

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Batna -2-
Faculté de Technologie
Département de Génie Industriel



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de
DOCTORAT 3^{ème} Cycle LMD
Spécialité : Génie Industriel
Option : Informatique Industrielle et Productique

Par

Karima HAMOUDA

Thème

**Développement d'un système d'information et d'aide à
la décision pour l'élaboration d'un programme de
recyclage d'équipements électroniques en Algérie. Cas
des micro-ordinateurs.**

Soutenue le 28/06/2018

Devant le jury :

Mohamed Djamel Mouss	Pr.	Université de Batna 2	Président
Belkacem Adouane	Pr.	Université de Batna 1	Examinateur
Samia Aitouche	MCA	Université de Batna 2	Examinatrice
Rachid Adjroudi	MCA	Université de Batna 1	Rapporteur
Vera Susanne Rotter	Pr.	Université Technique de Berlin	Invitée

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma sincère appréciation et gratitude aux personnes qui m'ont soutenu tout au long de ce projet de recherche.

Je tiens à remercier tout d'abord Dr. Rachid Adjroudi pour avoir accepté de diriger cette thèse de doctorat. Pour sa disponibilité, ses remarques et ses précieux conseils.

Je tiens à exprimer toute ma profonde gratitude à Prof. Vera Susanne Rotter pour son accueil, ses conseils, pour les nombreuses discussions que nous avons eues et pour le soutien matériel et immatériel qu'elle a fourni.

Mes sincères remerciements sont adressés à l'Office allemand d'échanges universitaires (DAAD) d'avoir financé mon séjour de recherche au sein du département de l'Économie Circulaire et Technologie de Recyclage à l'Université Technique de Berlin.

Mes plus profonds remerciements vont à mes chers parents. Vous êtes une vraie école de la vie, je ne cesse d'apprendre tous les jours avec vous. C'est grâce à vous que je suis ce que je suis aujourd'hui. Je souhaite également exprimer ma reconnaissance à ma chère sœur Dihya et mes deux chers frères Mohand et Tarek. Tout au long de mon cursus, vous m'avez toujours soutenu, encouragé et aidé. Que vous trouvez tous dans la réalisation de ce travail l'expression de ma plus affectueuse gratitude.

Je remercie vivement les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail de recherche.

Mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont consacré leur temps pour répondre à mes questions et aidé à recueillir des informations.

Résumé

Les équipements électriques et électroniques rendent notre vie quotidienne plus pratique. Les changements continus de la technologie et l'augmentation du taux de consommation, associée à la diminution de la durée de vie, entraînent une augmentation rapide des produits électroniques obsolètes. Un grand volume de déchets électroniques est généré chaque année. En raison de cette consommation, on a accordé plus d'attention à la gestion et au recyclage des équipements électroniques et ordinateurs en fin de vie.

L'objectif fondamental de cette thèse est de développer un schéma théorique pour aider les différentes parties prenantes à faire face au problème des déchets électroniques en Algérie, en mettant l'accent sur les déchets des micro-ordinateurs. La recherche aboutit à un système d'information et d'aide à la décision qui fournit à l'utilisateur des différentes informations sur la quantité de déchets des micro-ordinateurs générés en Algérie. Il permet également à l'utilisateur de définir l'emplacement optimal pour mettre en place une unité de traitement des déchets des micro-ordinateurs en se basant sur des différents critères socio-économiques.

En outre, ce projet de recherche présente d'abord les différents travaux de recherche publiés dans le domaine de la gestion des déchets électroniques dans différents pays. Le deuxième point présente différentes méthodologies pour évaluer la quantité de déchets électroniques en Algérie, en mettant l'accent sur les déchets des micro-ordinateurs. Le troisième point concerne une étude de la faisabilité économique pour la mise en place d'une unité de traitement des déchets des micro-ordinateurs dans le pays.

Le résultat de ce projet de recherche contribuera à aider les différentes parties prenantes du pays à élaborer la bonne stratégie pour lutter contre les déchets électroniques.

Ce projet a répondu aux trois questions principales lors de l'élaboration d'une stratégie : la quantité de déchets des micro-ordinateurs générés, la faisabilité économique et l'emplacement optimal des unités de traitement des déchets micro-ordinateurs dans le pays.

Mots Clés : Déchets électroniques- Analyse économique- Système d'information et d'aide à la décision- Environnement- Recyclage.

Abstract

Electrical and electronic equipment makes our daily life more suitable. Continual technology change and increases in the rate of consumption, coupled with decreasing lifespan, lead to a rapid increase of obsolete electronic products. A large volume of electronic waste is generated every year. Because of this consumption, more attention has been paid to the take-back and recycling of end-of-life (EOL) electronic equipment and computers.

The fundamental goal of this doctoral thesis is to develop a theoretical scheme to help different stakeholders to cope with the problem of electronic waste in Algeria, with a special focus on computers waste. The research results in a structured information and decision support system that provides the user with different information on the amount of computer waste being generated in the country, as it allows also to the user to define the optimal location of computer waste treatment facility based on different socio-economic criteria.

Besides, this research project presents first different research achievements in the field of electronic waste in different countries. The second point presents different methodologies to assess the quantity of electronic waste in Algeria. The third point addresses the economic feasibility of setting up a treatment facility of computer waste in the country. The outcome of this research project will be instrumental to help different stakeholders in the country to develop the right strategy to deal with electronic waste.

This project has answered the main three questions while developing a strategy: the quantity of e-waste being generated, the economic feasibility and the optimal location of computer waste treatment facility in the country.

Keywords: Electronic Waste- Economic Analysis- Information and Decision Support System- Environment- Recycling.

ملخص

المعدات الكهربائية والإلكترونية تجعل حياتنا اليومية أكثر راحة. تؤدي التغييرات المستمرة في التكنولوجيا وارتفاع نسبة استهلاك هذه المعدات، إلى جانب انخفاض العمر المتوقع، إلى زيادة سريعة في كمية النفايات الإلكترونية. يتم توليد كمية كبيرة من هذه النفايات الإلكترونية كل عام ونتيجة لهذا الاستهلاك، تم إيلاء المزيد من الاهتمام لإدارة وإعادة تدوير المعدات والإلكترونيات والحواسيب في نهاية العمر.

الهدف الأساسي من هذه الأطروحة هو وضع مخطط نظري لمساعدة مختلف الأطراف الفاعلة وأصحاب القرار للتعامل مع مشكلة النفايات الإلكترونية في الجزائر، مع التركيز بشكل خاص على نفايات الكمبيوتر.

تم في هذه الأطروحة تطوير نظام منظم للمعلومات ودعم القرارات يوفر للمستخدم معلومات مختلفة عن كمية النفايات الناتجة عن الحاسوب في البلد. بالإضافة لذلك فإنه يسمح أيضا للمستخدم لتحديد الموقع الأمثل من أجل إنجاز وحدة معالجة نفايات الكمبيوتر على أساس معايير مختلفة.

إلى جانب ذلك، يقدم هذا المشروع البحثي مختلف المواضيع التي نشرت في مجال النفايات الإلكترونية في مختلف البلدان، أما النقطة الثانية فتعرض منهجيات مختلفة لتقييم كمية النفايات الإلكترونية في الجزائر. وتتناول النقطة الثالثة دراسة الجدوى الاقتصادية لإنشاء مرفق معالجة نفايات الحواسيب في الجزائر.

وستكون نتائج هذا المشروع البحثي مفيدة لمساعدة مختلف الأطراف الفاعلة وأصحاب القرار في البلد على وضع الاستراتيجية الصحيحة للتعامل مع النفايات الإلكترونية.

كما أجابت هذه الأطروحة على الأسئلة الثلاثة الرئيسية أثناء وضع استراتيجية: كمية النفايات الإلكترونية التي يتم توليدها، والجدوى الاقتصادية، والموقع الأمثل لإنجاز وحدة معالجة النفايات الحاسوبية في البلاد.

كلمات البحث: التحليل الاقتصادي- النفايات الإلكترونية - نظام المعلومات ودعم اتخاذ القرار - البيئة - إعادة التدوير.

