encore le plomb. Il est important donc de connaître à priori les avantages et les risques potentiels des DEEE à recycler. D'où la nécessité d'intégrer les concentrations en métaux toxiques et en métaux de valeur dans la classification de ces déchets. Il est indispensable pour un investisseur de pouvoir évaluer ce qu'il peut obtenir en termes de profits et ce qu'il risque notamment en termes de toxicité ou de pertes lorsqu'il

investit dans le recyclage d'un groupe de déchet en particulier. Or cela n'est possible à priori que si les caractéristiques des DEEE sont organisées en termes de risques et avantages. C'est en cela que réside l'intérêt de classer les DEEE en intégrant leurs teneurs en métaux valorisables et en métaux toxiques.

Outre les métaux rares et les métaux précieux notamment l'or, l'yttrium, le palladium ou l'argent, les DEEE présentent d'énormes concentrations en métaux lourds tels le plomb, le chrome hexavalent, le mercure, le cadmium ou le nickel (Bakas, 2016; Nnorom and Osibanjo, 2009; Oguchi et al., 2011, 2013). Une mauvaise gestion de ces déchets peut donc provoquer de nombreux problèmes sanitaires pour la population mais aussi de graves pollutions environnementales au regard des fortes teneurs en métaux lourds et en métaux toxiques. Une bonne gestion de ces déchets permettrait d'éviter les pollutions et de récupérer les énormes quantités de métaux valorisables qu'ils renferment.

La composition des DEEE est très complexe et très diverse. Elle peut varier d'un pays à l'autre. Déterminer la typologie de ce groupe de déchets présente donc d'énormes difficultés au regard du nombre d'EEE en fin de vie, mais aussi de leurs diversités.

Considérés comme de véritables mines urbaines, les gisements de DEEE regorgent de nombreux métaux de grande valeur économique en particulier l'or, l'argent, le palladium, le platine, le cuivre, l'aluminium, l'indium, le gallium, etc. La valorisation s'impose donc comme un impératif environnemental et économique non négligeable dans le monde contemporain en particulier dans les pays sub-sahariens. Cela implique de connaître la composition et les teneurs de ces différents métaux valorisables et suscite donc un réel besoin de caractérisation des DEEE.

Fort heureusement, de nombreuses techniques de valorisation existent de nos jours et permettent de récupérer certains métaux de valeur avec des taux de récupération très significatifs.

L'objectif global de cette étude est de contribuer au développement de l'économie verte en Afrique sub-saharienne à travers la gestion durable des D3E. De façon spécifique il s'agit de:

- Faire une typologie des DEEE de Ouagadougou;
- Faire une caractérisation orientée pour une valorisation des DEEE de Ouagadougou;
- Identifier les filières de valorisation en vue d'une meilleure gestion des DEEE de Ouagadougou.

Le plan de ce mémoire s'articule autour de trois parties: la revue bibliographique, les méthodes et matériels utilisés, les résultats et discussion.

I REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Définitions de quelques termes

– Déchet

Un déchet est tout résidu de matière ou de substance abandonné ou destiné à l'abandon qu'il soit liquide, solide ou gazeux, issu d'un processus de fabrication, de transformation ou d'utilisation d'une matière ou d'un produit (Code de l'environnement, 2013).

– Déchet dangereux

C'est tout résidu de matière ou de substance abandonné ou destiné à l'abandon, présentant des risques graves pour la santé, la sécurité publique et pour l'environnement (Code de l'environnement, 2013).

Le code de l'environnement à son article 59 stipule que l'importation de déchets dangereux est strictement interdite et tout déchet en provenance de l'étranger est présumé dangereux. Aussi, l'exportation et le transit de tels déchets sont prohibés vers les Etats tiers, sous réserve de leurs accords écrits préalable.

– Equipements Electriques et Electroniques, ou EEE :

Ce sont des équipements fonctionnant grâce à des courants électriques ou à des champs électromagnétiques et les équipements de production, de transfert et de mesure de ces courants et champs, et conçus pour être utilisés à une tension ne dépassant pas 1000 volts en courant alternatif et 1500 volts en courant continu (Directive DEEE, 2003)

– Déchets d'Equipements Electroniques et Electriques (D3E) ou en Anglais Wastes of Electronic and Electrical Equipements (WEEE):

Communément appelés DEEE, les D3E regroupent une multitude d'éléments et sa composition varie selon les pays. Selon la Directive DEEE du Conseil européen (Directive DEEE, 2003) ce sont des EEE en fin de vie, y compris tous les composants, sous-ensembles et produits consommables faisant partie intégrante du produit au moment de la mise au rebut. Les EEE « embarqués » (transports « intelligents », vêtements « communiquant », ...) ne sont donc pas inclus dans cette nouvelle filière « D3E ».

– La directive 2002/95/CE du 27 janvier 2003 du Parlement européen et du Conseil

Encore appelé directive LdSD (Limitation de l'utilisation des Substances Dangereuses), cette directive élaborée par le Parlement européen est relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les EEE.

Elle interdit par ailleurs l'introduction dans le marché européen des EEE contenant certaines substances dangereuses à des teneurs supérieures aux limites admises.

Il s'agit en particulier du Pb, du Cd, du Hg, du Cr⁶, des PBB, des PBDE. L'objectif de cette directive est de réduire l'impact des EEE sur l'environnement et la santé humaine lorsqu'ils sont en fin de vie.

Ci-dessous la liste des substances soumises à limitations visées à l'article 4, paragraphe 1 de la présente directive, et les valeurs de concentrations maximales tolérées en poids dans les matériaux homogènes (Directive LdSD, 2003):

Plomb (0,1 %)

Mercure (0,1 %)

Cadmium (0,01 %)

Chrome hexavalent (0,1 %)

Polybromobiphényles (0,1 %)

Polybromodiphényléthers (0,1 %)

– **La directive 2002/96/CE du 27 janvier 2003 du Parlement européen et du Conseil**

Aussi appelée la directive DEEE, cette directive éditée par le Parlement européen recommande aux producteurs et importateurs d'EEE, la reprise des DEEE auprès des consommateurs et d'en assurer leur mise en décharge de façon écologique et rationnelle. Première directive sur les DEEE, elle a pour principal objectif de prévenir la production de DEEE et de promouvoir la réutilisation, le recyclage ou toute autre forme de valorisation afin de réduire la mise en décharge de ces déchets. Un aspect très important de cette réglementation est le principe de la REP (Responsabilité Elargie des Producteurs) selon lequel le producteur est responsable du volume, du niveau de valorisation, du traitement des EEE en fin de vie ainsi que la minimisation de leurs impacts sur l'environnement (Directive DEEE, 2003). Elle aboutira à une nouvelle version en 2012 avec la refonte qui intègre les panneaux photovoltaïques comme DEEE (Directive DEEE, 2012).

– **Economie verte**

Selon le PNUE, c'est une économie qui entraîne l'amélioration du bien être humain et de l'équité social tout en réduisant de manière significative les risques environnementaux et la pénurie des ressources. Ce modèle économique obéit donc aux principes du développement durable.

2. Cadre réglementaire et institutionnel

Au plan international

Le Burkina Faso a ratifié de nombreuses conventions internationales auxquelles il s'inspire pour élaborer ses textes législatifs et réglementaires en relation avec la gestion des déchets et la protection de l'environnement de façon générale.

Il s'agit entre autres de:

- la Convention de Stockholm sur les Polluants Organiques Persistants (POP's) ratifiée par le Burkina Faso le 20 juillet 2004;
- la Convention de Bâle portant sur le contrôle des mouvements transfrontaliers des déchets dangereux et de leur élimination;
- la Convention de Bamako portant sur l'interdiction d'importer en Afrique des déchets dangereux et sur le contrôle des mouvements transfrontaliers;
- la Convention de Rotterdam relative aux produits chimiques et pesticides dangereux.

Au plan national

De nombreuses dispositions juridiques notamment des lois et des décrets ont été prises au niveau national en vue de la protection environnementale. Parmi ces dispositions, on peut citer:

- La Loi n°006-2013/AN portant code de l'environnement au Burkina Faso. Même si ce code ne mentionne pas de façon spécifique la question des DEEE, celui-ci aborde d'une manière plus globale les possibilités d'atteinte à l'environnement. Il énonce à son article 9 des principes tels que les principes de prévention, de précaution et de pollueur-payeur dont l'application permettra de maintenir et préserver la qualité de l'environnement;
- Le Décret N°2001-185/PRES/PM/MEE du 7 mai 2001 fixe les normes de rejets de polluants dans l'air, l'eau et le sol;
- La Loi n°023/94/ADP portant code de la santé publique au Burkina Faso interdit en son article 23 le déversement ou l'enfouissement de déchets toxiques industriels.

Cadre institutionnel

Le Ministère de l'Environnement, de l'Economie Verte et du Changement Climatique (MEEVCC) est l'autorité suprême en charge des questions de protection environnementale ainsi que la gestion des déchets au Burkina Faso. Toutefois, chaque municipalité est responsable de la gestion des déchets produits au niveau communal. C'est dans ce contexte que la Direction de la Propreté a été créée en mai 2001 à Ouagadougou pour assurer la salubrité de la Ville.

3. Quantités de DEEE dans le monde et en Afrique

La production mondiale des DEEE s'est accrue de manière significative ces dernières années. Estimée à près de 50 millions de tonne/an, sa croissance varie entre 3-5% par an (Cucchiella et al., 2015). Selon les estimations, la quantité a augmenté de près de 17,6% entre 2011 et 2016 et pourrait atteindre 93,5 millions de tonnes en 2016 (Akcil et al., 2015; Yu et al., 2014). La majeure partie des DEEE est générée en Asie avec près de 16 millions de tonnes en 2014 soit environ 3,7 kg /habitant (Balde et al., 2015). En Chine, selon les estimations, la quantité des DEEE aurait atteint 11,7 millions de tonnes en 2020 (Li et al., 2015). Le fort taux de production de DEEE s'observe cependant en Europe avec près de 15,6 kg/habitant (Cucchiella et al., 2015). Il existe très peu d'estimation sur les DEEE générés en Afrique. Chaque année environ 5 millions d'ordinateurs de bureau de seconde main arrivent au Nigéria et environ 25 à 75% de ces ordinateurs sont usagers, irréparables et donc en fin de vie (Basel Action, 2005). En 2007, environ 7400 tonnes de DEEE ont été générés au Kenya (Schluep et al., 2009).

4. Caractérisations des DEEE

– Compositions en métaux de valeurs

Qualifiés de mines urbaines, les gisements de DEEE constituent d'énorme source de métaux précieux tels l'or, l'argent, le palladium (Bakas, 2016; Oguchi et al., 2011); et de métaux rares notamment le gallium, le cobalt, le tantale, l'yttrium, l'euporium, etc.

Utilisés dans beaucoup de composantes électroniques, les métaux précieux (Au, Ag, Pd, et le Pt) sont parfois plus abondants dans les cartes électroniques que dans les minerais naturels (Cucchiella et al., 2016; Ghosh et al., 2015). Généralement, les cartes électroniques sans les composantes électroniques (résistances, condensateurs, ...) contiennent entre 30 à 50% de métaux et 50 à 70% de fractions non métalliques constituées de céramiques, de verre, etc. (Wang et al., 2017). Les déchets de la catégorie "matériel grand public" et "équipements d'information et télécommunication" renferment le plus de métaux précieux avec en moyenne 32mg/kg d'Ag; 5mg/kg d' Au et 3mg/kg de Pd (Marra et al., 2018) et 67,7g/ d'Ag; 11,2g d' Au et 4,4g de Pd par tonne de D3E (Chancerel et al., 2009).

Les téléphones portables, les ordinateurs de bureau et les ordinateurs portables contiennent en effet de quantités significatives de métaux précieux pouvant atteindre respectivement jusqu'à 26,1 mg ; 92,7 mg ; 160,8 mg d'or contre 261 mg ; 11408 mg ; 343 mg d'argent chacun (Bakas, 2016). Les processeurs contiennent environ 1,05 g/kg d' Au,; 26,65 g/kg de Cu et 86 g/kg de Fe (Alzate et al., 2016). Les DEEE renferment aussi de grande quantité d'aluminium, de cuivre, de

fer mais aussi d'étain. Marra a obtenu en moyenne 504 g/kg Fe, 60 g/kg Cu et 32 g/kg Al sur un échantillon de D3E constitué de petits équipements et de déchets des catégories ``matériel grand public`` et ``équipements d'information et télécommunication`` (Marra et al., 2018). Les réfrigérateurs et les imprimantes peuvent contenir respectivement 16g/kg et 180 g/kg d'Al contre 170g/kg et 140g/kg de Cu (Oguchi et al., 2011).

– **Compositions en métaux lourds et autres éléments dangereux**

Outre les matériaux valorisables, de nombreuses études ont montré que les DEEE contiennent des éléments toxiques aussi bien pour l'homme que pour l'environnement. Il s'agit en particulier des métaux lourds tels que le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le mercure (Hg), le chrome VI (Cr⁶), le beryllium, le baryum, l'antimoine, etc. (Allsopp et al., 2006; Nnorom and Osibanjo, 2009; Oguchi et al., 2011, 2012).

Les réfrigérateurs, les téléphones portables et les climatiseurs peuvent respectivement contenir jusqu'à 21000 mg/kg, 13000 mg/kg et 5800 mg/kg de plomb contre 27 mg/kg, 1100 mg/kg et 11 mg/kg pour le chrome et 82 mg/kg, 19000 mg/kg et 320 mg/kg de baryum (Oguchi et al., 2012).

En 2008, Nnorom et Osibanjo (Nnorom and Osibanjo, 2009) ont détecté du plomb, du cadmium, du nickel (Ni) et de l'argent (Ag) dans les coques plastiques des téléphones portables à des concentrations allant de 4,6 mg/kg pour le Cd à 12500 mg/kg pour l'Ag. Les processeurs d'ordinateurs peuvent contenir jusqu'à 73,64g/kg de Ni (Alzate et al., 2016).