Sommaire

1 Introduction.....	1
1.1 Défi de la gestion des déchets électroniques.....	2
1.2 Aperçu sur la gestion des déchets électroniques dans les pays en voie de développement.....	4
1.3 La gestion des DEEE dans la région du Moyen-Orient et Afrique du Nord (MENA).....	5
1.4 Les systèmes d'information et d'aide à la décision pour le recyclage des équipements électroniques en fin de vie.....	7
1.5 Objectifs de la thèse.....	7
1.6 Structure de cette thèse.....	8
2 Etat de l'art.....	11
2.1 Cycle de vie des équipements électriques et électroniques.....	11
2.2 Définition, classification et caractéristiques des déchets électriques et électroniques.....	12
2.3 Législations.....	14
2.3.1 Législations dans les pays développés.....	15
2.3.2 Législations dans les pays en voie de développements.....	16
2.3.3 Législations en Algérie	17
2.4 La gestion des e-déchets.....	18
2.4.1 Les DEEE générés.....	19
2.4.2 La collecte.....	20
2.4.3 Le traitement des DEEE.....	21
2.5 Les systèmes d'information et d'aide à la décision (SIAD).....	23
2.5.1 Méthodes d'évaluation utilisées pour l'aide à la décision.....	23
2.5.1.1 Aspect environnemental.....	25
2.5.1.2 Aspect économique.....	26
2.5.1.3 Évaluation intégrée pour le développement durable.....	27
3 Estimation des déchets électroniques générés en Algérie	30
3.1 Le modèle “ <i>Market supply (Distribution Delay)</i> ”	31
3.2 Le modèle “ <i>Market supply (Simple Delay)</i> ”	31
3.3 Le modèle “ <i>Time step</i> ”	32
3.4 La méthode “ <i>Carnegie Mellon</i> ”	32

3.5	La méthode “ <i>Stock and lifespan</i> ”	32
3.6	Le modèle “ <i>Leaching</i> ”	33
3.7	Modèles de diffusion.....	33
3.8	Enquête sur l’utilisation des équipements informatiques en Algérie.....	34
3.8.1	Type d’ordinateurs en utilisation.....	34
3.8.2	Acquisition du matériel informatique : neuf ou occasion.....	35
3.8.3	Condition pour mettre l’ordinateur au rebut en Algérie.....	36
3.8.4	La gestion des équipements informatiques obsolètes auprès de ménages.....	37
3.9	Estimation des déchets issus des micro-ordinateurs importés.....	39
3.9.1	La collecte des données.....	39
3.9.2	Modélisation de la durée de vie des ordinateurs.....	39
3.9.3	Distribution Delay.....	39
3.9.4	La méthode “ <i>Carnegie Mellon</i> ”	40
3.9.5	Résultats.....	41
3.10	Estimation des stocks et des déchets des micro-ordinateurs générés en Algérie en utilisant les modèles de diffusion	46
3.10.1	Collecte des données	49
3.10.2	Modélisation de la durée de vie en utilisant la distribution de Weibull.....	49
3.10.3	Modèles de prévision.....	50
3.10.4	Résultats	51
3.10.5	Calcul des stocks et des inflows des ordinateurs en Algérie.....	52
3.10.6	Prévision des ordinateurs obsolètes en utilisant différents modèles.....	55
3.10.7	Le choix du modèle de prévision le plus adéquat au cas algérien.....	57
3.10.8	Analyse de sensibilité.....	60
3.10.9	Discussion de la disponibilité et la fiabilité des données.....	61
4	Evaluation de la faisabilité économique de traitement des déchets des micro-ordinateurs en Algérie.....	64
4.1	Méthodologie.....	65
4.2	Description de l’unité de traitement prévue.....	66
4.3	Composition des micro-ordinateurs et moniteurs de type CRT et FPD.....	67
4.4	Les flux d’entrée (Inputs) attendus.....	70

4.5. Différents traitements existants en aval et les fractions de sortie (Outputs) produites	72
4.5.1 Différents traitements existants en aval	72
4.5.2 Les fractions de sortie (Outputs) produites.....	74
4.5.3 La profondeur de démontage.....	75
4.6. Différents coûts.....	76
4.6.1 Coûts de la main d'œuvre.....	76
4.6.2 Coûts de transport.....	76
4.6.3 Coûts d'infrastructure.....	77
4.6.4 Coûts des équipements et matériels nécessaires.....	77
4.6.5 Coûts d'amortissement.....	77
4.6.6 Coûts d'administration.....	77
4.7. Revenus.....	77
4.8. L'analyse coûts-Avantages (ACA).....	78
4.9. Critères d'évaluation et indicateurs de performance économique.....	80
4.9.1 Valeur actuelle nette.....	80
4.9.2 Le taux d'actualisation.....	81
4.9.3 Taux de rendement interne.....	79
4.9.4 Point de rentabilité.....	82
4.9.5 Délai de récupération.....	82
4.10. Analyse de sensibilité de résultats.....	82
4.10.1 Prix des différents matériaux.....	82
4.10.2 Frais de recyclage.....	83
4.10.3 Les flux attendus.....	84
4.11. Comparaison avec d'autres pays en développement.....	85
5 Système d'information et d'aide à la décision pour gérer les déchets des micro-ordinateurs en Algérie.....	88
5.1 Les systèmes d'aide à la décision utilisés dans la gestion des déchets.....	89
5.1.1 Système d'information et d'aide à la décision spatiale.....	89
5.1.2 Systèmes de gestion des connaissances et prise de décision.....	89
5.1.3 Système d'information et d'aide à la décision basé sur le web.....	89
5.2 Qu'est-ce que l'aide à la décision multicritères (ADM) ?	90

5.3 Pourquoi l'aide à la décision multicritères (ADM) dans la gestion des déchets ?.....	90
5.4 Différentes méthodes d'aide à la décision multicritères (ADM).....	90
5.4.1 TOPSIS.....	91
5.4.2 ELECTRE.....	91
5.4.3 PROMETHEE.....	92
5.4.4 L'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP).....	92
5.5 Application de l'analyse Hiérarchique des procédés (AHP) pour l'optimisation de la sélection de l'endroit optimal pour mettre en place une unité de traitement (UT) des déchets des micro- ordinateurs.....	95
5.5.1 Méthodologie	95
5.5.2 Les critères	97
5.5.3 Alternatives.....	98
5.5.4 Conception de la base de données du SIAD.....	98
5.5.5 Conception de l'architecture du système.....	99
5.5.6 Conception d'interface utilisateur.....	100
5.5.7 Mise en place du système.....	101
5.6 Résultats et discussion.....	104
6 Conclusion.....	109
Références.....	112
Annexe 1.....	124
Annexe 2.....	127
Annexe 3.....	130
Annexe 4.....	132
Annexe 5.....	138
Annexe 6.....	140
Production Scientifique.....	142

Liste des figures :

Figure 1.1. Un écran CRT jeté avec des déchets ménages à la rue Didouche Mourad (Alger, 2014).	6
Figure 1.2. Structure de la thèse.....	10
Figure 2.1. Illustration simplifiée du cycle de vie des EEE (Modifié de Chancerel, 2009).....	12
Figure 2.2. Schéma simplifié du cycle de gestion des DEEE.....	19
Figure 2.3. Scénarios potentiels de traitement des DEEE (Modifié de Wang, 2014).....	22
Figure 2.4. Différentes méthodes d'évaluation utilisées pour l'aide à la décision.....	24
Figure 2.5. Le cadre méthodologique général pour appliquer une ACV (ISO 14044, 2006).....	25
Figure 2.6. Un exemple d'une analyse coûts-avantages.....	27
Figure 2.7. La structure hiérarchique des différentes méthodes ADM.....	28
Figure 3.1. Différents types des ordinateurs utilisés en Algérie en 2013.....	35
Figure 3.2. Acquisition d'équipements informatiques (Neuf ou d'occasion) en Algérie pour l'année 2013.....	36
Figure 3.3. État des portables mis à l'écart par les ménages algériens.....	36
Figure 3.4. État des ordinateurs de bureau mis à l'écart par les ménages algériens.....	36
Figure 3.5. Le sort de l'ordinateur obsolète auprès des ménages.....	37
Figure 3.6. Des ordinateurs cassés irréparables stockés à l'université de Batna (CUB).....	38
Figure 3.7. Un ordinateur de bureau jeté avec les déchets ménages à Alger (mai, 2014).....	38
Figure 3.8. Présentation schématique pour estimer les déchets d'ordinateurs en Algérie.....	40
Figure 3.9. Importation des équipements informatiques en Algérie durant la période 2000-2013 (CNIS, COMTRADE).....	42
Figure 3.10. La distribution de la durée de vie des ordinateurs et écrans en utilisant la distribution normale.....	43
Figure 3.11. Quantité des déchets des équipements informatiques générés en Algérie en utilisant le modèle « Distribution Delay ».....	44
Figure 3.12. Quantité des laptops réutilisés, stockés et mis au rebut.....	45
Figure 3.13. Quantité des ordinateurs de bureau réutilisés, stockés et mis au rebut.....	45
Figure 3.14. Quantité des écrans CRT réutilisés, stockés et mis au rebut.....	46
Figure 3.15. Quantité des écrans LCD réutilisés, stockés et mis au rebut.....	46
Figure 3.16. Méthodologie proposée pour estimer les stocks et les déchets des micro-ordinateurs utilisés en Algérie.....	47

Figure 3.17. La distribution de la durée de vie des micro-ordinateurs.....	52
Figure 3.18 (a). Estimation des ordinateurs par habitants par année en Algérie en utilisant différents modèles (scenario 1).....	53
Figure 3.18 (b). Estimation des ordinateurs par habitants par année en Algérie en utilisant différents modèles (scénario 2).....	53
Figure 3.19 (a). Estimation des stocks des ordinateurs en cours d'utilisation en Algérie en utilisant différents modèles (scénario 1).....	54
Figure 3.19 (b). Estimation des stocks des ordinateurs en cours d'utilisation en Algérie en utilisant différents modèles (scénario 2).....	55
Figure 3.20 (a). Ordinateurs obsolètes prévus en utilisant différents modèles (scenario 1).....	56
Figure 3.20 (b). Ordinateurs obsolètes prévus en utilisant différents modèles (scenario 2).....	57
Figure 4.1. Différentes étapes de démontage des ordinateurs et écrans et les différents matériaux résultants (modifié de Bohr, 2007).....	65
Figure 4.2. Part de la composition des matériaux d'un ordinateur de bureau (Böni et al. 2011)...	68
Figure 4.3. Part de la composition des matériaux d'un ordinateur portable (Böni et al. 2011)....	69
Figure 4.4. Part de la composition des matériaux d'un moniteur de type FPD (Böni et al. 2011)...	69
Figure 4.5. Illustration des investissements, des coûts et des avantages.....	80
Figure 4.6. Les valeurs actuelles nettes obtenues pour différents taux d'actualisation.....	81
Figure 4.7. Prix des différents matériaux (2010-2017).....	83
Figure 4.8. Total des revenus nets sans et avec frais de recyclage.....	83
Figure 4.9. Résultats d'exploitation des différents scénarios des flux entrant l'unité de traitement..	85
Figure 5.1. Illustration simple des différents niveaux de la méthode AHP.....	93
Figure 5.2. Méthodologie utilisée pour le système d'aide à la décision pour l'emplacement optimal des installations de traitement des PCs.....	97
Figure 5.3. Conception d'une partie de la base de données du système.....	99
Figure 5.4. Architecture à trois couches (niveaux).....	99
Figure 5.5. Cycle de vie du développement du SIAD.....	100
Figure 5.6. Plan du SIAD basé sur le web.....	101
Figure 5.7. Page principale de connexion.....	102
Figure 5.8. La page d'accueil.....	102
Figure 5.9. Les résultats finaux de cette étude.....	103

Figure 5.10. Le taux des ordinateurs utilisés par habitant par an (Faible croissance).....	103
Figure 5.11. Les résultats finaux présentant les villes préférables pour la mise en place d'une unité de traitement des déchets des micro-ordinateurs.....	105
Figure 5.12. Différents critères et leur poids relatifs.....	107

Liste des Tableaux :

Tableau 1.1. Production de DEEE dans certains pays de la région MENA.....	6
Tableau 2.1. Classification des équipements électriques et électroniques par la fonction du produit (Baldé et al. 2015).....	13
Tableau 2.2. Quantités des DEEE générés dans différents pays (Balde et al. 2015).....	20
Tableau 2.3. Quantités des DEEE collectées dans certains pays européens (Balde et al. 2015).....	21
Tableau 2. 4. Quelques travaux de recherches sur les MADM.....	29
Tableau 3.1. Comparaison entre les différentes méthodes d'estimation (Modifier de: EEA 2003, Chancerel 2010, Wang 2014).....	30
Tableau 3.2. Institutions et entreprises contactés.....	34
Tableau 3.3. Pourcentage de mie au rebut des ordinateurs.....	41
Tableau 3.4. Les indicateurs d'écarts.....	58
Tableau 3.5. Résultats des indicateurs d'écarts pour les différents modèles de prévision.....	58
Tableau 3.6. Comparaison entre différents DEEE générés dans certains pays de la région MENA.....	60
Tableau 3.7. Sources de données pour différentes variables nécessaires à l'estimation des DEEE.....	61
Tableau 4.1. Prix du marché des matériaux (Euro/ kg) (LME, 2016).....	67
Tableau 4.2. Résultat de démantèlement et de la composition d'un micro-ordinateur portable...	70
Tableau 4.3. Flux d'entrée (Inputs) attendus.....	71
Tableau 4.4. Traitements en aval potentiels pour les différentes fractions résultantes pour l'Algérie.....	74
Tableau 4.5. Part des fractions résultantes de démantèlement (notre propre calcul, Aissaoui et al. 2008, Blaser et al. 2014).....	75
Tableau 4.6. Comparaison des salaires dans des unités de traitement des déchets électroniques...	76
Tableau 4.7. Revenus prévus de ventes des fractions.....	78
Tableau 4.8. Différents revenus et coûts associées.....	79
Tableau 4.9. Différents scénarios des flux attendus entrant l'unité de traitement.....	84
Tableau 4.10. Comparaison entre des différentes études.....	86
Tableau 5.1. Echelle de valeurs (Saaty, 1984).....	93
Tableau 5.2. L'indice aléatoire (Saaty, 2001).....	94

Tableau 5.3. Avantages et inconvénients des différentes méthodes d'aide à la décision multicritères.....	95
Tableau 5.4. Matrice des critères de décision (résultat de la de la quatrième itération).....	104
Tableau 5.5. Matrice des alternatives présentant le vecteur propre de priorité.....	105

Abréviations

ACA : Analyse coûts-avantages

ACB : Analyse coûts-bénéfices

Ag : Argent

Al: Aluminium

ANDI : Agence Nationale de Développement de l'Investissement

Au: Or

Bo2W: Best of 2 Worlds

Br: Brome

CBA: Cost-Benefit Analysis

CCFL: Cold Cathode Fluorescent Lamp

CRT: Cathode Ray Tube

CSS: Cascading Style Sheets

Cu : Cuivre

DEEE : Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques

EEE : Equipements Electriques et Electroniques

EMPA : Laboratoire fédéral suisse d'essai des matériaux et de recherche

Fe: Fer

FPD: Flat Panel Display

HTML: Hyper Text Markup Language

IDC: International Data Corporation

IPEMED : Institut méditerranéen de la prospective économique de la Méditerranée

KPMG : Klynveld Peat Marwick Goerdeler (Un cabinet de l'audit et de l'expertise comptable)

LCD: Liquid Crystal Display

Li-ion: Lithium-ion

MADM : Méthodes d'aide à la décision multicritères

MENA : Moyen-Orient et Afrique du Nord

NdFeB: Aimant composé d'un alliage de néodyme, de fer et de bore

Ni : Nickel

NiMH: Nickel-Hydrure Métallique

Pb : Plomb

PC : Personal Computer

PCB : Printed Circuit Board

Pd : Palladium

PHP: Hypertext Preprocessor

PWB: Printed Wiring Board

Sb : Antimoine

Sn : Etain

Ta : Tantale

TIC : Technologies de l'information et de la communication

UIT : Union internationale des télécommunications.

1. Introduction

Les équipements électriques et électroniques se sont propagés à la fois dans les pays développés et en voie de développement et ont largement contribué à rendre notre vie quotidienne plus pratique à bien des égards.

L'Algérie a connu un saut qualitatif dans le domaine de la production et de l'importation des équipements électriques et électroniques (EEE) surtout les équipements de l'information et de la communication (TIC).

Cependant, le taux de pénétration des micro-ordinateurs dans la société algérienne est encore faible par rapport à d'autres pays. En conséquence, les autorités ont tenté de promouvoir l'utilisation des TIC par le lancement de plusieurs projets. L'opération OUSTRATIC (littéralement « famille TIC») a été lancée en 2005 et visait à fournir un ordinateur pour chacun des six millions de familles algériennes en 2010. Le gouvernement algérien a introduit des prix abordables et des subventions d'intérêts sur les prêts afin de soutenir cette initiative. Après deux ans d'opération, le nombre de PC vendus a atteint 50.000 unités (CREAD, 2015). Une deuxième phase du programme, OUSTRATIC 2, a été lancée afin de corriger les problèmes liés à la première phase.