Cependant, les tubes cathodiques sont de loin ceux qui renferment les fortes teneurs en métaux lourds en particulier le plomb (Cucchiella et al., 2015; Oguchi et al., 2012, 2013). Les études ont montré que les tubes cathodiques des postes téléviseurs et moniteurs peuvent contenir jusqu'à 8% de plomb en masse (Li et al., 2006), soit environ 2 kg de plomb chacun (Nnorom and Osibanjo, 2008). Ils constituent la principale source de plomb dans les déchets solides urbains et contribuent à près de 29,8% du plomb présent dans les déchets solides municipaux et environ 98,7% de tout le plomb provenant des DEEE (Musson et al., 2000).

De nombreux composés bromés principalement utilisés comme retardateurs de flamme dans la fabrication des EEE se retrouvent dans les DEEE à de fortes concentrations. Les coques plastiques des téléviseurs à tube cathodique et des moniteurs à écran plat, les réfrigérateurs, ou encore les machines à laver peuvent contenir respectivement 11,31mg/kg, 1,91mg/kg, 6,63mg/kg et 2,49mg/kg de Polybromodiphényléthers (PBDE) (Yu et al., 2017). Ces énormes quantités de composés toxiques dans les DEEE rendent parfois leur recyclage plus complexe et plus coûteux.

Rappelons que selon la Directive LdSD du Conseil européen, les valeurs limites admises sont de 1000 ppm pour le Pb, l'Hg et le Cr⁶ et de 100 ppm de Cd (Directive LdSD, 2003).

5. Valorisation des DEEE

La présence de matériaux valorisables dans les DEEE suscite beaucoup de convoitises et attire plus d'un. En effet, il existe plusieurs techniques de valorisation de ces déchets parmi lesquelles on peut citer:

- La valorisation énergétique : l'incinération des coques plastiques avec la production et récupération d'énergie. Notons que 1kg de plastique peut produire 32,7MJ. Soit environ 277,78Wh.

- La réutilisation des composantes électroniques dans la réparation des EEE ou dans la chaîne de production de nouvelles EEE (Chi et al., 2011).

- Les procédés métallurgiques notamment la pyrométallurgie, l'hydrométallurgie et la bio-hydrométallurgie. Ces procédés permettent de récupérer les métaux présents dans les DEEE en particulier dans les cartes électroniques avec des taux de récupération atteignant parfois les 100% (Brandl et al., 2001; Creamer et al., 2006; Ha et al., 2010; Li et al., 2018; Oh et al., 2003; Quinet et al., 2005; Syed, 2006, 2016; Wang et al., 2017).

Les procédés hydro métallurgiques consistent à tremper les cartes électroniques dans une série de bains acides ou basiques afin de dissoudre les métaux. Ces derniers peuvent ensuite être récupérés par électrolyse, par adsorption, par cémentation ou encore par échange d'ions. Elles permettent une récupération sélective de nombreux métaux avec des taux de récupération très élevés (Alzate et al., 2016; Li et al., 2018; Montero et al., 2012; Oh et al., 2003; Syed, 2006, 2016).

La bio-hydrométallurgie comme son nom l'indique est un procédé métallurgique qui fait appel à deux mécanismes des microorganismes à savoir la bio-oxydation et la bio-sorption. La bio sorption est une interaction passive entre la charge surfacique des microorganismes et les ions métalliques en solution. De nombreux microorganismes comme *Saccharomyces cerevisiae*, *Aeromonas punctata*, *Corynebacterium glutamicum* ou *Aspergillus niger* ont la propriété d'accumuler activement certains métaux tels l'argent, l'or, le cuivre, l'aluminium, le plomb, etc. D'autres par contre ont la capacité de mobiliser les métaux présents dans les substrats de DEEE et de les concentrer dans la solution (Quinet et al., 2005; Syed, 2016).

Les tableaux Ia et Ib présentent quelques réactifs, leurs conditions d'utilisation ainsi que les taux de récupération atteints selon les auteurs.

Tableau Ia: réactifs utilisés dans les procédés hydrométallurgiques et bio-hydrométallurgiques

Quelques agents dissolvants utilisés dans le procédé hydrométallurgique et bio-hydrométallurgique			
Dissolvants	Cyanure	Persulfate de potassium	Thiosulfate
Réactifs	CN^- , O_2 (air) KCN 65,12 g/mol 1,52 g/cm ³ 71,6 g/100 mL (25°C) NaCN 49,10 g/mol 1,596 g/cm ³ 63,7 g/100 mL (25 °C)	$2[\text{SO}_4]^-$ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 270,322 g/mol 2,477 g/cm ³ 4,49 g/100 mL (20° C)	$\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, NH_3 , Cu^{2+} $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$ $\text{Na}_2(\text{S}_2\text{O}_3) \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ hypo 158,11 g/mol (sec) 248,18 g/mol (pentahydrate) 1,667 g/cm ³ 70,1 g/100 mL (20° C)
Réactions	$4\text{Au} + 8\text{CN}^- + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Au}(\text{CN})_2^- + 4\text{OH}^-$	Dissout tous les métaux de base et conserve seulement l'or sous forme de précipité	$4\text{Au} + 8\text{S}_2\text{O}_3^{2-} + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-} + 4\text{OH}^-$
Conditions	$E^\circ = -0,67 \text{ V}$; $\text{pH} > 10$; 25°C		$E^\circ = 0,274 - 0,038 \text{ V}$; $\text{pH} > 8-11$; 25° C
Références Résultats	(Montero et al., 2012) 46,4% Au; 51,3% Ag; 62,3% Cu (Quinet et al., 2005) 95% Au ; 93% Ag et 99% Pd	(Syed, 2006) 99,5% Au	(Oh et al., 2003) 95% Au ; 100% Ag (Ha et al., 2010) 2 h 98% Au des cartes électroniques 10 h 90% Au des téléphones portables
Avantages et inconvénients	Toxique, pollution environnementale	Non toxique Agent oxydant très puissant	Non toxique et non corrosif

Tableau IIb : réactifs utilisés dans les procédés hydrométallurgiques et bio-hydrométallurgiques

Quelques agents dissolvants utilisés dans le procédé hydrométallurgique et bio-hydrométallurgique					
Dissolvants	H₂SO₄ + H₂O₂	H₂SO₄ + (H₂SO₄ + H₂O₂)	HCl	Desulfovibrio desulphuricans	Aspergillus niger, Penicillium simplicissimum
Réactifs	2M H ₂ SO ₄	1 ^{ère} étape: H ₂ SO ₄ 1M 1/10 m/v 2 ^e étape: H ₂ SO ₄ 1M 1/10 m/v + 240 mL H ₂ O ₂	1M HCl		
Réactions		H ₂ O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → 2H ₂ O Cu + H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂ → CuSO ₄ + 2H ₂ O Zn + H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂ → ZnSO ₄ + 2H ₂ O Sn + H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂ → SnSO ₄ + 2H ₂ O Fe + H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂ → FeSO ₄ + 2H ₂ O Ni + H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂ → NiSO ₄ + 2H ₂ O			
Conditions	85° C; 12 h Taille des cartes électroniques: <1 mm	75° C; 4 h	Chauffer à 900° C, 80° C, 3 h, <8 mm	Contact avec les DEEE	Contact avec les DEEE
Références Résultats	(Oh et al., 2003) 100% Cu et Zn; 95% Fe; Ni et Al	(Silvas et al., 2015)	(Havlik et al., 2010) >90% Cu	(Creamer et al., 2006) 68–95% Au et Pb	(Brandl et al., 2001) 65–95% Cu, Sn, Al, Ni, Pb, Zn
Avantages et inconvénients		H ₂ O ₂ : oxydant non polluant			

II MATERIEL ET METHODE

1. Présentation de la structure d'accueil et de la zone d'étude

L'ABPEV est une structure associative œuvrant dans le domaine du recyclage des déchets électroniques et électriques. Elle est reconnue sous le récépissé n°: 2014-1312/MATDS/SG/DGLP/DOSOC du 26 août 2014. Située sur le 1396 Avenue (Avenue des Tansoaba) à Ouagadougou, l'association collecte des déchets issus de téléphones en fin de vie. Les déchets sont ensuite triés et conditionnés en plusieurs catégories à savoir :

- les plastiques qui sont conditionnés dans des sacs de 20 Kg;
- le fer conditionné dans des sacs de 15 Kg de même que les batteries, les écrans, les cartes électroniques, les téléphones entiers, les chargeurs, les câbles et les écouteurs ;
- il y a aussi la catégorie «autre» constituée des DEEE autres que ceux issus des téléphones.

Les déchets conditionnés sont ensuite exportés en France pour être valorisés. A ce jour l'association a pu collecter et exporter une centaine de tonnes de déchets.

La Ville de Ouagadougou, Chef-lieu de la province du Kadiogo est située au centre du Burkina Faso dont elle en est la Capitale. Elle est limitée à l'est par la commune rurale de Saaba, à l'ouest par celle de Tanghin Dassouri, au nord par celles de Loumbila et de Pabré et enfin au sud par celles de Koubri et de Komsilga. C'est une commune urbaine à statut particulier constituée de 12 arrondissements et 55 secteurs. Sa superficie est de 21 930 Ha avec une population estimée à 1 475 223 habitants et 308 380 ménages (RGPH, 2006).

2. Typologie des DEEE de Ouagadougou

Pour effectuer la typologie des DEEE de la ville de Ouagadougou, trois méthodes de collecte de données ont été utilisées à savoir la revue bibliographique, l'observation directe et l'enquête.

La revue bibliographique a consisté à rechercher des documents en relation avec notre thème mais aussi des textes législatifs en rapport avec la gestion des DEEE.

Une grille d'observation a aussi été élaborée pour collecter des informations sur la filière et le mode gestion actuelle des DEEE dans la Ville de Ouagadougou (annexe 1).

S'agissant de l'enquête (annexe 2), deux techniques ont été utilisées à savoir :

- l'enquête semi-directive où les individus ont été choisis pour leurs rôles dans la filière DEEE. Il s'agit en particulier des réparateurs d'EEE, de recycleurs de DEEE, des producteurs de DEEE en particulier les entreprises et services.
- l'enquête par questionnaire quant à elle a concerné les ménages. L'échantillon de ménages a été obtenu grâce à la formule développée par (Israel, 1992) qui permet un ajustement de la taille de l'échantillon à enquêter:

$$n = \frac{no}{1 + \frac{(no-1)}{N}}$$

$$\text{Où } no = \frac{Z^2 p(1-p)}{e^2}$$

n = la taille de l'échantillon ;

N = la taille de la population ;

Z = valeur correspondante au niveau de confiance souhaité (1,96 pour un niveau de confiance de 95 %, valeur généralement utilisée) avec une précision e;

e est prise à $\pm 7\%$, soit $e = 0,07$;

p = pourcentage de l'indicateur principal, exprimé en décimale (0,5 par défaut) et $q = 1-p$.

Ce qui donne un échantillon n égal à 195 ménages sur un total de 308380 ménages. Au terme de l'enquête, 174 ménages ont été enquêtés soit un taux de 89,23% car certains enquêtés n'ont pas remis leurs fiches d'enquête.

Au total 236 individus ont été enquêtés au cours de cette étude. Comme le montre le tableau II, ces individus sont constitués de ménages, de réparateurs d'EEE, d'entreprises/services et de recycleurs de DEEE.

Tableau III: échantillonnage

Types d'individus enquêtés	Nombre d'individus enquêtés
Ménages	174
Recycleurs de DEEE ; entreprises/services et réparateurs d'EEE	62
Total	236

3. Caractérisation orientée pour une valorisation des DEEE de Ouagadougou

La caractérisation des DEEE s'est effectuée en deux étapes :

Une première étape au cours de laquelle un gisement de 11,153 Kg de DEEE a été collecté et regroupé à l'ABPEV. Ces déchets proviennent essentiellement de la catégorie «autres déchets» de l'ABPEV et des dons de parents et d'amis. Il s'agit de petits EEE en fin de vie notamment des chargeurs de téléphones et d'ordinateurs, des power bank, des casques audio, des télécommandes, des souris, etc. Après avoir déterminé les informations d'ordre générales telles les types, les marques, chaque équipement a été démantelé à l'aide de tournevis, de pinces et de marteaux. L'identification des matériaux s'est faite en grande partie visuellement et par séparation électromagnétique des éléments ferreux (principalement le fer et l'acier) à l'aide d'aimant. S'agissant des différents polymères, nous nous sommes servis des codes de résines présents sur les faces intérieurs des coques plastiques des équipements démantelés. Les différentes fractions obtenues ont ensuite été pesées à l'aide d'une balance de précision 10^{-2} .

La deuxième étape a consisté à une recherche documentaire : il s'est agi de déterminer ce qui peut distinguer un DEEE d'un autre c'est-à-dire ce qui caractérise particulièrement chaque déchet. Il existe, en effet plusieurs variables pour décrire un DEEE mais seules les variables les plus pertinentes ont été retenues pour l'analyse à savoir les teneurs moyennes de chaque déchet en Au, Pd, Ag, Cu, Fe, Al, Sn, Sb, Pb, Cd, Hg, Ba, Be, Cr⁶, Zn, Ni, plastiques, batteries, verre-céramique, matériaux ferreux et cartes électroniques, etc. Celle-ci a permis de collecter et de compléter les résultats obtenus au sein de l'atelier de l'ABPEV. Ce sont surtout des résultats de caractérisation effectuée dans des études antérieures notamment leurs concentrations en métaux lourds, en matériaux valorisables, etc. Au total trente variables descriptives des DEEE ont été identifiées dont vingt et une variables actives c'est-à-dire qui participent activement à la description des DEEE et neuf variables facultatives. Au regard du nombre élevé de variables descriptives, l'analyse factorielle a été choisie pour effectuer la classification des DEEE. Il faut préciser que toutes les variables actives sont quantitatives et en conséquence la méthode d'analyse factorielle adaptée est l'analyse en composantes principales (ACP). En effet, l'ACP tout comme les autres méthodes d'analyse factorielle, permet de regrouper les individus selon leurs ressemblances ou leurs dissemblances dans des groupes homogènes en réduisant le nombre de variables tout en minimisant la perte des informations.

La technique de classification utilisée est la technique des centres mobiles ou en anglais K-means. Elle calcule les distances entre les individus (types de DEEE) par rapport à des centres

de gravité mobiles afin de repérer les meilleurs regroupements possibles. Plus ces distances sont réduites plus les individus ont des similitudes : ce qui signifie qu'ils peuvent former un groupe homogène entre eux. La classification a été réalisée à l'aide du logiciel Tanagra.