Le programme complémentaire pour soutenir la croissance économique (2005-2009) vise à équiper les établissements d'enseignement, les banques, les autorités locales, les administrations et les ménages avec environ 3 millions d'ordinateurs (KPMG, 2015).

Ces programmes ont eu des résultats significatifs, en particulier dans le domaine des utilisateurs d'Internet. Le nombre d'utilisateurs est passé de 0,65% en 2000 à 16,50% en 2013 (estimation de l'UIT, 2013). Selon le rapport de recherche El-Madar (MADAR, 2012), l'Algérie a été classée première dans la région Moyen-Orient et Afrique du Nord (MENA) en termes de taux de croissance des ordinateurs installés avec 27,08%. Selon l'International Data Corporation (IDC), plus de 300.000 ordinateurs ont été vendus sur le marché algérien durant l'année 2012 (IPEMED, 2015). Cette quantité est passée à 460.000 ordinateurs en 2014 (300.000 ordinateurs portables et 160.000 ordinateurs de bureau) (Usinenouvelle, 2015).

Ce taux de consommation important a engendré un volume de déchets électroniques chaque année. DEEE ou e-déchet est le terme utilisé pour couvrir tous les types d'équipements électriques et électroniques qui entrent dans le flux de déchets. La définition de «e-déchets» comprend également l'Équipement électronique utilisé ou obsolète destiné à être réutilisé, rénové, revendu et recyclé. En raison du transport international, les produits électroniques réutilisables qui peuvent être rénovés

dans de nouveaux produits ne sont pas considérés comme des déchets électroniques, mais comme marchandises (Salehabadi, 2013).

Cependant, les équipements utilisés destinés à être réutilisés finiront par devenir des déchets après une certaine période d'utilisation. Parce qu'il y a simplement un délai de temps avant que l'équipement électronique réutilisé devienne obsolète et nécessite un traitement (Wang, 2014).

1.1 Défi de la gestion des déchets électroniques

Le traitement des déchets provenant des équipements électriques et électroniques (DEEE) a suscité des inquiétudes croissantes au cours de la dernière décennie et a récemment conduit à une action vigoureuse entre les organismes de réglementation de la législation à travers le monde. Les déchets provenant des équipements électriques et électroniques (DEEE) sont l'un des flux de déchets solides les plus rapides dans de nombreux pays (Babu et al. 2007).

L'Université des Nations Unies a publié une étude (Baldé et al. 2015) pour fournir une évaluation globale des volumes de DEEE, leur impact et leur gestion à grande échelle. Les auteurs de cette étude ont développé un cadre de modélisation harmonisé pour calculer la quantité de DEEE générée. Le rapport examine le problème des DEEE dans différentes régions. La quantité globale des DEEE a été estimée à 41,8 millions de tonnes en 2014 et devrait augmenter à 50 millions de tonnes en 2018. Face à cette importante quantité des déchets générés, la gestion rationnelle des DEEE s'est transformée en un défi majeur pour toutes les institutions impliquées dans la gestion des équipements électroniques à leur fin de vie.

Le volume croissant des DEEE a contribué à une quantité relativement importante d'intrants toxiques dans les flux de DEEE, ce qui va engendrer un impact considérablement néfaste sur l'environnement si le traitement n'est pas adéquat.

Cependant, les matériaux contenus dans les DEEE sont d'une valeur considérable (ex : l'or et l'argent). Si le taux de collecte de ce type des déchets est élevé et le traitement choisi est adéquat, les DEEE représenteraient une vraie mine très attrayante.

Compte tenu de son attractivité économique comme source de matières premières précieuses, d'une part, et son impact potentiellement néfaste sur l'environnement d'autre part, l'une des principales préoccupations pour une gestion saine des DEEE dans les pays en voie de développement est d'évaluer les quantités des DEEE générés afin de mettre en place une stratégie pour une collecte et un traitement rationnel de ce type de déchets tout en prenant en considération les aspects environnementaux, économiques et sociaux.

Les DEEE est une catégorie qui se distingue des autres types de déchets solides de la manière suivante (Wang, 2014) :

- Ils couvrent un large éventail de produits électriques et électroniques présentant des caractéristiques distinctes.
- Ils contiennent des matières recyclables (ex : métaux non précieux comme le fer, l'acier, le cuivre, l'aluminium) et des métaux précieux tels que l'or, l'argent, le palladium, et d'autres matériaux comme le plastique et le verre.
- Ils contiennent des substances dangereuses présentant un potentiel de toxicité (par exemple le plomb, le mercure, le cadmium) et d'autres liquides de refroidissement avec des potentiels élevés pour l'impact environnemental.

Pour ces raisons, les déchets électroniques doivent être traités séparément des autres déchets solides. Les caractéristiques des produits électriques et électroniques varient considérablement selon le type, la composition du matériau et le volume ; il n'y a pas de modèle « unique pour tous les produits » en termes de solutions techniques (Stevens, 2012).

Au cours des dernières décennies, les options traditionnelles de traitement des DEEE comme la mise en décharge et l'incinération étaient dominantes. Cependant, le recyclage et la réutilisation ont récemment été fortement encouragés (Bohr, 2007).

Au cours des dernières années, l'attention et les initiatives consacrées à la gestion des déchets électroniques ont considérablement augmenté à l'échelle mondiale. L'augmentation des quantités de déchets électroniques de plus en plus rapide, ainsi que les défis environnementaux liés à la mauvaise gestion des DEEE ont poussé les décideurs et les producteurs à travers le monde à mettre en place des systèmes spécialisés dans la collecte et le traitement des déchets électroniques, également appelés « systèmes de reprise ». Un système de reprise et de traitement comprend deux activités principales : la collecte auprès des utilisateurs finaux et le traitement dans des installations de traitement. (Wang, 2014).

1.2 Aperçu sur la gestion des déchets électroniques dans les pays en voie de développement

Les équipements électriques et électroniques rendent notre vie quotidienne plus pratique. Le changement technologique continu et l'augmentation du taux de consommation, associé à une durée de vie décroissante, entraînent une montée rapide des produits électroniques obsolètes (Hamouda et al. 2017).

Selon les nouvelles études, les pays en développement produiront des déchets électroniques doubles des pays développés au cours des 6 à 8 prochaines années (Sthiannopkao et al. 2013). On estime également que les pays en développement et les pays développés rejeteront respectivement 400 à 700 millions et 200 à 300 millions d'ordinateurs obsolètes d'ici 2030, (Sthiannopkao et al. 2013). Les pays développés exportent également leurs déchets électroniques dans les pays en développement pour le dumping, entraînant de sérieuses inquiétudes.

Les pays en développement et les pays en transition se caractérisent par des activités informelles le long de la chaîne de recyclage des déchets électroniques (Schluep et al. 2009).

La collecte, le démontage manuel, la combustion ouverte pour récupérer des métaux, et le dumping (décharge) des fractions résiduelles sont des pratiques habituelles dans la plupart des pays en voie de développement. Dans les économies plus petites et moins développées, ces activités sont généralement réalisées par des individus, car les volumes sont trop faibles pour inciter le secteur informel à se spécialiser dans le recyclage des déchets électroniques à grande échelle (Schluep et al. 2009).

Les pays en voie de développement ainsi que les pays soumis au commerce intense d'équipements d'occasion (équipements de deuxième mains) et aux transferts illégaux de déchets, révèlent un vaste secteur informel organisé. La gestion des déchets électroniques diffère largement entre les deux mondes (développé et en développement).

La collecte :

Contrairement aux pays industrialisés où le consommateur finance le système de recyclage au moyen de la taxe de recyclage anticipée, dans les pays en développement c'est les collecteurs des déchets électroniques qui payent pour obtenir ces équipements obsolètes pour les revendre aux recycleurs.

Le traitement :

Les pays développés ont réussi à mettre en place des unités de gestion et de récupération des déchets électroniques économiquement viables, ces derniers ont un autre sort dans les pays en développement. Car ils sont gérés par le système informel, où les aspects environnementaux et sociaux sont ignorés. Les intérêts des acteurs actifs dans le traitement informel reposent sur le gain économique donc l'objectif est d'extraire les métaux précieux depuis les circuits imprimés en utilisant des procédés chimiques en appliquant de nombreuses substances toxiques sans précautions.

Les pays développés et en développement sont confrontés aux différents défis avec les déchets électroniques. Pour les premiers, l'augmentation du taux de la collecte est un objectif principal de même que la lutte contre l'exportation illégale des déchets électroniques vers les pays en développement. Il faut améliorer les technologies de recyclage dans les raffineries afin d'augmenter le taux de récupération des matériaux et passer au recyclage des terres rares et des métaux critiques. Pour les deuxièmes, il est important d'abord d'évaluer et d'estimer la quantité des déchets électroniques générés dans ces pays afin de fournir les meilleures solutions pour la collecte et le traitement tout en intégrant le secteur informel. Ces solutions doivent toujours avoir un équilibre entre les trois aspects environnementaux, socio-économiques et techniques.

1.3 Gestion des DEEE dans la région du Moyen-Orient et Afrique du Nord (MENA)

La situation dans les pays du Moyen-Orient et Afrique du Nord (MENA) n'est pas différente des autres pays en voie de développement. Beaucoup d'entre eux ont déjà mis en place des programmes pour gérer les déchets solides, mais la question des DEEE n'a pas encore été discutée en profondeur. La plupart de ces pays n'ont pas de réglementation spécifique pour s'attaquer au problème des DEEE. Il n'y a pas de système de collecte sélective pour les DEEE dans la région MENA, ces derniers sont mélangés et collectés avec les déchets des ménages (Seitz, 2014) comme le montre la figure 1.1.

Malgré le fait que les DEEE constituent un problème global croissant, il n'existe actuellement aucune législation spécifique pour les DEEE dans la région MENA. Néanmoins, il existe des règlements pour la gestion des déchets en général qui pourraient être utiles pour introduire des décrets pour des types spécifiques de déchets tels que les DEEE ; Par exemple, la loi algérienne N° 01-19 du 12/12/2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets (MATE, 2015), et la loi 28-003 concerne la gestion et l'élimination des déchets.



Figure 1.1. Un écran CRT et un clavier jeté avec des déchets ménages à la rue de Didouche Mourad (Alger, 2014)

Les données liées aux DEEE sont à peine disponibles dans la région MENA. Seules quelques études d'évaluation ont été menées en Egypte, en Jordanie, au Maroc et en Tunisie. Le tableau 1.1 présente les résultats de différentes études d'évaluation des DEEE dans la région MENA.

Tableau 1.1. Production de DEEE dans certains pays de la région MENA.

Pays	Catégories des DEEE	DEEE générés	DEEE par habitant (*)	Année	Reference
Algérie	Micro-ordinateurs (PC)	800.000 unités	0,02 PC/habitant	2016	Hamouda et al. 2017
Egypte	Micro-ordinateurs (PC)	1.000.000 unités	0,012PC/habitant	2013	Degreif et al. 2014
Jordanie	Téléviseurs, téléphones mobiles, PC, réfrigérateurs, machines à laver, climatiseurs, micro-ondes, jeux électroniques et autres catégories EEE.	23.400 tonnes	3,70 kg/habitant	2012	Fraige et al. 2012
	Téléviseurs, téléphones portables, PC, réfrigérateurs, machines à laver.	25.799 tonnes	3,29 kg/habitant	2013	Ikhlayel et al. 2015
Maroc	Télévisions, ordinateurs et téléphones mobiles.	30.300 tonnes	0,98kg/ habitant	2007	Aissaoui et al. 2008
Tunisie	DEEE comprenant des téléviseurs, des climatiseurs, des réfrigérateurs et des machines à laver.	50.000 tonnes	4,73kg/ habitant	2010	Seitz, 2014

(*) Notre propre calcul.

1.4 Les systèmes d'information et d'aide à la décision pour le recyclage des équipements électroniques en fin de vie

Le concept d'un système d'information et d'aide à la décision (SIAD) a d'abord été utilisé à la fin des années 1970. Contrairement aux systèmes de traitement de données antérieurs, un SIAD était censé avoir plus de fonctions que le simple traitement de données ou un système d'information de gestion (Wierzbicki 2000).

Une analyse de décision multicritères (ADMC) est proposée, en tant que remplacement robuste des méthodes d'optimisation multi-objectives, dans l'identification des solutions pour la gestion des déchets. Dans cette thèse, nous utilisons le processus d'analyse hiérarchique (AHP).

AHP est un outil de prise de décision à critères multiples qui a été utilisé dans plusieurs applications liées à la prise de décision dans la gestion des déchets. La mise en place d'une infrastructure de traitement des déchets des micro-ordinateurs en Algérie nécessite des investissements relativement élevés, par conséquent, le décideur doit être très prudent.

L'objectif du système d'aide à la décision développé est de définir le lieu optimal pour mettre en place l'unité de traitement en tenant en compte des critères sociaux-économiques. Pour les besoins du système d'aide à la décision, AHP est adopté comme une technique d'analyse multicritères.

1.5 Objectifs de la thèse

Cette thèse contribue au thème de la gestion des déchets des équipements électriques et électroniques (DEEE) générés dans les pays en voie de développement en particulier les déchets de micro-ordinateurs générés en Algérie.

L'objectif fondamental de cette thèse est de développer un système d'information et d'aide à la décision pour élaborer un programme de recyclage de micro-ordinateurs en Algérie. Pour atteindre cet objectif, nous devons répondre aux questions suivantes :

a- Quelle est la meilleure façon pour déterminer et évaluer la quantité des déchets électroniques générés en Algérie ?

Cette question sert à quantifier la quantité des déchets électroniques dans la société algérienne afin d'aider les décideurs à mettre en place une stratégie de collecte et récupération. Pour répondre à cette question, nous avons développé une méthodologie d'évaluation des quantités des déchets des micro-ordinateurs en Algérie. Les résultats de cette méthodologie permettent aux décideurs de connaître les micro-ordinateurs utilisés par habitant et par conséquent les déchets des micro-

ordinateurs générés par habitant. Donc les décideurs auront une idée sur la quantité des déchets dans chaque wilaya du territoire algérien. Les résultats de cette méthodologie couvrent la période entre 2000 et 2030.

b- Est-ce que le traitement des micro-ordinateurs est faisable en Algérie d'un point de vue économique ?

Cette question sert à analyser les coûts et les avantages de mettre en place une unité de traitement des micro-ordinateurs en Algérie, en utilisant la méthode coûts-avantages, cette dernière est une procédure d'évaluation économique. Tous les coûts et les avantages impliqués dans l'installation d'une unité de traitement des micro-ordinateurs seront expliqués dans le quatrième point de cette thèse : Evaluation de la faisabilité économique de traitement des déchets des micro-ordinateurs en Algérie.

c- Quel est le meilleur endroit pour installer l'unité de traitement des déchets des micro-ordinateurs en Algérie ?

L'objectif du système d'aide à la décision est d'aider les décideurs à prendre une décision concernant l'endroit adéquat pour installer une unité de traitement des déchets électroniques. En prenant en considération différents critères et alternatives. Ainsi, de fournir à son utilisateur des informations sur la quantité des déchets des micro-ordinateurs générée en Algérie par habitant par an en utilisant plusieurs méthodes de calcul.

1.6 Structure de la thèse

La structure de cette thèse est illustrée à la figure 1.2. Après cette introduction, le deuxième point est consacré à l'état de l'art sur la gestion des DEEE, cette partie présente les différents travaux de recherche effectués dans le domaine des déchets électriques et électroniques (DEEE), particulièrement les travaux focalisant sur la gestion des déchets générés des équipements de technologies de l'information et de la communication (TIC). Le deuxième point a mis l'accent sur les différentes méthodes d'évaluation et quantification des DEEE dans le monde, puis les différentes méthodes d'évaluation économique de la gestion des DEEE et enfin, les différentes méthodes utilisées pour développer un système d'information et d'aide à la décision.

La méthodologie de quantification des déchets des micro-ordinateurs générés en Algérie utilisée dans ce travail est expliquée d'une façon détaillée dans le troisième point. Nous avons étudié la faisabilité économique du recyclage des micro-ordinateurs en Algérie dans le quatrième point.