4. Identification des filières de valorisation en vue d'une meilleure gestion des DEEE de Ouagadougou

L'identification des filières de valorisation des DEEE s'est faite en grande partie à travers une recherche bibliographique. Bien que certains procédés de recyclages soient encore en développement ou sous protection, plusieurs techniques de valorisation des matériaux ou d'extraction des métaux précieux issus des DEEE sont proposées dans les articles scientifiques.

Toutefois, l'analyse de la filière locale, du contexte économique et réglementaire du Burkina Faso a aussi été indispensable dans cette identification. Une grille d'observation a en effet été élaborée pour collecter les informations sur les prix ainsi que les techniques de valorisation et les types de matériaux valorisés au niveau local.

III RESULTATS ET DISCUSSION

1. Typologie des DEEE de Ouagadougou

Au total 698 DEEE regroupés en 77 types et constitués entre autres de téléphones, d'ordinateurs, de réfrigérateurs, de téléviseurs, de fer à repasser, de power bank et de pinces à lisser en fin de vie ont été inventoriés au cours de notre enquête.

On note (figure 1a,1b,1c et 1d) une prédominance des téléphones usagés (14,61%) suivis des chargeurs de téléphone (9,74%), des téléviseurs à tube cathodique (6,16%), des ampoules (5,87%) et des écouteurs (5,73%). Cette prédominance des téléphones et les chargeurs parmi les DEEE de Ouagadougou s'explique par la ruée sur les téléphones portables due au développement des réseaux de téléphonie mobile au Burkina ces dernières années avec d'énormes facilités dans les communications. Cela est surtout lié à la baisse des prix de ces équipements importés en particulier depuis la Chine et l'Europe. La quantité des téléviseurs à tube cathodique est aussi significative. Cela peut s'expliquer par l'arrivée sur le marché de téléviseurs dotés d'écrans à cristaux liquides avec de nouvelles technologies permettant un meilleur rendu des couleurs mais aussi moins énergivores que leurs prédécesseurs. Ce qui peut inciter les utilisateurs à vouloir abandonner leurs anciens postes téléviseurs.

Plus de 150 marques d'équipements ont pu être identifiées. Celles couramment rencontrées sont les marques SAMSUNG la plus fréquente, LG, HP, X-BASS, ITEL, Nokia, Delonghi, EVERNAL, SHARP, Panasonic, Privileg, etc.

Environ 90,4% des équipements sont fabriqués en Chine et 9,6% sont fabriqués dans d'autres pays tels le Japon, la France, la Corée du sud, l'Allemagne, la Finlande, la Turquie, la Taiwan, les Etats Unis, l'Italie ou le Canada. En effet, la disponibilité de main d'œuvre moins chère en Chine attire beaucoup d'investisseurs et de fabricants d'EEE soucieux de réduire leurs coûts de production et surtout de proposer aux clients des produits moins chers et plus compétitifs.

La pré-collecte se fait dans les lieux de production notamment les ménages, les réparateurs, les entreprises et services où les déchets sont stockés à même le sol dans les magasins et les arrières cours.

La collecte quant à elle se fait dans des sacs depuis les lieux de production vers les ateliers de démantèlement ou de conditionnement des DEEE. Le mode de collecte est majoritairement le porte en porte et se fait de préférence dans les ateliers de réparation ou le démantèlement des équipements est déjà réalisé.

Aussi, une collecte volontaire des DEEE est effectuée à travers les décharges d'ordures par des chiffonniers qui les revendent aux recycleurs. De 2011 en 2017, l'ABPEV a collecté environ 118,32 tonnes de déchets de téléphones usagés et en a exporté près de 99,46 tonnes vers la France durant la même période. Ces DEEE sont constitués de cartes électroniques, batteries, écrans, coques plastiques, de chargeurs, d'écouteurs, etc. Les plastiques représentent la grande fraction des déchets en question avec 31,98 tonnes collectés et 29,46 tonnes exportés (figure 2). Les chargeurs et les cartes électroniques arrivent en second lieu avec respectivement 23,34 tonnes et 17,32 tonnes collectés contre 22,23 tonnes et 13,89 tonnes exportés. Le manque de capitaux et le fait que les technologies de valorisation soient peu vulgarisées dans les pays en développement y compris le Burkina Faso expliquent l'exportation de ces déchets vers les pays développés. En rappel, les téléphones portables peuvent contenir chacun entre 24,1-29 mg d'or ; 8,7-14,5 mg de palladium et 232-319 mg d'argent (Bakas, 2016). Cela signifie que d'énormes quantités de métaux précieux sont ainsi exportées vers l'extérieur sans réelle valeur ajoutée pour les recycleurs nationaux et le pays.

Le transport se fait sur des motos, des pousses-pousses ou de véhicules depuis les lieux de production vers les ateliers de recyclage à partir desquels les déchets sont transportés dans des conteneurs vers la Côte d'Ivoire, le Togo, le Nigéria, le Ghana, la France et la Chine.

Les pièces et matériaux de valeur les plus prisés sont le fer, le cuivre, les RAM, les processeurs et les cartes mères de téléphones et d'ordinateurs (annexe III). Les pièces sont vendues à prix variés à des acheteurs locaux qui les exportent ensuite vers la Côte d'Ivoire, le Togo, le Nigéria, le Ghana, la France et la Chine. Les prix varient de 75 FCFA/Kg de fer à près de 10000 FCFA/Kg pour la RAM (annexe IV).

Certains DEEE tels les tubes cathodiques des moniteurs et TV sont peu ou pas valorisés et finissent souvent abandonnés aux abords des voies publiques (annexe V). Aussi, les coques plastiques non valorisées sont brûlées ou jetées dans les fosses d'emprunt de terre utilisées comme décharge à ordures dans les périphéries de la ville. Le démantèlement se fait sous des hangars aménagés comme ateliers dans les espaces publics ou au long des voies publiques. Les équipements y sont démantelés à l'aide d'outils divers tels des marteaux, des pinces, des tournevis, etc. Excepté l'ABPEV, la plupart des recycleurs exercent dans l'informel et font essentiellement de l'achat/vente de pièces de valeurs issues des DEEE.

Toutefois seuls 3,72% des déchets sont collectés en vue d'une valorisation et près de 15,19% sont éliminés c'est-à-dire brûlés ou abandonnés sur les voies publiques. Près de 81,09%

des DEEE restent stockés dans les lieux de production (figure 3). Ces résultats montrent le faible niveau de valorisation des DEEE de la Ville de Ouagadougou.