Dans le cinquième point, nous avons présenté le système d'information et d'aide à la décision (SIAD) pour mettre en place un programme de gestion des DEEE en Algérie élaboré dans le cadre de cette thèse. Le SIAD fournit aux utilisateurs les différentes informations concernant la quantité des micro-ordinateurs générés en Algérie en utilisant deux méthodes différentes, et il répond à la question où mettre l'unité de traitement tout en prenant en considération plusieurs paramètres et en utilisant la méthode de L'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP). Une conclusion est présentée dans le dernier point.

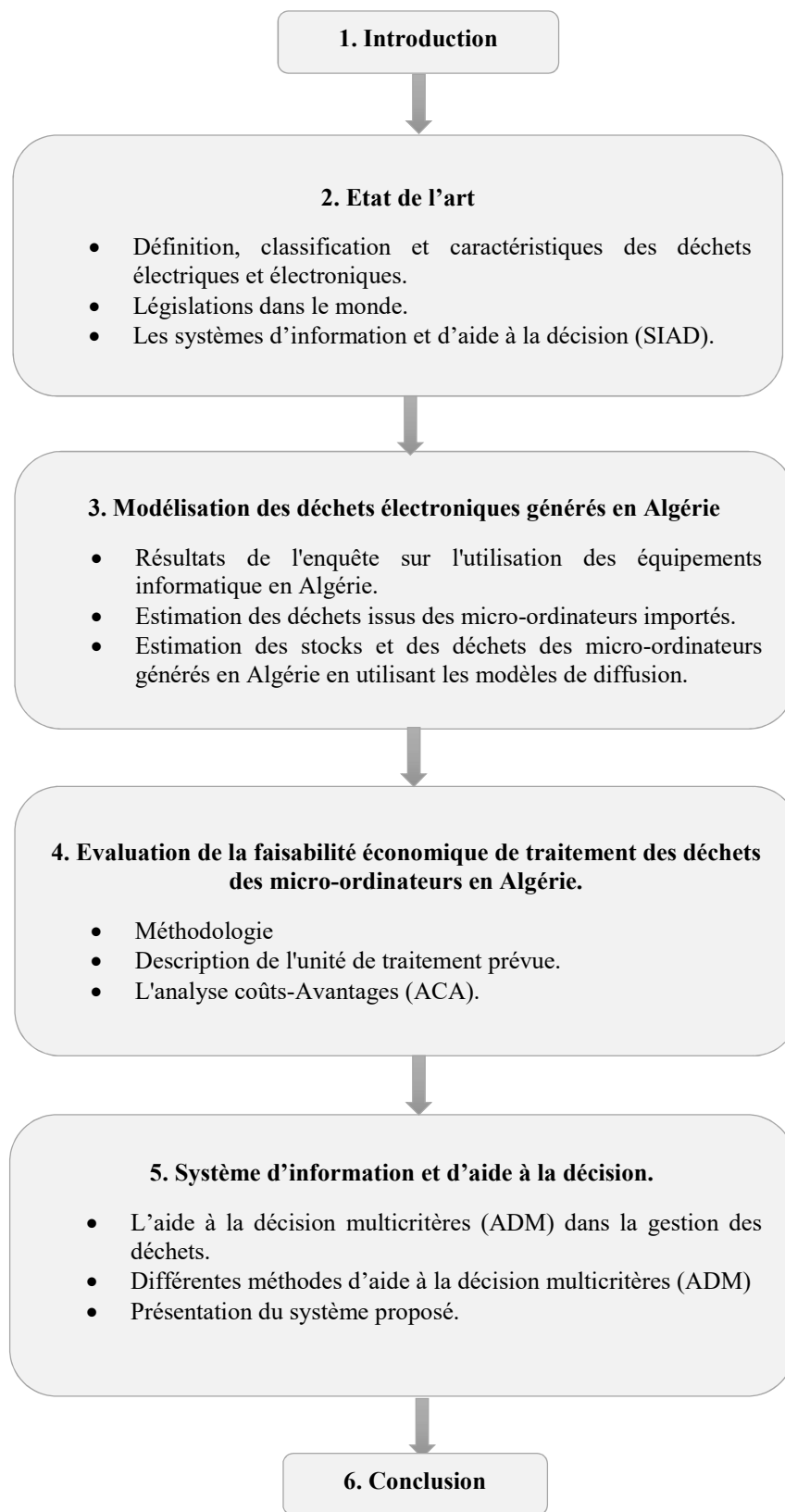


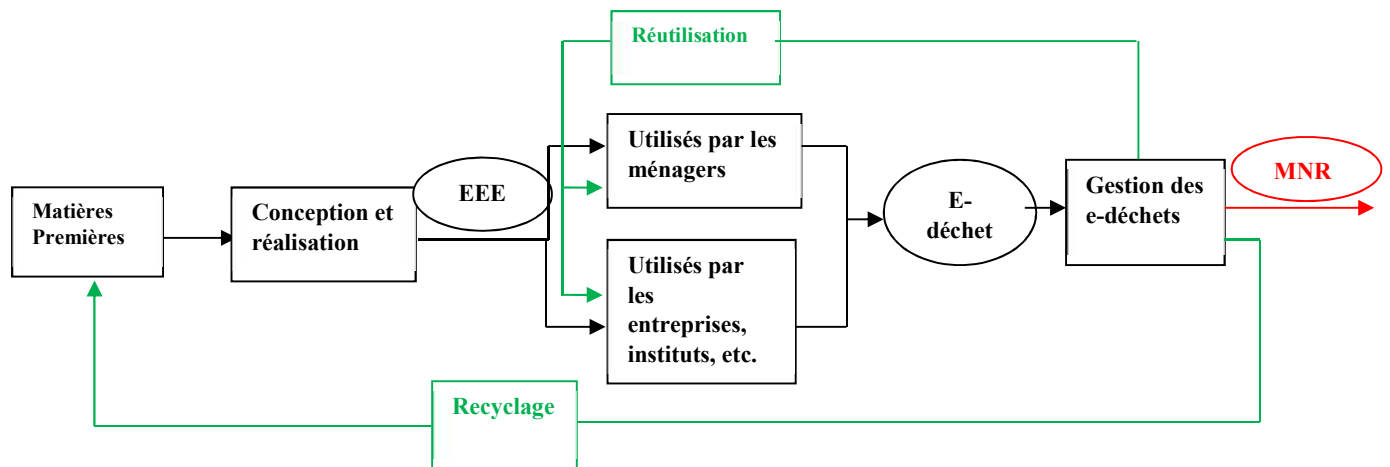
Figure 1.2. Structure de la thèse

2. Etat de l'art

Nous présentons les différents travaux de recherche effectués dans le domaine des déchets électriques et électroniques (DEEE), particulièrement les travaux focalisant sur la gestion des déchets générés des équipements de technologies de l'information et de la communication (TIC). L'électronique est devenue de plus en plus une nécessité dans notre vie quotidienne, chaque nouvelle génération de produits vise à améliorer notre confort, notre sécurité ou notre information. Le nombre des équipements électroniques utilisés par un ménage européen était estimé, en moyenne, entre 24 équipements (GFK 2007) et 60 équipements (EERA 2008). L'invasion des équipements électriques et électroniques (EEE) dans notre vie quotidienne est justifiée par la variété de ces derniers, plus que 900 équipements électriques et électroniques sont identifiés dans le monde développé (Huisman et al. 2012). Après une certaine période d'utilisation par différents utilisateurs (Ménagers, Entreprises, institutions, et autres) ces équipements ne sont plus utiles pour leurs propriétaires, alors ils sont stockés ou bien jetés tout en formant un flux des déchets électroniques.

2.1. Cycle de vie des équipements électriques et électroniques

La définition de la durée de vie d'un équipement électrique et électronique diffère, durant son cycle de vie (figure 2.1). L'équipement électrique et électronique peut être stocké par ses différents utilisateurs ou réutilisé complètement ou partiellement (la réutilisation d'un ordinateur complet ou bien la réutilisation d'une partie, le disque dur, à titre d'exemple). La tâche principale de la gestion des équipements en leur fin de vie est de récupérer les différents composants et / ou les matériaux qui les constituent, et d'éliminer toutes substances dangereuses d'une manière correcte tout en évitant d'engendrer des impacts négatifs sur l'environnement ou sur l'être humain. La réutilisation des composants est une façon de gestion des e-déchets (Chancerel, 2009).



MNR : Matériaux non recyclés.
EEE : Équipements électriques et électroniques.