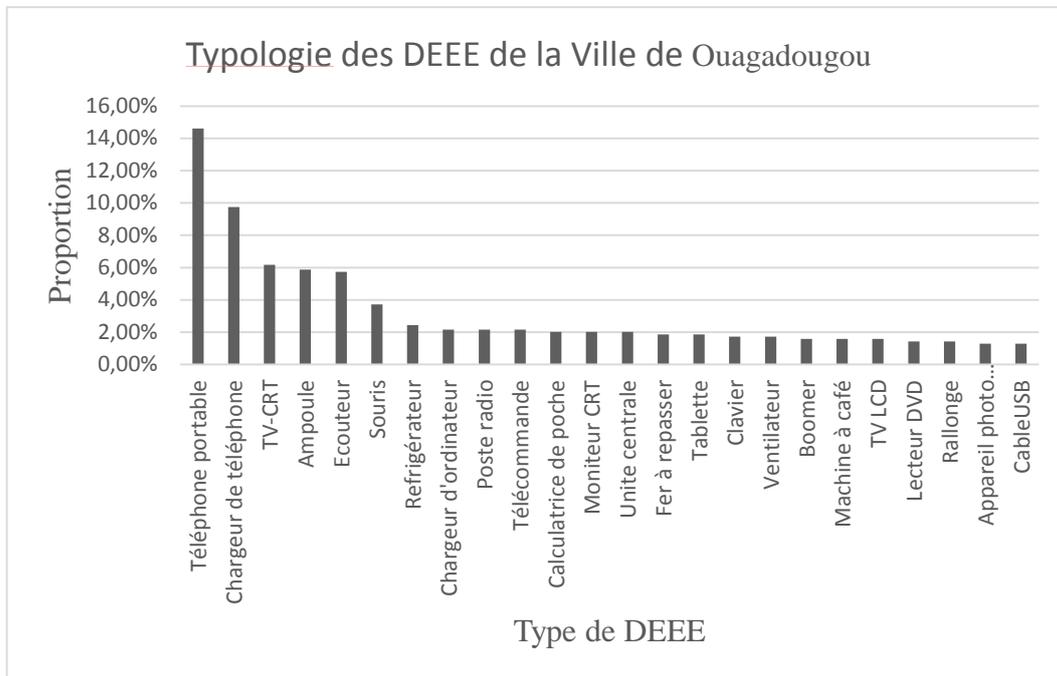


Figure 1a: Typologie des DEEE de la Ville de Ouagadougou

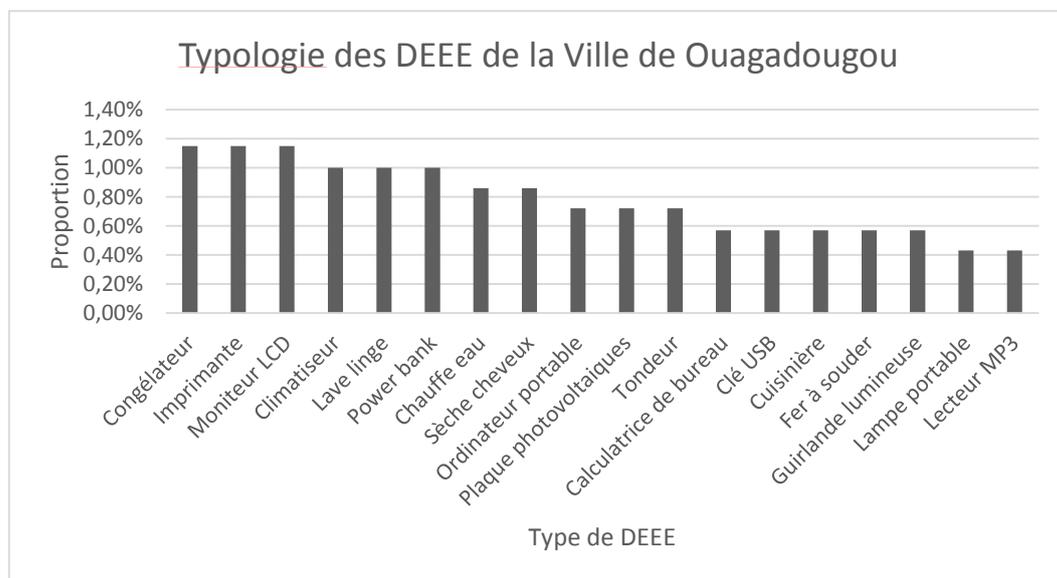


Figure 1b: typologie des DEEE de la Ville de Ouagadougou

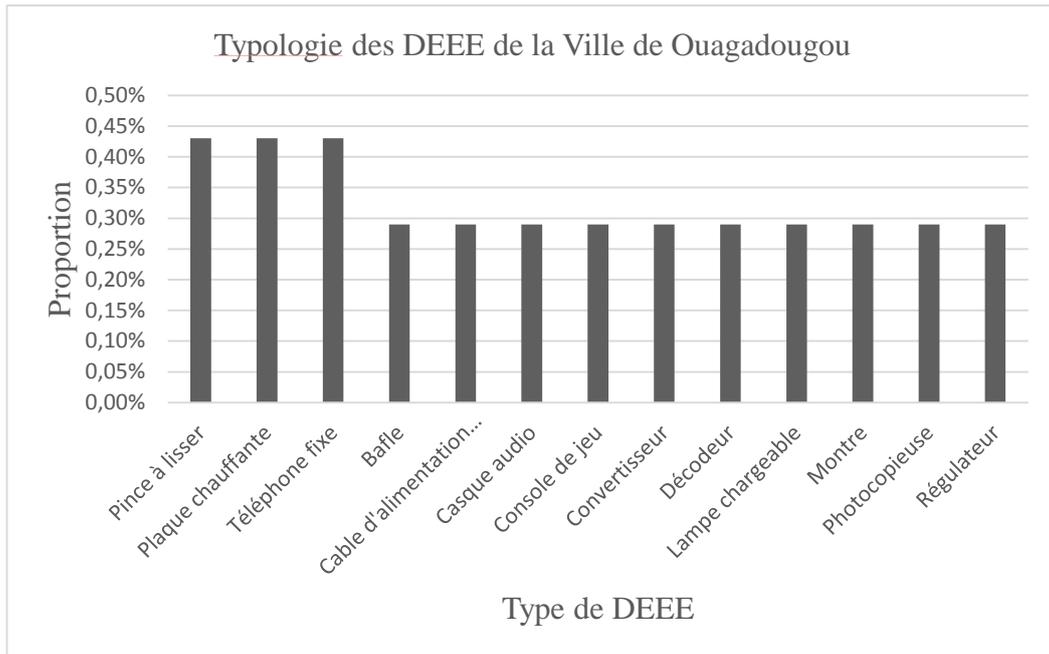


Figure 1c : typologie des DEEE de la Ville de Ouagadougou

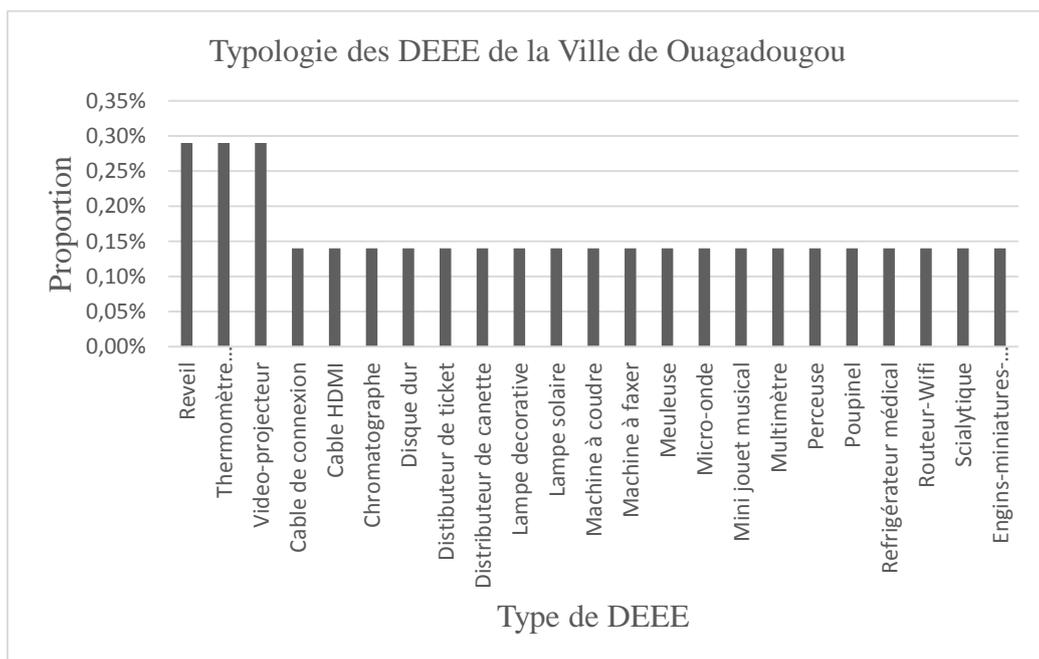


Figure 1d: typologie des DEEE de la Ville de Ouagadougou

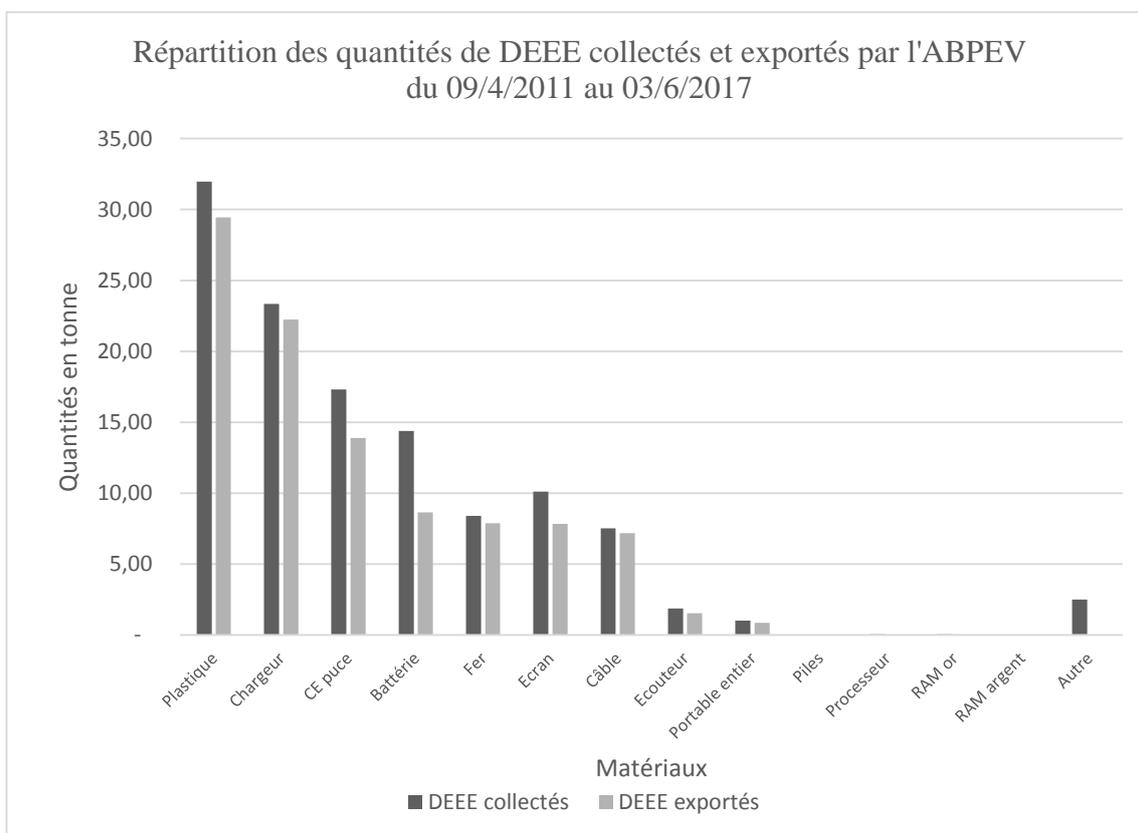


Figure 2: quantités de DEEE collectés et exportés par l'ABPEV

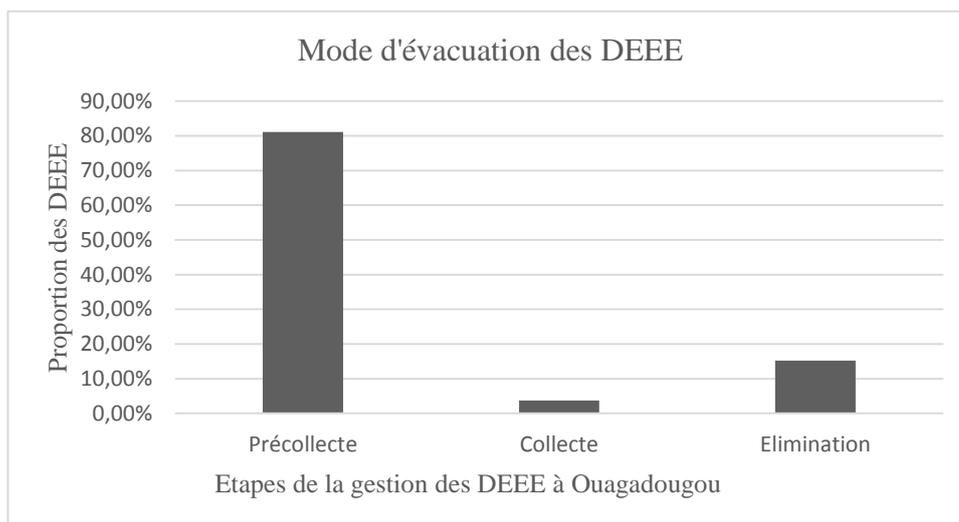


Figure 3: proportion des DEEE collectés et éliminés à Ouagadougou

2. Caractérisation orientée des DEEE de Ouagadougou pour une valorisation durable

Au total 88 EEE en fin de vie et regroupés en 17 types de DEEE ont été démantelés dans l'atelier de l'ABPEV. Environ 11,153 Kg de D3E ont été obtenus. Dix (10) fractions de matériaux ont pu être identifiées à la suite de ce démantèlement et présentées dans le tableau IV ci-dessous. Le plastique est la fraction prédominante avec 40,82% suivi des cartes électroniques 23,41% du poids total de déchets démantelés (figure 4). La proportion du plastique est en-deçà des 49,1% obtenus des petits DEEE en 2011 par Martinho (Martinho et al., 2012). Ce résultat pourrait s'expliquer par le fait que certaines pièces ou assemblages de nos déchets ont pu être soustraits ou remplacés avant leur collecte ou même au cours leur utilisation. La proportion du fer et l'aluminium est aussi significative avec respectivement 8,6 % et 7,14%. Cela présage déjà d'énormes possibilités de recyclage pour les artisans locaux notamment les fabricants d'ustensiles de cuisine en aluminium.

Tableau IV: compositions des DEEE démantelés

	Plastique	Fer	Aluminium	Cuivre	Carte imprimée	Ecran + verre	Haut parleur + écouteur + micro	Câbles	Batteries	Plaquette solaire	Masse totale
Masse (g)	4553	959	796	96	2611	173	470	309	1146	40	11153
% massique	40,82	8,60	7,14	0,86	23,41	1,55	4,21	2,77	10,28	0,36	100

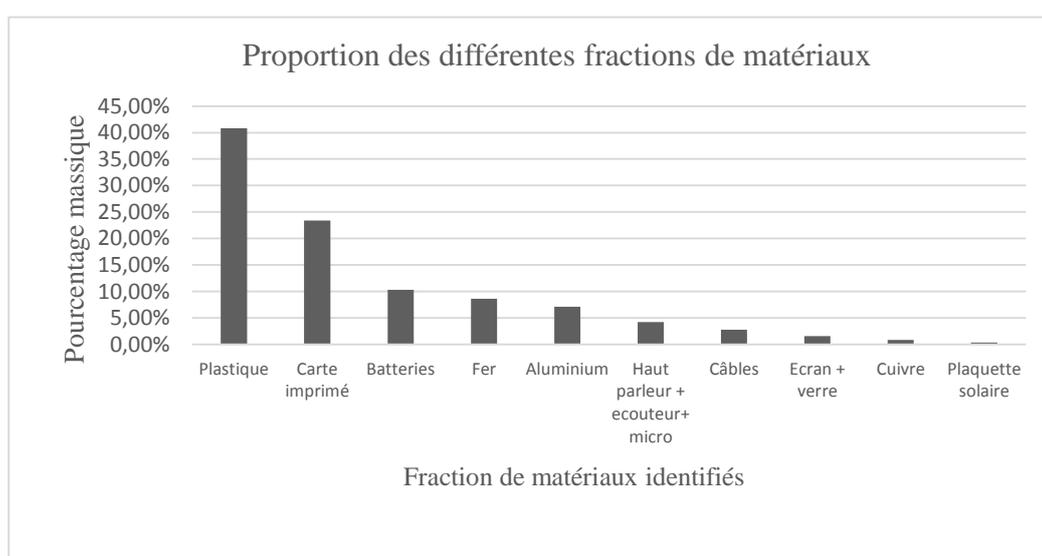


Figure 4: proportion des fractions obtenues du démantèlement

L'analyse des résultats obtenus du démantèlement (annexe VI et figure 5) montre une inégale répartition des matériaux dans les DEEE démantelés. En effet, les équipements n'ont ni le même nombre de matériaux ni les mêmes teneurs. Les pourcentages massiques varient de 0-44,5% de Fe et de 0-27,3% d'Al. Les teneurs élevées en fer s'observent au niveau des appareils photos, des dictaphones, des convertisseurs et des régulateurs solaires ainsi que des téléphones portables qui représentent plus de 14% des DEEE de Ouagadougou. On note que la majorité des équipements démantelés contiennent de grande quantité de plastiques avec des proportions allant de 9,1% dans les convertisseurs solaires à 83,3% dans les ports USB. Ces résultats peuvent orienter les recycleurs locaux sur le choix des types de DEEE à valoriser afin d'obtenir une plus-value.

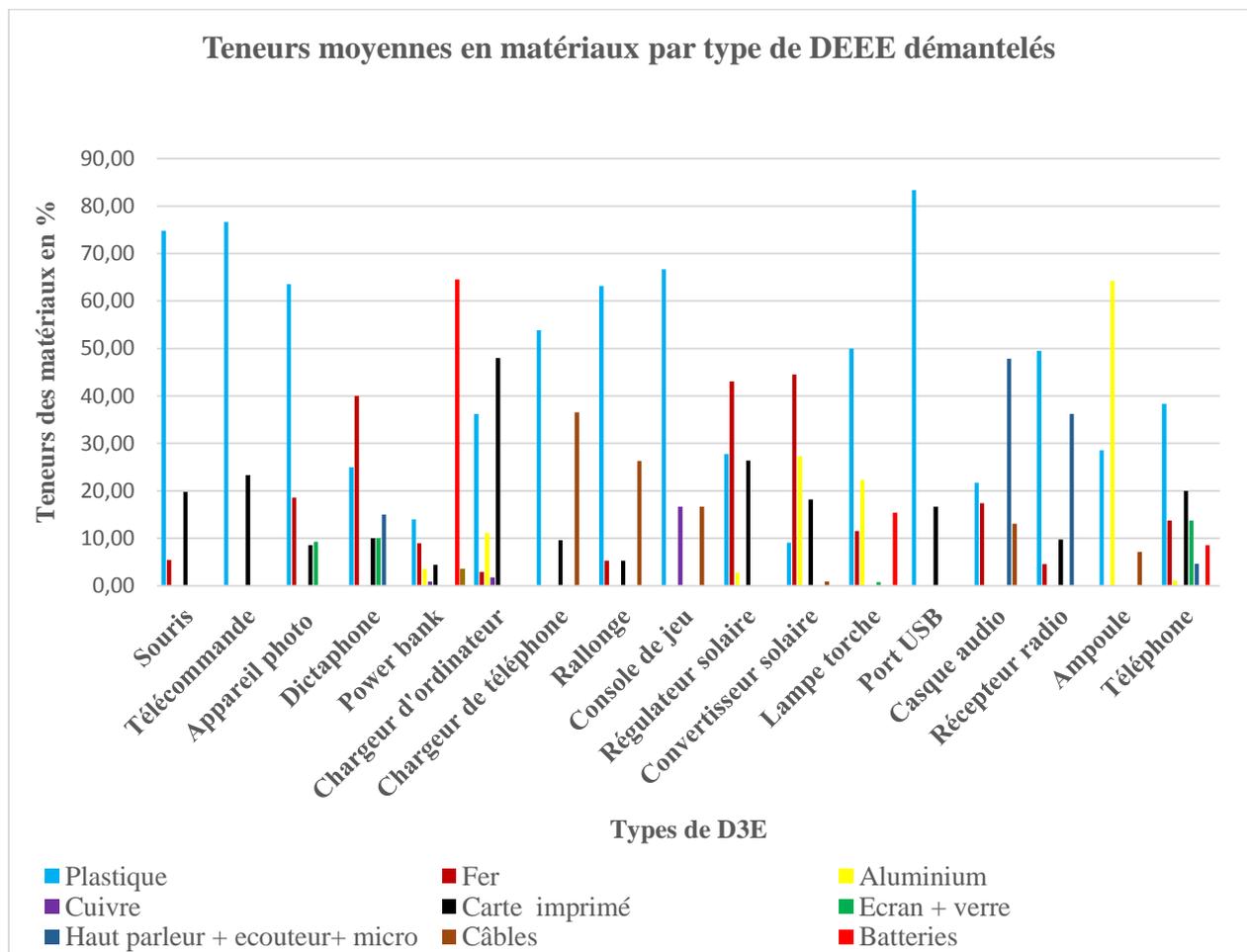


Figure 5: teneur moyennes en matériaux par type de DEEE

Parmi les équipements démantelés, 33 sont dotés de codes des résines. Environ 37,5% des appareils disposent de ces codes (tableau V). Ce qui a permis d'identifier une partie des polymères présents dans les coques plastiques. Environ 34,59% des plastiques ont pu être identifiés soit près de 1,575 Kg du poids total des plastiques obtenus du démantèlement (tableau VI). Ces résultats sont significatifs malgré le fait que l'application de ce code par les fabricants soit volontaire, non contraignante. De façon générale, cinq polymères ont été identifiés ainsi que deux mélanges de polymères: ABS, PC, PS, POP, le polystyrène choc, ABS/PC, PC/POP. On constate (figure 6) que les ABS et les PC sont les polymères prédominants avec respectivement 50,35% et 27,3% du poids total des plastiques identifiés. Il faut signaler qu'il est indispensable de connaître la nature du plastique pour envisager un quelconque recyclage.

Tableau V: proportion des équipements avec des codes de résine sur leurs coques plastiques

	Equipements avec code de résine	Equipements sans code de résine	Total
Nombre d'équipements	33	55	88
%	37,5	62,5	100

Tableau VI: proportion du plastique identifié grâce aux codes de résine

	Plastique avec code de résine	Plastique sans code de résine	Masse totale
Masse (g)	1 575	2 978	4 553
% massique	34,59	65,41	100

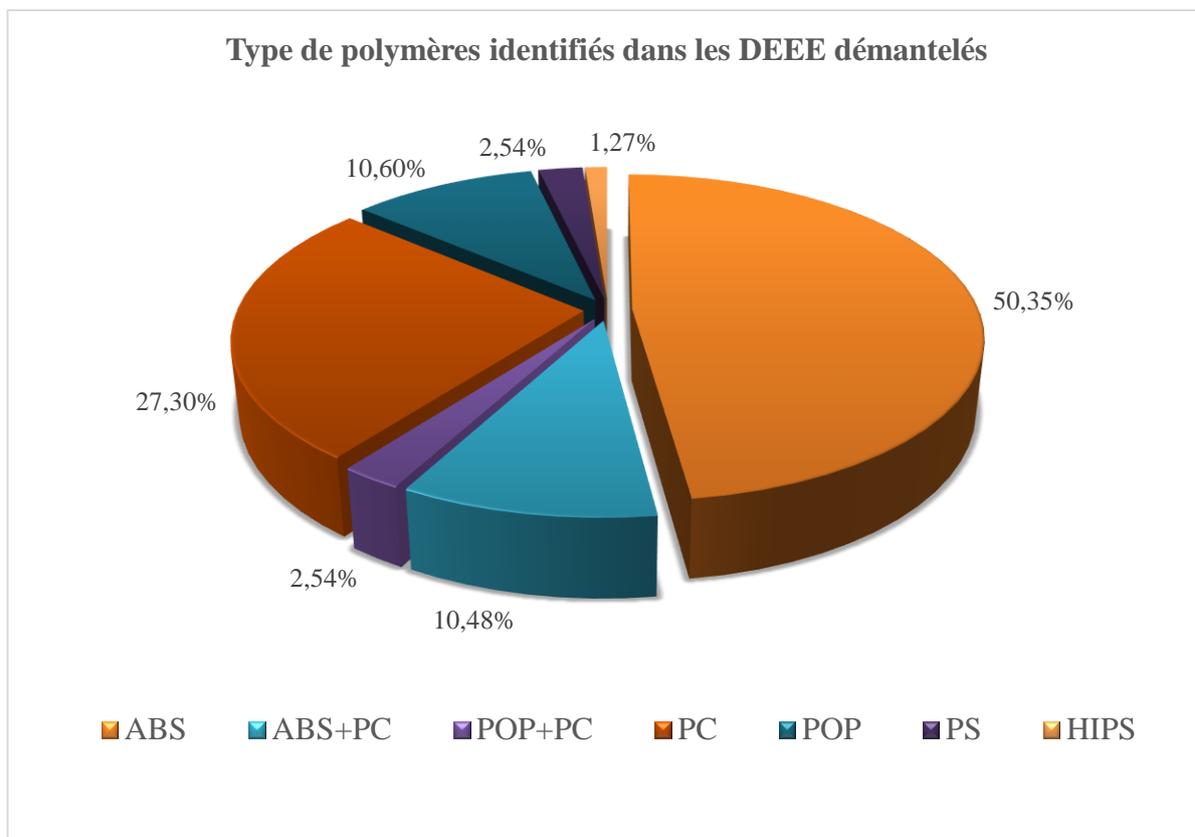


Figure 6: types de polymères identifiés grâce aux codes de résines

La figure 7 présente la classification des DEEE de la Ville de Ouagadougou selon la directive européenne de 2012 relative aux DEEE et qui classe ces derniers en 11 catégories. Ainsi, les 77 types de DEEE inventoriés dans la Ville ont été regroupés suivant cette classification. On note une forte domination des déchets de la catégorie équipements informatiques et de télécommunication avec 53,01%. Cette catégorie regroupe entre autres les imprimantes, les photocopieuses, les téléphones et les ordinateurs ainsi que leurs accessoires tels les chargeurs, les claviers, les souris, les moniteurs, les câbles, etc. Elle est suivie par les matériels grand public et les gros équipements électroménagers avec respectivement 20,06% et 9,31%. Cette classification bien que favorisant la collecte grâce au regroupement ne permette pas une analyse comparative en termes de risques sanitaires et environnementaux ou encore en termes de métaux valorisables. Pour investir dans un secteur d'activité, les investisseurs sont souvent attirés par ce qui peut leur apporter un gain ou une plus-value ou encore ce qu'ils risquent en plaçant leurs argents dans ce secteur. Une réponse que la classification européenne n'offre pas. Bien que les DEEE soient dangereux de par la présence des métaux lourds, force est de constater qu'une bonne classification permet de contrôler ces dangers et de récupérer la quasi-totalité des métaux valorisables. En effet, une gestion durable des DEEE suppose une gestion rationnelle des métaux dangereux et la récupération des matériaux pouvant être revalorisés. Pour ce faire, il est primordiale pour chaque déchet ou chaque groupe de DEEE, de connaître ce qu'on peut en tirer en termes de profits et ce qu'on risque au plan sanitaire et environnemental. D'où l'intérêt de la classification proposée dans cette étude.

Une autre classification des DEEE a en effet été obtenue grâce à l'analyse factorielle des variables descriptives c'est-à-dire les teneurs en métaux valorisables et en métaux dangereux. De façon générale, les déchets se distinguent par les variables plastique, verre_ceramic, Pb, Sn, Ni, Cu, Fe, Ba, Be, Sb, Cr, Cd, Al, cartes_électroniques, Pd, Hg et Ag.

Les variables plastique, verre_ceramic, Pb, Sn, Ni, Cu et Fe sont très fortement corrélées à la 1^{ère} composante principale. Elles contribuent à la construction de cet axe et apportent 27,01% des informations sur les DEEE (tableau VII). Les variables Ba, Be, cartes_électroniques, Sb et Cr quant à elles sont corrélées très négativement à la 2^e composante principale. Elles contribuent donc fortement à la formation de cet axe et apportent 19,5% des informations descriptives des DEEE. La 3^e composante est corrélée par les variables : Cd, Al et Pd et apporte 9,76% d'information dans la construction des groupes. La 4^e composante quant à elle est fortement corrélée par les variables Cd et Al. Elle apporte environ 8,86% des informations des groupes. La 5^e et la 6^e composante sont respectivement corrélées par les variables Hg et Ag et

apportent respectivement 7,08% et 5,61% des informations sur les groupes. Ces six premiers facteurs constituent les plus importants comme le témoignent les valeurs propres respectives. En effet, seules ces composantes ont leurs valeurs propres supérieures à la moyenne (annexe VII).

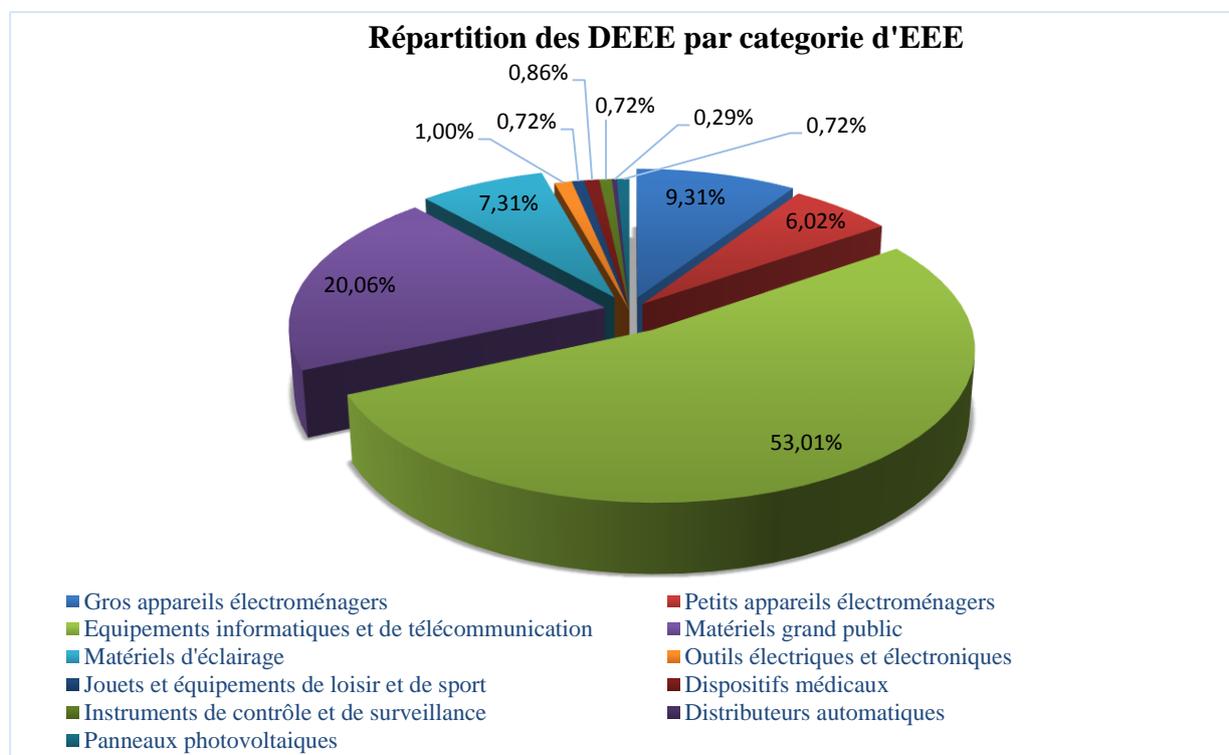


Figure 7: classification des DEEE selon la directive européenne

Tableau VII: formation des composantes principales

Variables	Axe_1		Axe_2		Axe_3		Axe_4		Axe_5		Axe_6	
	Corr.	% (Tot. %)										
Verre_ceramic	0,86215	74 % (74 %)	0,41608	17 % (92 %)	0,20612	4 % (96 %)	-0,10305	1 % (97 %)	0,01303	0 % (97 %)	-0,02947	0 % (97 %)
Pb	0,85034	72 % (72 %)	0,41276	17 % (89 %)	0,11566	1 % (91 %)	-0,19483	4 % (94 %)	-0,02765	0 % (95 %)	-0,00866	0 % (95 %)
Fe	0,84489	71 % (71 %)	0,318	10 % (81 %)	0,00669	0 % (82 %)	-0,06342	0 % (82 %)	-0,10613	1 % (83 %)	-0,03745	0 % (83 %)
Ni	0,83126	69 % (69 %)	0,42743	18 % (87 %)	0,13714	2 % (89 %)	-0,21309	5 % (94 %)	-0,02644	0 % (94 %)	-0,02799	0 % (94 %)
Cu	0,82897	69 % (69 %)	0,12229	1 % (70 %)	-0,14987	2 % (72 %)	0,10703	1 % (74 %)	-0,00623	0 % (74 %)	0,08916	1 % (74 %)
Plastique	0,82508	68 % (68 %)	0,17647	3 % (71 %)	0,0364	0 % (71 %)	-0,12658	2 % (73 %)	-0,02675	0 % (73 %)	-0,05859	0 % (73 %)
Sn	0,75024	56 % (56 %)	-0,14292	2 % (58 %)	-0,40598	16 % (75 %)	0,29848	9 % (84 %)	-0,0522	0 % (84 %)	0,30673	9 % (93 %)
Ba	0,29495	9 % (9 %)	-0,81279	66 % (75 %)	0,34182	12 % (86 %)	-0,22439	5 % (91 %)	-0,09987	1 % (92 %)	-0,02946	0 % (93 %)
Be	0,26939	7 % (7 %)	-0,79319	63 % (70 %)	0,20777	4 % (74 %)	-0,08572	1 % (75 %)	-0,18296	3 % (79 %)	0,08537	1 % (79 %)
Cartes_electroniques	0,35364	13 % (13 %)	-0,67183	45 % (58 %)	-0,00214	0 % (58 %)	0,23494	6 % (63 %)	-0,46965	22 % (85 %)	-0,07527	1 % (86 %)
Sb	0,22453	5 % (5 %)	-0,61218	37 % (43 %)	-0,14139	2 % (45 %)	-0,16086	3 % (47 %)	0,49463	24 % (72 %)	-0,20503	4 % (76 %)
Cr	0,15494	2 % (2 %)	-0,60812	37 % (39 %)	0,2909	8 % (48 %)	-0,42559	18 % (66 %)	0,29465	9 % (75 %)	0,0416	0 % (75 %)
Cd	0,08273	1 % (1 %)	-0,07769	1 % (1 %)	0,68366	47 % (48 %)	0,65619	43 % (91 %)	0,24177	6 % (97 %)	-0,04186	0 % (97 %)
Al	0,22092	5 % (5 %)	0,11046	1 % (6 %)	0,57085	33 % (39 %)	0,6769	46 % (85 %)	0,34518	12 % (96 %)	0,03541	0 % (97 %)
Pd	0,45314	21 % (21 %)	-0,49464	24 % (45 %)	-0,50182	25 % (70 %)	0,40224	16 % (86 %)	0,02144	0 % (86 %)	-0,16604	3 % (89 %)
Hg	0,13539	2 % (2 %)	-0,45794	21 % (23 %)	0,35128	12 % (35 %)	-0,00728	0 % (35 %)	-0,53015	28 % (63 %)	-0,28244	8 % (71 %)
Ag	0,29385	9 % (9 %)	-0,1208	1 % (10 %)	-0,29544	9 % (19 %)	0,07517	1 % (19 %)	0,34606	12 % (31 %)	-0,70877	50 % (82 %)
Batterie	-0,01895	0 % (0 %)	-0,03583	0 % (0 %)	0,06903	0 % (1 %)	-0,02581	0 % (1 %)	-0,23604	6 % (6 %)	-0,21539	5 % (11 %)
Materiaux_ferreux	0,12612	2 % (2 %)	-0,24652	6 % (8 %)	-0,40068	16 % (24 %)	0,13989	2 % (26 %)	0,19563	4 % (30 %)	-0,06217	0 % (30 %)
Au	0,25957	7 % (7 %)	-0,41504	17 % (24 %)	0,1491	2 % (26 %)	-0,41619	17 % (44 %)	0,4493	20 % (64 %)	0,31547	10 % (74 %)
Zn	0,24673	6 % (6 %)	-0,44155	19 % (26 %)	-0,2803	8 % (33 %)	0,27543	8 % (41 %)	-0,01304	0 % (41 %)	0,49914	25 % (66 %)
Variable_Explicative	5,67126	27 % (27 %)	4,09602	20 % (47 %)	2,04983	10 % (56 %)	1,86007	9 % (65 %)	1,48679	7 % (72 %)	1,17781	6 % (78 %)