Figure 2.1. Illustration simplifiée du cycle de vie des EEE (Modifié de Chancerel, 2009)

2.2. Définition, classification et caractéristiques des déchets électriques et électroniques

Il n'y a pas une définition standard pour les déchets électriques et électroniques (DEEE), ce terme est généralement défini comme des équipements qui ont atteint la fin de leur durée de vie, et ils ne représentent aucune valeur pour leurs propriétaires (Widmer et al. 2005). Il existe aussi d'autres définitions, selon BAN 2002 (Basel Action Network) "e-déchets ou DEEE englobe une vaste et croissante gamme d'équipements électriques et électroniques variant de grands appareils ménagers tels que les réfrigérateurs, les machines à laver, les climatiseurs, à des ordinateurs et téléphones portables qui ont été jetés par leurs utilisateurs", OECD 2001 (Organisation for Economic Cooperation and Development) définit les déchets électroniques comme «tout appareil utilisant une alimentation électrique qui a atteint sa fin de vie». Selon, STEP (2009), les e-déchets sont un terme utilisé pour couvrir la plupart de types d'équipements électriques et électroniques qui peuvent entrer dans le flux des déchets.

Si, le terme des e-déchets est un terme général, il existe plusieurs critères pour les classer. Un système de classification cohérent doit classer les produits par : fonction similaire, leur composition, aussi, les produit de la même catégorie doivent avoir un poids et une durée de vie homogènes (Feng Wang, 2012). Le tableau 2.1 résume les 11 catégories de fonction de produit. Les produits électriques et électroniques, cités, sont utilisés dans différents domaines : l'Education, la Médecine, la Communication, la Sécurité, et autres. (Schluep et al. 2009).

Tableau 2.1. Classification des équipements électriques et électroniques par la fonction du produit (Baldé et al. 2015)

Catégories Principales	Exemples de certains équipements
0. Equipements ménagers professionnel	Chauffage central, Panneaux solaires photovoltaïques.
1. Gros appareils ménagers	Lave-vaisselle, Réfrigérateur, Congélateur, climatiseur, Micro-ondes, etc.
2. Petits appareils ménagers	Aspirateurs, cafetières électriques, etc.
3. Equipement d'informatiques et de communication	Ordinateur de bureau, Ordinateur portable, écran de type CRT, écran de type LCD, téléphone portable, etc.
4. Equipement grand public	Lecteur DVD, Télévision LCD, Télévision CRT, Caméras, Radio, etc.
5. Equipement d'éclairage	Lampes spéciales, Lampes LED, etc.
6. Outils électriques et électroniques	Petits outils : scies, perceuses, etc.
7. Jouets, équipements de loisir et de sport	Jouets de course automobiles, console de jeux vidéo, etc.
8. Dispositifs médicaux	Tensiomètres, équipements professionnels des dentistes, etc.
9. Instruments de surveillance et de contrôle	Surveillance et contrôle des ménages (alarmes, chaleur, etc.)
10. Distributeurs automatiques	Distributeurs de boissons (chaudes et froides), etc.

Wang Feng, 2014, a cité d'autres critères pour classer les e- déchets, on les mentionne brièvement :

- Classification des e-déchets selon la composition des matériaux.
- Classification des e-déchets selon la valeur potentielle des matériaux.
- Classification des e-déchets selon le gain environnemental sur le recyclage.
- Classification des e-déchets selon le potentiel de la toxicité humaine en phase de fin de vie du produit.

Huisman et al. (2007) a souligné que les e-déchets sont des déchets particuliers et complexes par rapport aux autres types de déchets, pour les raisons suivantes :

- La variété des produits des équipements électriques et électroniques.
- L'association de différents matériaux et composants.
- La concentration des substances dangereuses et la croissance de ce type des déchets, qui peuvent être influencés par le développement de la technologie.

Le problème des e-déchets peut être confiné dans trois points majeurs :

a- La diversité des EEE et l'augmentation des quantités e-déchets générés : Kang et al. 2005 ont déclaré que le taux de production et consommation des équipements électroniques dans le monde est très élevé. La quantité des e-déchets est passé de 20 millions tonnes en 1998 à une

quantité estimée à 50 millions de tonnes en 2014 et 2015 (Widmer et al. 2005, Wang, 2014). Ainsi, l'importance croissante du domaine de la technologie de l'information et de la communication (TIC) dans l'économie mondiale a engendré une hausse en demande des équipements électroniques. À la vue des progrès rapides de la technologie, en particulier des équipements électroniques, une diminution significative de la durée de vie de ces équipements est remarquée, par conséquent, les quantités des e-déchets générés devraient augmenter (Kang et al. 2006, Dwivedy et al. 2010, Wang et al. 2013).

b- E-déchets, une ressource potentielle : la composition des e-déchets contient plusieurs matériaux qui peuvent être recyclé et utilisé dans la fabrication des nouveaux équipements à condition que ces e-déchets soient collectés et recyclés tout en respectant l'environnement, ces matériaux incluent : le verre, les métaux précieux, les métaux ferreux et non-ferreux, et les différentes formes de plastiques.

c- La composition des e-déchets : les e-déchets contiennent des substances dangereuses (par exemple : le mercure, le plomb, le cadmium), qui ont des conséquences négatives sur l'environnement en cas du traitement inapproprié.

2.3. Législations

La quantité des déchets électroniques produite chaque année dans le monde est due, principalement, à l'évolution de la technologie et la consommation rapide des différents types de produits électroniques. Cette situation a poussé les responsables à mettre en place des réglementations pour gérer et contrôler ces quantités, surtout avec l'évolution des déchets exportés des pays industrialisés vers les pays en voie de développement.

La Convention de Bâle :

Officiellement la Convention de Bâle sur le contrôle des mouvements transfrontières des déchets dangereux et de leur élimination, est un accord international qui a pour objectif de réduire la circulation illégale de déchets dangereux et d'éviter le transfert de déchets dangereux des pays développés vers les pays en développement, l'accord vise aussi à aider les économies émergentes à gérer leurs déchets d'une façon rationnelle (Peiry, 2012). La convention sert aussi à protéger la santé des populations et l'environnement des effets préjudiciables des déchets dangereux. Son champ d'application couvre différents types de déchets considérés comme « déchets dangereux » de par leur origine et/ou composition et leurs caractéristiques (Peiry ,2012)

2.3.1 Législations dans les pays développés

Depuis l'établissement de la directive européenne 2002/96 / CE (entré en vigueur en février 2003), tous les états membres de l'union européenne étaient tenus de mettre en place des systèmes de collecte et de traitement des déchets électroniques au niveau national en l'an 2005.

Basé sur le principe de la responsabilité élargie des producteurs, la directive européenne a exigé que les producteurs assument leur responsabilité financière pour la collecte et le traitement des déchets électroniques.

En introduisant cette réglementation, la directive européenne vise à réduire la consommation des ressources naturelles par le recyclage et prévenir toute pollution possible causée par un traitement inapproprié des déchets électroniques. La directive a été révisée en 2008 afin d'augmenter le taux de collecte des déchets électroniques pour atteindre 65% du poids des équipements mis sur le marché dans les deux années précédentes (COM 2008).

La gestion des déchets électroniques dans la plupart des pays européens est basée sur le principe de la responsabilité élargie des producteurs, ce principe est ajusté aux lois internes du pays. En Allemagne, par exemple, la responsabilité des producteurs définis par l'ElektroG⁽¹⁾ est une responsabilité partagée. Les producteurs sont responsables de la reprise et le traitement des e-déchets, alors que les autorités de gestion des déchets publics (municipalités) assurent la collecte. (Rotter et al. 2008). Cependant, sous un certain ensemble de critères, cette réglementation détermine les quantités (nombre de conteneurs) qui doivent être collectées par chaque producteur (Rotter et al. 2009)

La Suède a mis en œuvre une réglementation pour gérer les DEEE en Juillet 2001. Les municipalités, les fabricants et les clients sont tous impliqués dans le système de gestion.

Avec une stratégie '*vieux équipement pour neuf*' les clients peuvent retourner les articles EEE obsolètes aux détaillants lors de l'achat d'un nouveau produit similaire (Sasaki, 2004). En outre, les clients des ménages peuvent déposer les DEEE aux points de collecte municipaux.

Les producteurs sont tenus de couvrir le coût financier du traitement, et de fournir des informations sur le système de collecte aux autorités responsables (Sasaki, 2004).

Contrairement à l'union européenne, les Etats Unis n'ont pas mis en place une réglementation qui adresse directement la collecte et le recyclage des DEEE.