Nous optons de retenir ces six facteurs pour la classification des groupes. Ils restituent jusqu'à 77,82% des informations sur les groupes de DEEE. Pour représenter les individus dans un plan, nous retiendront les deux premiers axes qui cumulent 46,51% des informations. Ce taux faible montre que ces variables ne suffisent pas à elles seules pour décrire un DEEE, il faut donc inclure d'autres variables. Il ressort de la classification deux groupes de déchets (figure 8a et 8b). L'indicateur «valeur test» ou en anglais «test value» nous permet de hiérarchiser les variables selon leur pertinence dans la description des différents groupes (Rakotomalala, 2008). En effet, une gestion durable des DEEE suppose une gestion rationnelle des métaux dangereux et la récupération des matériaux pouvant être revalorisés. Pour ce faire, il est primordiale pour chaque déchet ou chaque groupe de DEEE, de connaître ce qu'on peut en tirer en termes de profits et ce qu'on risque au plan sanitaire et environnemental. D'où l'intérêt de la classification proposée dans cette étude.

Le groupe 1 est constitué de 66 types de DEEE soit près de 86,8% des types de déchets (tableau VIII). Il se distingue particulièrement par sa proportion en batteries. En effet, la moyenne en batterie dans l'ensemble des DEEE est de 9544,48 tandis que le groupe 1, elle est de 9844,54. Les déchets qui composent ce groupe renfermeraient donc plus de batteries (VT = 0,05). Ils ont cependant de faibles teneurs en Cd (VT = - 0,5) ; Al (VT = - 0,63) ; matériaux ferreux (VT = - 1,82) ; Pb (VT = - 2,83) ; Au (VT = - 3,83) ; Cu (VT = - 4,69) ; cartes électroniques (VT = - 5,62) et en Pd (VT = - 6,74). Les teneurs moyennes dans l'ensemble sont respectivement de 7,25 mg/unité ; 32210,53 mg/kg ; 60970,66 mg/kg ; 6790,79 mg/unité ; 65,09 mg/unité ; 33447,37 mg/kg ; 15394,74 mg/kg et 3,01 mg/unité. Dans ce sous-groupe, elles sont de 6,17mg/unité ; 27454,55 mg/kg ; 49900,06 mg/kg ; 33,33mg/unité ; 0,36mg/unité ; 2469,7 mg/kg ; 3696,97mg/kg et 0,06mg/unité. Cela peut être lié au fait que beaucoup de déchets de ce groupe n'ont pas fait l'objet d'une caractérisation approfondie. Ce groupe est constitué des postes radio, des power bank, des congélateurs, des réfrigérateurs, des pinces à lisser, des fers à repasser, des montres, des perceuses, des baffles, etc.

Le groupe 2 est constitué de dix types de DEEE soit près 13,2% des types de déchets (tableau IX). Ce groupe est surtout marqué par ses fortes teneurs en métaux de valeur tels le cuivre, l'aluminium, le fer mais surtout en métaux précieux notamment l'or, l'argent et le palladium. Certaines variables telles les teneurs en Pd (VT = 6,74) ; Sn (VT = 6,29) ; cartes électroniques (VT = 5,69) ; Cu (VT = 4,69) ; Au (VT = 3,83) ; Ag (VT = 3,74) ; Al (VT = 0,63) et Cd (VT = 0,5) sont très représentatives dans ce groupe. En effet, les concentrations moyennes dans l'ensemble des déchets sont de 3,01 mg/unité de Pd ; 1660,74 mg/kg de Sn ; 15394,74

mg/kg de cartes électroniques; 33447,37 mg/kg de cuivre; 65,09 mg/unité d'or; 125,49 mg/unité d'argent ; 32210,53 mg/kg d'aluminium et 7,25 mg/unité de cadmium.

Dans ce groupe, elles atteignent respectivement 22,47 mg/unité, 11700 mg/kg, 92600 mg/kg, 237900 mg/kg, 492,36 mg/unité, 944 mg/unité, 63600 mg/kg et 14,38 mg/unité. La proportion en batterie y est légèrement faible (VT =-0,05). La moyenne dans l'ensemble est 9670,07 mg/kg tandis que dans ce groupe elle n'est que de 8518,52 mg/kg.

Il est composé des téléphones, des ordinateurs, des tablettes, des imprimantes, des moniteurs, des téléviseurs écrans plats, des lecteurs DVD et des appareils photos numériques. Ce groupe regroupe donc les déchets à forte teneur en métaux de grande valeur économique en particulier en métaux précieux (Alzate et al., 2016; Bakas, 2016; Cucchiella et al., 2015; Morf et al., 2007; Oguchi et al., 2011). Toutefois, ce groupe renferme quelques métaux dangereux notamment le baryum et le béryllium (Cucchiella et al., 2015; Nnorom and Osibanjo, 2009; Oguchi et al., 2011, 2013). Les moyennes de ces éléments sont respectivement de 1114,12 mg/unité et 1,23 mg/unité dans l'ensemble tandis que dans ce groupe elles passent respectivement à 7090 mg/unité et 9,40 mg/unité. Le recyclage des déchets de ce groupe offre de grandes opportunités économiques au regard des énormes quantités de métaux précieux dont ils renferment.

Au cours de la classification, il est apparu un individu atypique c'est-à-dire un type de déchet qui se distingue nettement des autres DEEE de par ses caractéristiques. Ce dernier a été retiré de l'analyse pour former un groupe. Il s'agit des téléviseurs à tubes cathodiques (annexe V). Soit 1,3% des types de DEEE de la Ville. Ces déchets se distinguent surtout par leurs fortes teneurs en métaux toxiques notamment le plomb, l'antimoine, le baryum. En effet, la concentration moyenne en plomb dans les téléviseurs à tubes cathodiques peut atteindre jusqu'à 1319 g/unité. Selon (Oguchi et al., 2013) ils peuvent jusqu'à 2400mg/kg de baryum et 3200mg/kg d'antimoine. Les tubes cathodiques des postes téléviseurs et moniteurs contiennent énormément de plomb (Cucchiella et al., 2015; Li et al., 2006; Musson et al., 2000; Oguchi et al., 2012, 2013) et contribuent à environ 98,7% de tout le plomb provenant des DEEE (Musson et al., 2000). Les énormes quantités de Pb et Ba sont liées en leur utilisation dans la fabrication des tubes cathodiques. Ils contiennent quelques matériaux valorisables tels le plastique, le cuivre, le zinc, l'aluminium, l'étain et le verre avec respectivement 8755 g/unité ; 656 g/unité ; 8,6 g/unité ; 67 g/unité ; 32g/unité et 15760 g/unité. Cependant, ils ne renferment aucun métal précieux. (Cucchiella et al., 2015). Le recyclage de ce groupe de déchets bien que indispensable pour la protection de la santé et l'environnement, implique de disposer de moyens et d'équipement

adaptés à la hauteur du risque. De nos jours grâce à l'évolution technologique, ces téléviseurs sont remplacés progressivement par ses téléviseurs à écrans plats avec moins de métaux toxiques que les prédécesseurs.

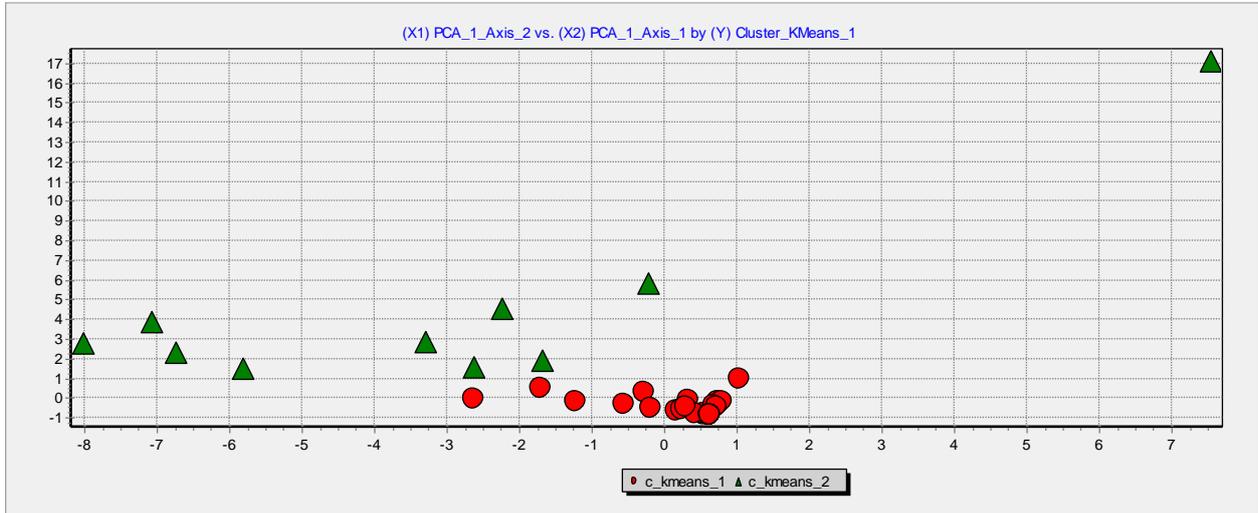


Figure 8a: représentation des groupes dans le premier plan factoriel

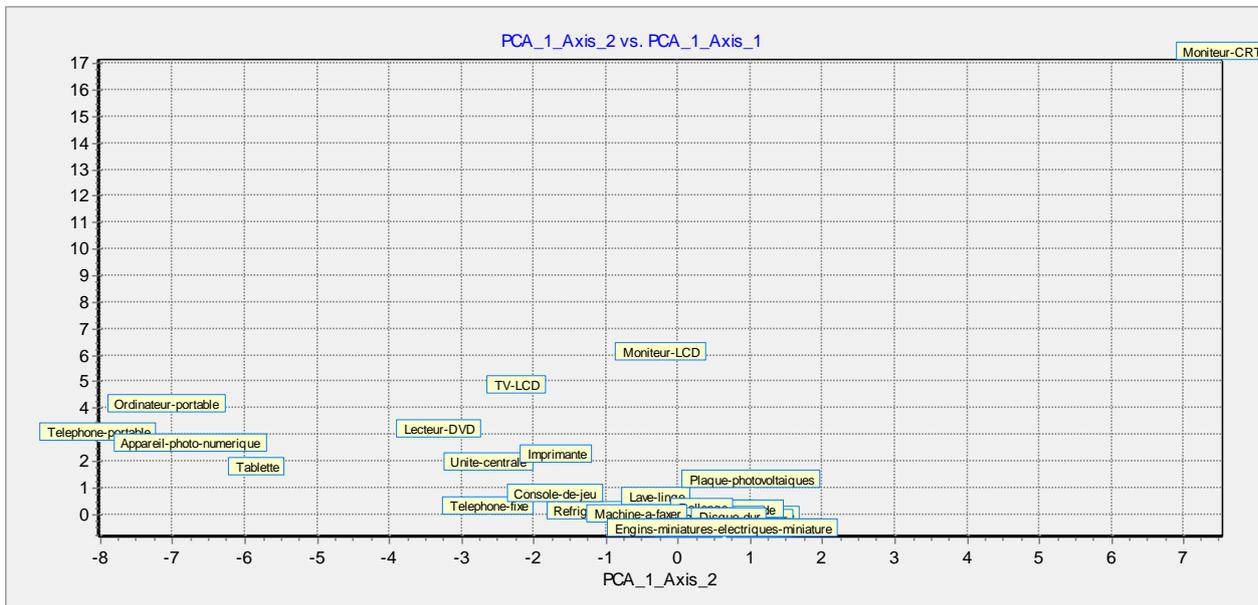


Figure 8b: représentation des individus dans le premier plan factoriel

Tableau VIII: caractéristiques du groupe 1

Description du groupe 1			
Individus			[86,8 %] 66
Variables descriptives	Valeur Test	Sous-Groupe 1	Ensemble
Variables quantitatives : Moyennes (Ecart-type)			
Batterie	0,05	9844,54 (79479,04)	9670,07 (74578,44)
Cd	-0,5	6,17 (50,10)	7,25 (47,81)
Al	-0,63	27454,55 (176357,78)	32210,53 (167482,48)
Materiaux_ferreux	-1,82	49900,06 (129234,77)	60970,66 (135489,26)
Menage	-2,23	4,83 (9,31)	6,09 (12,53)
Entreprise_service_reparateur	-2,41	2,15 (2,97)	2,53 (3,47)
Hg	-2,56	0,00 (0,00)	13,18 (114,70)
Ni	-2,57	0,00 (0,00)	2637,26 (22825,01)
Pb	-2,83	33,33 (270,80)	6790,79 (53215,83)
Verre_ceramic	-2,83	14681,82 (119275,65)	115735,45 (793109,79)
Cr	-2,93	66,48 (440,29)	135,79 (525,48)
Ag	-3,7	1,47 (7,39)	125,49 (745,95)
Fe	-3,71	2696,97 (14049,33)	82132,07 (476435,67)
Au	-3,83	0,36 (2,18)	65,09 (376,17)
Sb	-3,95	117,73 (510,81)	225,39 (605,90)
Plastique	-4,09	73411,26 (193049,45)	145290,66 (391299,14)
Zn	-4,13	42,42 (298,75)	697,38 (3530,06)
Cu	-4,69	2469,70 (12893,91)	33447,37 (146831,91)
Be	-5,15	0,00 (0,00)	1,25 (5,40)
Cartes_electroniques	-5,62	3696,97 (16748,80)	15394,74 (46332,73)
Ba	-5,69	160,41 (846,87)	1097,20 (3664,76)
Sn	-6,29	139,64 (1120,00)	1660,74 (5379,23)
Pd	-6,74	0,06 (0,37)	3,01 (9,73)

Tableau IX: caractéristiques du groupe 2

Description du groupe 2			
Individus			[13,2 %] 10
Variables descriptives	Valeur Test	Sous-Groupe 2	Ensemble
Variables quantitatives: Moyennes (Ecart-type)			
Pd	6,74	22,47 (17,43)	3,01 (9,73)
Sn	6,29	11700,00 (10154,91)	1660,74 (5379,23)
Ba	5,69	7280,00 (7604,65)	1097,20 (3664,76)
Cartes_electroniques	5,62	92600,00 (90757,55)	15394,74 (46332,73)
Be	5,15	9,50 (12,49)	1,25 (5,40)
Cu	4,69	237900,00 (353525,25)	33447,37 (146831,91)
Zn	4,13	5020,10 (8904,59)	697,38 (3530,06)
Plastique	4,09	619694,70 (847847,57)	145290,66 (391299,14)
Sb	3,95	936,00 (727,19)	225,39 (605,90)
Au	3,83	492,36 (972,40)	65,09 (376,17)
Fe	3,71	606403,70 (1240359,61)	82132,07 (476435,67)
Ag	3,7	944,00 (1944,08)	125,49 (745,95)
Cr	2,93	593,20 (795,79)	135,79 (525,48)
Verre_ceramic	2,83	782689,40 (2137749,17)	115735,45 (793109,79)
Pb	2,83	51390,00 (145099,56)	6790,79 (53215,83)
Ni	2,57	20043,20 (62879,86)	2637,26 (22825,01)
Hg	2,56	100,20 (316,16)	13,18 (114,70)
Entreprise_service_reparateur	2,41	5,00 (5,33)	2,53 (3,47)
Menage	2,23	14,40 (24,38)	6,09 (12,53)
Materiaux_ferreux	1,82	134036,60 (159763,60)	60970,66 (135489,26)
Al	0,63	63600,00 (88693,23)	32210,53 (167482,48)
Cd	0,5	14,38 (29,27)	7,25 (47,81)
Batterie	-0,05	8518,52 (26937,92)	9670,07 (74578,44)

3. Filières de valorisation des DEEE de Ouagadougou

Les déchets électroniques contiennent des éléments très variés. Si certains sont valorisables, d'autres par contre sont dangereux voir toxiques pour l'homme et l'environnement. On a des métaux précieux (Ag, Pd, Au, Pt, etc.), des métaux de « base » (Fe, Cu, Al, etc.) ; des métaux rares (Ce, Y, Eu, etc.), des plastiques et des métaux toxiques tels que le Pb, le Hg, le Cd, les PBDE, les PBB, etc. Cette diversité et la présence de métaux dangereux rendent très souvent le traitement des DEEE complexe et très couteux. Plusieurs filières de valorisation existent de nos jours. Une étude comparative de quelques filières de valorisation est proposée dans le tableau VI.

La réutilisation des composantes semble la mieux adaptée en ce sens qu'elle permet de prolonger la durée de vie des équipements et est facile à réaliser car nécessite peu d'investissement. Les procédés hydrométallurgique et bio-hydrométallurgique offrent également de bonnes perspectives au regard des forts taux de récupérations des métaux à grande valeurs économiques tels l'or, le cuivre, l'aluminium, etc.

Contrairement aux procédés pyrométallurgique et hydrométallurgique, la bio-hydrométallurgie est quasiment non polluante et les microorganismes impliqués sont faciles à cultiver et accessibles partout. Elle pourrait également occuper une place de choix dans le recyclage des DEEE à Ouagadougou.

Tableau X: proposition de filières de valorisation des DEEE de Ouagadougou

Filières de valorisation		Descriptions	Types de DEEE concernés	Faisabilité au Burkina Faso
Réutilisation des composantes électroniques		Retrait des composantes électroniques fonctionnelles réutilisables comme pièces de rechange ou réintroduites dans la chaîne de fabrication	Téléphones portables Ordinateurs Tablettes Téléviseurs Imprimantes Photocopieuses, etc.	Techniquement réalisable. Moins coûteux, Non polluante et nécessite peu de technicité
Valorisation énergétique		Incinération des DEEE en particulier les coques plastiques avec récupération d'énergie	Coques plastiques des DEEE	Techniquement réalisable mais très polluante et dangereuse (fumée très toxique) Nécessite de gros investissement (Incinérateur et système de filtration des fumées)
Procédés métallurgiques	Pyrométallurgie	Incinération ou pyrolyse des DEEE puis récupération des métaux	Cartes électroniques des téléphones, ordinateurs, moniteurs, téléviseurs écran plat, etc.	Très coûteux et nécessite beaucoup d'énergie Pollutions par les fumées et perte énorme de métaux
		Dissolution des métaux dans des bains d'acides ou de bases fortes	Cartes électroniques des téléphones, ordinateurs,	Techniquement réalisable. Pas d'investissement spécifique sauf les équipements anticorrosifs, la fosse d'eau

	Hydrométallurgie	puis purification et récupération par échange d'ions, cémentation, adsorption, électrolyse, etc.	moniteurs, téléviseurs écran plat, etc.	usée. Permet de récupérer de façon sélective de nombreux métaux avec un taux de récupération élevé mais nécessite. Possibilité de recycler les réactifs utilisés. Toxicité selon les réactifs
	Bio hydrométallurgie	Utilisation de micro-organisation (bactéries, algues, champignons, levures) pour accumuler les métaux	Tout substrat de DEEE	Techniquement réalisable: respectueuse de l'environnement et les micro-organismes sont faciles à cultiver. Technologie en phase de développement

En résumé on peut dire que le procédé hydrométallurgique est la mieux indiquée pour l'ABPEV et plus généralement pour le Burkina Faso au regard des nombreux avantages qu'il offre. Il faut ajouter que cette technologie est très développée.

IV CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'objectif global de cette étude est de contribuer au développement de l'économie verte en Afrique sub-saharienne grâce à une gestion durable des DEEE. Elle a en effet révélé l'existence de 77 types de déchets d'équipements électroniques et électriques dans la Ville de Ouagadougou avec une prédominance des téléphones portables (14,61%) et leurs (9,74%) suivis respectivement des téléviseurs à tube cathodique (6,16%), des ampoules (5,87%) et des écouteurs (5,73%). Les DEEE des catégories ``équipements informatiques et télécommunication`` et ``matériels grand public`` sont les plus abondants avec respectivement 50,01% et 20,06% des déchets de la Ville.

Toutefois, le niveau de valorisation est très faible et la majeure partie des déchets sont stockés dans les lieux de production. En effet selon l'étude, plus de 80% des DEEE sont stockés dans les ménages, les ateliers de réparation ou encore dans les entreprises et services. Seuls 3,72% sont collectés en vue d'une valorisation et près de 15% des déchets sont brûlés ou abandonnés dans les voies publiques.

La caractérisation a montré que la composition de ces déchets est très variée. Si certains déchets tels les téléphones et les ordinateurs sont très riches en métaux valorisables, d'autres par contre renferment de fortes teneurs en métaux lourds en particulier le plomb, le baryum ou encore le cadmium. La gestion des tubes cathodiques est très problématique et nécessite de gros investissements en raison des fortes teneurs en métaux lourds. Par ailleurs, l'absence de métaux précieux dans ce type de déchets peut attirer moins de recycleurs car la rentabilité des filières de valorisation est très souvent liée au prix des métaux de grande valeur économique.

Une mauvaise gestion des déchets peut donc être source de graves problèmes de santé et de pollutions environnementales. En outre, dans ce contexte de rareté de matières premières, recycler les énormes quantités de métaux dont ils renferment est un impératif économique. Cependant, la classification européenne des DEEE basée sur les catégories d'EEE est peu adaptée aux pays à faible revenus qui ne disposent pas de moyens sophistiqués pour le traitement et le recyclage de ces déchets.

La classification proposée dans cette étude regroupe les DEEE dans des groupes homogènes en termes de métaux valorisables et métaux dangereux pour l'homme et l'environnement. Plus qu'un simple regroupement, cette classification montre les teneurs moyennes des métaux dans chaque groupe de déchet. Ce qui permet aux investisseurs de faire un choix éclairé afin de maximiser les profits mais surtout de connaître à priori les risques et les

avantages liés à la valorisation de chaque type de DEEE. Cette classification va sans aucun doute attirer davantage d'investisseurs dans la valorisation des DEEE. Elle est facile à comprendre en ce sens qu'elle présente les différents groupes sous l'angle risques et profits liés à la récupération des métaux valorisables. Il sera encore plus rentable pour l'ABPEV de collecter et valoriser tous les déchets du groupe 2 proposé dans la classification plutôt que de s'intéresser uniquement aux déchets de téléphones. Ces derniers présentent les mêmes caractéristiques que les ordinateurs, les lecteurs DVD, ou encore les appareils photo numériques en termes de concentration en métaux lourds et en métaux valorisables notamment l'or, l'argent, le cuivre, le palladium, etc.

En conclusion, loin d'être un poison, les DEEE constituent une véritable mine d'or et pourraient être source de matières premières et d'emplois pour les populations s'ils sont bien gérés.

En perspective, une estimation des gisements de DEEE générés au Burkina Faso serait indispensable pour le choix futur des filières de valorisation.

V RECOMMANDATIONS

La présence d'éléments toxiques pour l'homme et l'environnement dans les DEEE font d'eux des déchets dangereux. Il sera donc indispensable d'encadrer la gestion de ces déchets par des textes spécifiques.

Bien que de nombreux pays de l'Afrique sub-saharienne ne soient pas de producteurs d'EEE, l'expérimentation du principe de responsabilité élargie des producteurs (REP) peut contribuer à mobiliser les fonds pour la gestion des DEEE. Ce principe s'applique aussi aux importateurs d'EEE et pourrait se faire sous forme de garantie financière avant l'importation d'un équipement électrique et électronique. Ces fonds collectés pourront ensuite servir à subventionner les recycleurs ou à financer les activités de collecter ou de traitement des déchets.

Aussi la diversité et la complexité des éléments contenus dans les DEEE rendent compliquées leur caractérisation. Il est nécessaire de disposer de moyens en équipements tels les broyeurs de déchets et les spectromètres pour faciliter la caractérisation.

Enfin, les populations devraient être sensibilisées au tri des DEEE pour éviter que ceux-ci ne soient brûlés ou mélangés aux déchets solides municipaux.

VI BIBLIOGRAPHIE

- Akcil, A., Erust, C., Gahan, C.S., Ozgun, M., Sahin, M., and Tuncuk, A. (2015). Precious metal recovery from waste printed circuit boards using cyanide and non-cyanide lixivants—a review. *Waste Manag.* *45*, 258–271.
- Allsopp, M., Santillo, D., and Johnston, P. (2006). Environmental and human health concerns in the processing of electrical and electronic waste. Greenpeace Res. Lab. Dep. Biol. Sci. Univ. Exeter.
- Alzate, A., López, M.E., and Serna, C. (2016). Recovery of gold from waste electrical and electronic equipment (WEEE) using ammonium persulfate. *Waste Manag.* *57*, 113–120.
- Bakas, I. (2016). Critical metals in discarded electronics: Mapping recycling potentials from selected waste electronics in the Nordic region (Nordic Council of Ministers).
- Balde, C.P., Kuehr, R., Blumenthal, K., Gill, S.F., Kern, M., Micheli, P., Magpantay, E., and Huisman, J. (2015). E-waste statistics: Guidelines on classifications, reporting and indicators. U. N. Univ. IAS-SCYCLE Bonn Ger.
- Basel Action, N. (2005). The digital dump: Exporting re-use and abuse to Africa. Basel Action Netw. Available [Httpwww Ban Org](http://www.Ban Org) Accessed 24 Oct. 2005.
- Brandl, H., Bosshard, R., and Wegmann, M. (2001). Computer-munching microbes: metal leaching from electronic scrap by bacteria and fungi. *Hydrometallurgy* *59*, 319–326.
- Chancerel, P., Meskers, C.E., Hagelüken, C., and Rotter, V.S. (2009). Assessment of precious metal flows during preprocessing of waste electrical and electronic equipment. *J. Ind. Ecol.* *13*, 791–810.
- Chi, X., Streicher-Porte, M., Wang, M.Y., and Reuter, M.A. (2011). Informal electronic waste recycling: a sector review with special focus on China. *Waste Manag.* *31*, 731–742.
- Code de l'environnement, B.F. (2013). Loi N°006-2013/AN du 02 avril 2013 portant code de l'environnement du Burkina Faso.
- Creamer, N.J., Baxter-Plant, V.S., Henderson, J., Potter, M., and Macaskie, L.E. (2006). Palladium and gold removal and recovery from precious metal solutions and electronic scrap leachates by *Desulfovibrio desulfuricans*. *Biotechnol. Lett.* *28*, 1475–1484.
- Crowe, M., Elser, A., Gopfert, B., Mertins, L., Meyer, T., Schmid, J., Spillner, A., and Strobel, R. (2003). Waste from electrical and electronic equipment (WEEE)-quantities, dangerous substances and treatment methods. *Tsotsos Eur. Top. Cent. Waste Eur. Environ. Agency EEA*.
- Cucchiella, F., D'Adamo, I., Koh, S.L., and Rosa, P. (2015). Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. *Renew. Sustain. Energy Rev.* *51*, 263–272.
- Cucchiella, F., D'Adamo, I., Rosa, P., and Terzi, S. (2016). Automotive printed circuit boards recycling: an economic analysis. *J. Clean. Prod.* *121*, 130–141.

Directive DEEE (2003). DIRECTIVE 2002/96/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 27 janvier 2003 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE).

Directive DEEE, U. (2012). Directive 2012/19/UE du 4 juillet 2012.

Directive LdSD, D. (2003). Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. *Off. J. Eur. Union* 13, L37.

Ghosh, B., Ghosh, M.K., Parhi, P., Mukherjee, P.S., and Mishra, B.K. (2015). Waste printed circuit boards recycling: an extensive assessment of current status. *J. Clean. Prod.* 94, 5–19.

Ha, V.H., Lee, J., Jeong, J., Hai, H.T., and Jha, M.K. (2010). Thiosulfate leaching of gold from waste mobile phones. *J. Hazard. Mater.* 178, 1115–1119.

Havlik, T., Orac, D., Petranikova, M., Miskufova, A., Kukurugya, F., and Takacova, Z. (2010). Leaching of copper and tin from used printed circuit boards after thermal treatment. *J. Hazard. Mater.* 183, 866–873.

Israel, G.D. (1992). Determining sample size.

Li, H., Eksteen, J., and Oraby, E. (2018). Hydrometallurgical recovery of metals from waste printed circuit boards (WPCBs): Current status and perspectives—A review. *Resour. Conserv. Recycl.* 139, 122–139.

Li, J., Zeng, X., Chen, M., Ogunseitan, O.A., and Stevels, A. (2015). “Control-Alt-Delete”: rebooting solutions for the e-waste problem. *Environ. Sci. Technol.* 49, 7095–7108.

Li, Y., Richardson, J.B., Walker, A.K., and Yuan, P.-C. (2006). TCLP heavy metal leaching of personal computer components. *J. Environ. Eng.* 132, 497–504.

Marra, A., Cesaro, A., and Belgiorno, V. (2018). Separation efficiency of valuable and critical metals in WEEE mechanical treatments. *J. Clean. Prod.* 186, 490–498.

Martinho, G., Pires, A., Saraiva, L., and Ribeiro, R. (2012). Composition of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE) by direct sampling. *Waste Manag.* 32, 1213–1217.

Montero, R., Guevara, A., and De La Torre, E. (2012). Recovery of gold, silver, copper and niobium from printed circuit boards using leaching column. *J Earth Sci Eng* 2, e595.

Morf, L.S., Tresp, J., Gloor, R., Schuppisser, F., Stengele, M., and Taverna, R. (2007). Metals, non-metals and PCB in electrical and electronic waste – Actual levels in Switzerland. *Waste Manag.* 27, 1306–13016.

Mundada, M.N., Kumar, S., and Shekdar, A.V. (2004). E-waste: a new challenge for waste management in India. *Int. J. Environ. Stud.* 61, 265–279.

Musson, S.E., Jang, Y.-C., Townsend, T.G., and Chung, I.-H. (2000). Characterization of lead leachability from cathode ray tubes using the toxicity characteristic leaching procedure. *Environ. Sci. Technol.* 34, 4376–4381.

- Nnorom, I.C., and Osibanjo, O. (2008). Electronic waste (e-waste): Material flows and management practices in Nigeria. *Waste Manag.* 28, 1472–1479.
- Nnorom, I.C., and Osibanjo, O. (2009). Toxicity characterization of waste mobile phone plastics. *J. Hazard. Mater.* 161, 183–188.
- Oguchi, M., Murakami, S., Sakanakura, H., Kida, A., and Kameya, T. (2011). A preliminary categorization of end-of-life electrical and electronic equipment as secondary metal resources. *Waste Manag.* 31, 2150–2160.
- Oguchi, M., Sakanakura, H., Terazono, A., and Takigami, H. (2012). Fate of metals contained in waste electrical and electronic equipment in a municipal waste treatment process. *Waste Manag.* 32, 96–103.
- Oguchi, M., Sakanakura, H., and Terazono, A. (2013). Toxic metals in WEEE: characterization and substance flow analysis in waste treatment processes. *Sci. Total Environ.* 463, 1124–1132.
- Oh, C.J., Lee, S.O., Yang, H.S., Ha, T.J., and Kim, M.J. (2003). Selective leaching of valuable metals from waste printed circuit boards. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 53, 897–902.
- Quinet, P., Proost, J., and Van Lierde, A. (2005). Recovery of precious metals from electronic scrap by hydrometallurgical processing routes. *Min. Metall. Explor.* 22, 17–22.
- Rakotomalala, R. (2008). *Fr_Tanagra_Comprendre_L'importance_De_La_Valeur_Test*.
- RGPH (2006). Résultats définitifs du Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) du Burkina Faso.
- Schluep, M., Hagelüken, C., Kuehr, R., Magalini, F., Maurer, C., Meskers, C.E., Mueller, E., and Wang, F. (2009). *Recycling—from E-waste to Resources*. United Nations Environment Programme and United Nations University, Germany.
- Silvas, F.P., Correa, M.M.J., Caldas, M.P., de Moraes, V.T., Espinosa, D.C., and Tenório, J.A. (2015). Printed circuit board recycling: physical processing and copper extraction by selective leaching. *Waste Manag.* 46, 503–510.
- Syed, S. (2006). A green technology for recovery of gold from non-metallic secondary sources. *Hydrometallurgy* 82, 48–53.
- Syed, S. (2016). Silver recovery aqueous techniques from diverse sources: Hydrometallurgy in recycling. *Waste Manag.* 50, 234–256.
- Wang, H., Zhang, S., Li, B., Pan, D., Wu, Y., and Zuo, T. (2017). Recovery of waste printed circuit boards through pyrometallurgical processing: A review. *Resour. Conserv. Recycl.* 126, 209–218.
- Yu, D., Duan, H., Song, Q., Liu, Y., Li, Y., Li, J., Shen, W., Luo, J., and Wang, J. (2017). Characterization of brominated flame retardants from e-waste components in China. *Waste Manag.* 68, 498–507.

Yu, L., He, W., Li, G., Huang, J., and Zhu, H. (2014). The development of WEEE management and effects of the fund policy for subsidizing WEEE treating in China. *Waste Manag.* 34, 1705–1714.

VII ANNEXES

Annexe I: grille d'observation sur la gestion des DEEE à Ouagadougou	45
Annexe II: fiche d'enquête.....	46
Annexe III: cartes électroniques conditionnées dans des sacs de 15 Kg au sein de l'ABPEV	49
Annexe IV: prix moyens de quelques pièces et matériaux recyclés à Ouagadougou au 30/6/2018.....	50
Annexe V: image de DEEE abandonnés sur les voies publiques à Ouagadougou.....	51
Annexe VI: teneurs moyennes en matériaux des DEEE démantelés au sein de l'ABPEV	52
Annexe VII: valeurs propres associées aux facteurs	53

Annexe I: grille d'observation sur la gestion des DEEE à Ouagadougou

GRILLE D'OBSERVATION

I. Textes et réglementation en matière de gestion de déchets

- Existence de réglementations spécifiques aux DEEE au Burkina Faso
- Textes ratifiés par le pays au plan international
- Dispositions pénales relatives aux infractions commises
- Existence d'une structure de régulation de la gestion des DEEE

II. Gestion des DEEE au niveau des producteurs de DEEE (ménages, gouvernement, entreprise/ONG, etc.)

- Organisation de la pré-collecte
- Organisation de la collecte /transport
- Acteurs du recyclage
- Organisation et techniques de recyclage existantes

III. Recyclage

- DEEE valorisés actuellement
- Matériaux et pièces valorisés
- Prix des matériaux recyclés sur le marché local
- Existence de financement
- Acteurs impliqués
- Conditions de réutilisation ou de mise en décharge
- Organisation de la filière DEEE

IV. Mauvaises pratiques

- Brûlages des DEEE
- Déversement dans les voies publiques

Annexe II: fiche d'enquête

Fiche d'enquête N°...../2018

Bonjour et merci de nous accorder un peu de votre temps en renseignant cette fiche. Nous vous assurons que tous les renseignements collectés dans le cadre de cette étude serviront exclusivement à la promotion d'une gestion durable des déchets d'équipements électroniques et électriques (D3E) au Burkina Faso.

Identité de l'enquêteur

Nom : Prénoms :

Profession : Adresse :

Identité de l'enquêté

Nom : Prénoms :

Structure: Quartier (secteur ou arrondissement) :

NB : Notez le numéro de la question et vos réponses (ex : Q7) b,c,e)

Q1) Utilisez-vous des équipements électriques ou électroniques?

a- Oui b- non

Q2) Avez-vous des déchets d'équipements électriques et électroniques ? Si oui, citer les types d'appareils (hors d'usage) :

a-

b-

c-

d-

e-

f-

g-

h-

Q3) Connaissez-vous les marques de ces appareils (appareils hors d'usage)? si oui nommez-les, sinon marquez « inconnu »:

a-

b-

c-

d-

e-

f-

g-

h-

Q4) Connaissez-vous leurs pays de fabrication ? si oui nommez-les, sinon marquez « inconnu »:

a-

b-

c-

d-

e-

f-

Q5) Connaissez-vous les pays d'où ils sont importés ? si oui nommez-les, sinon marquez « inconnu »:

a-

b-

c-

d-

e-

f-

Q6) Connaissez-vous leurs dates de fabrication ? Si oui citez-les, sinon marquez « inconnu »:

a-

b-

c-

d-

e-

f-

Q7) Comment gérez-vous ces déchets (appareils hors d'usage) ?

a- Vendu

b- Stocker dans les habitations (atelier ou service)

c- Jeter avec les ordures

d- Brûler

e- Don

Q8) Que recyclez-vous ?

.....
.....

Q9) Quels sont les prix des matériaux recyclés ?.....

.....

Q10) Où vendez-vous ces matériaux recyclés.....

.....

Q11) Quel commentaire faites-vous de la gestion actuelle des déchets d'équipements électriques et électroniques (appareils hors d'usage) ?

.....

.....

.....

.....

Annexe III: cartes électroniques conditionnées dans des sacs de 15 Kg au sein de l'ABPEV



Annexe IV: prix moyens de quelques pièces et matériaux recyclés à Ouagadougou au 30/6/2018

Matériaux et pièces de valeur	Prix moyen du Kg en FCFA
Fer	75
Cuivre	2000
Aluminium	500
RAM	10 000
Processeur	2000
Cartes mères de téléphone	7 500
Cartes mères d'ordinateur	2 500

Annexe V: image de DEEE abandonnés sur les voies publiques à Ouagadougou



Annexe VI: teneurs moyennes en matériaux des DEEE démantelés au sein de l'ABPEV

Numéro d'ordre	Type d'EEE	Nombre	Poids moyen en g	Teneur moyenne en matériaux de 17 types de D3E (exprimées en % massique)									
				Plastique	Fer/acier	Aluminium	Cuivre	Carte imprimé	Ecran + verre	Haut parleur+ écouteur+ micro	Câbles	Batteries	Plaquette solaire
1	Souris	22	50,45	74,8	5,4	0	0	19,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	Télécommande	6	50	76,7	0	0	0	23,3	0	0	0	0	0
3	Appareil photo	3	233,33	63,6	18,6	0	0	8,6	9,3	0	0	0	0
4	Dictaphone	2	100	25,0	40	0	0	10	10	15	0	0	0
5	Power bank	6	249,2	14,0	9,0	3,6	0,90	4,4	0	0	0	64,6	3,6
6	Chargeur d'ordinateur	21	179,05	36,2	2,9	11,2	1,8	48,0	0	0	0	0	0
7	Chargeur de téléphone	7	43,33	53,8	0,0	0,0	0,0	9,6	0,0	0,0	36,5	0	0
8	Rallonge	2	190	63,2	5,3	0	0	5,3	0	0	26,3	0	0
9	Console de jeu	1	60	66,7	0	0	16,7	0	0	0	16,7	0	0
10	Régulateur solaire	1	144	27,8	43,1	2,8	0,0	26,4	0	0	0	0	0
11	Convertisseur solaire	1	440	9,1	44,5	27,3	0,0	18,2	0,0	0,0	0,9	0	0
12	Lampe torche	2	260	50,0	11,5	22,3	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	15,4	0,0
13	Port USB	1	60	83,3	0,0	0,0	0,0	16,7	0	0	0	0	0
14	Casque audio	2	115	21,7	17,4	0	0	0	0	47,8	13,0	0	0
15	Récepteur radio	3	198	49,5	4,5	0	0	9,8	0	36,2	0,0	0,0	0,0
16	Ampoule solaire	2	70	28,6	0,0	64,3	0,0	0	0	0	7,1	0	0
17	Téléphone	6	90,00	38,3	13,7	1,1	0	20,0	13,7	4,6	0,00	8,5	0

Annexe VII: valeurs propres associées aux facteurs

Axes	Valeur propre	Proportion (%)	Importance cumulée (%)
1	5,671265	27,01%	27,01%
2	4,096018	19,50%	46,51%
3	2,049827	9,76%	56,27%
4	1,860066	8,86%	65,13%
5	1,48679	7,08%	72,21%
6	1,177811	5,61%	77,82%
7	0,997983	4,75%	82,57%
8	0,93186	4,44%	87,01%
9	0,72945	3,47%	90,48%
10	0,521682	2,48%	92,97%
11	0,48147	2,29%	95,26%
12	0,359245	1,71%	96,97%
13	0,268623	1,28%	98,25%
14	0,127694	0,61%	98,86%
15	0,120818	0,58%	99,43%
16	0,052912	0,25%	99,68%
17	0,045038	0,21%	99,90%
18	0,015516	0,07%	99,97%
19	0,005917	0,03%	100,00%
20	0,000015	0,00%	100,00%
21	0	0,00%	100,00%
Total	21	-	-