⁽¹⁾ Loi régissant la vente, la collecte et l'élimination écologiquement rationnelle des équipements électriques et électroniques 2005.

Cependant, plus de 20 états ont déjà appliqué la stratégie de la responsabilité élargie des producteurs pour gérer les DEEE (Gregory et al. 2007).

Au niveau des pays asiatiques, le Japon est le premier pays asiatique à adopter le principe de la responsabilité élargie des producteurs en 2001. Les fabricants et les importateurs sont tenus de collecter et récupérer des différents matériaux et composants à partir des DEEE (Zhang et al. 2006) En Corée de sud, la loi basée sur la responsabilité élargie des producteurs a été mise en place en 2003 dont l'objectif est de promouvoir des activités de recyclage (Lee et al. 2007).

2.3.2 Législations dans les pays en voie de développements

La gestion des DEEE pose un vrai challenge pour les pays en voie de développement, cela est dû à la quantité produite localement ainsi qu'aux quantités des DEEE importées. En 2008, l'Allemagne a exporté environ 155.000 tonnes des DEEE vers les pays en voie de développement (Salhofer et al., 2016). La réglementation spécifique concernant la gestion des DEEE dans la plupart des pays en voie de développement est pratiquement inexistante. Certains pays ont mis en place des lois pour gérer les déchets dangereux qui peuvent couvrir les DEEE.

Le secteur informel en Chine, l'un des pays les plus producteurs des DEEE, domine le traitement de ces derniers. Pour lutter contre le traitement informel, la Chine a mis en place deux importantes réglementations "le décret sur la gestion des déchets d'équipements électriques et électroniques, leur recyclage et leur élimination" dont l'objectif est d'encourager les producteurs à collecter et à traiter leurs DEEE, et "le décret pour le contrôle de la pollution causée par les produits électroniques d'information" (Salhofer et al., 2016)

En Afrique, beaucoup de pays souffrent aussi des quantités des DEEE produites localement et importées. Cependant, aucune loi spéciale n'a été mise en place pour lutter contre l'importation et contre le traitement informel.

Le Ghana a mis en place des lois et réglementations qui ont une certaine pertinence pour le contrôle et la gestion des déchets dangereux (y compris les DEEE), mais elles ne traitent pas directement les dangers posés à l'homme et à l'environnement de ces déchets (Amoyaw-Osei et al. 2011). La loi 490 établit en 1994 est pratiquement la seule loi étroitement liée à la gestion DEEE. Cette loi avait pour objectif de créer l'Agence de protection de l'environnement, dont la principale tâche est de réglementer, de coordonner et de gérer l'environnement (Amoyaw-Osei et al. 2011).

Le Nigeria est le seul pays africain qui a mis en place des lois environnementales traitant directement les DEEE. Règlement n ° 23, adopté en 2011, est basé sur l'approche du cycle de vie

et couvrent tous les aspects du cycle de vie des équipements électriques et électroniques, de l'importation jusqu'au traitement final. En outre, ce règlement est basé sur le principe de 5R « Réduire, Réparer, Récupérer, Recycler et Réutiliser » (Ogungbuy, 2012)

Tout comme l'Algérie, Il n'y a actuellement aucune législation spécifique pour les DEEE au Maroc. Néanmoins, il existe des lois relatives à la gestion des déchets dangereux à titre d'exemple la loi 28-00 relative à la gestion et à l'élimination des déchets nuisibles à l'environnement (Laissaoui et al. 2008).

2.3.3 Législation en Algérie

L'Algérie ne dispose pas d'un système de collecte sélective des déchets électroniques malgré le gisement des produits électroniques importés et produits localement.

Les e-déchets sont collectés avec les déchets ménagers. Le secteur informel accomplit la plupart des activités de déchets électroniques dont les activités comprennent la collecte auprès des décharges ou directement auprès des producteurs de déchets électroniques tels que les sociétés (Seitz, 2014).

Le système juridique algérien comprend un nombre de lois concernant la gestion des déchets dits dangereux, qui pourraient s'appliquer, ainsi, à la gestion des e-déchets (Annexe 1). Les lois et textes se résument comme suit (MATE, 2014) :

La loi n°01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets. L'objectif de cette loi est de fixer les modalités pour gérer, contrôler et traiter les déchets afin de :

- 1) Prévenir et réduire la production et la nocivité des déchets à la source.
- 2) Organiser le tri, la collecte, le transport et le traitement des déchets.
- 3) Valoriser les déchets par leur réemploi, recyclage et toute autre méthode visant à obtenir, à partir de ces déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie.
- 4) Traiter les déchets d'une manière écologiquement rationnelle.
- 5) Informer et sensibiliser les citoyens sur les impacts négatifs des déchets non traités sur la santé et l'environnement.

Loi n° 03-10 du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable. L'objectif de cette loi est de mettre en œuvre une politique nationale de protection de l'environnement dans le cadre du développement durable, tout en fixant les règles principales de la gestion de l'environnement.

Loi n°04-20 du 25 décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable. Cette loi a pour objet d'édicter les règles de prévention des risques majeurs et de gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable.

Décret exécutif N°03-477 du 9 décembre 2003 fixant les modalités et les procédures d'élaboration, de publication et de révision du plan national de gestion des déchets spéciaux

Décret exécutif N°06-104 du 28 février 2006 fixant la nomenclature des déchets, y compris les déchets spéciaux dangereux.

2.4. La gestion des e-déchets

La gestion des e-déchets est une tâche complexe qui nécessite une coopération entre différentes disciplines, afin de mettre en place le système adéquat qui permet d'atteindre des objectifs soulignés d'avance (figure 2.2). Plusieurs travaux de recherche ont traité la gestion des e-déchets sous plusieurs aspects, selon le besoin souligné, une partie importante de ces recherches était réservée au développement des méthodes de quantification des déchets générés, puisque la connaissance de la quantité des e-déchets générés est nécessaire pour la prise des décisions pour n'importe quel investissement de collecte, stockage et traitement des DEEE. D'autres travaux ont mis l'accent sur l'aspect législatif, en se concentrant sur l'exportation illégale des DEEE des pays développés vers les pays en voie de développement, et le traitement informel de ces déchets, par conséquent l'impact négatif sur l'environnement et l'être humain. Certaines études ont considéré l'information comme clé pour toute gestion des e-déchets réussie. La collecte, l'harmonisation et l'organisation de l'information peut aider les responsables à prendre une décision efficace qui se traduira par une meilleure gestion. L'adoption organisationnelle des stratégies de développement durable nécessite de nouvelles données concernant les effets sur l'environnement, et le partage de connaissances sur ce qui fonctionne, ce qui ne fonctionne pas, et pourquoi (Detmar, 2010).

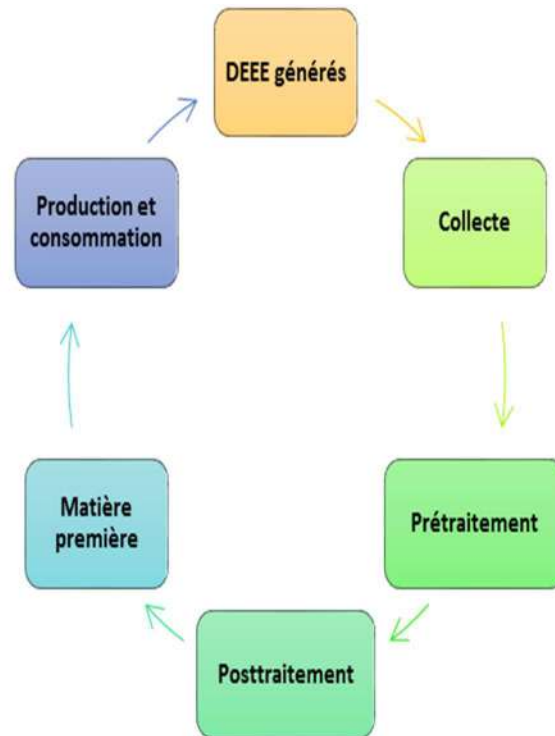


Figure 2.2. Schéma simplifié de cycle de gestion des DEEE.

2.4.1. Les DEEE générés

Selon un rapport de l'Université des Nations-Unies (Badé et al. 2015) environ 41,8 millions de tonnes de DEEE ont été générés en 2014, deux millions de plus qu'en 2013. Selon l'étude, le royaume de Norvège est le pays qui produit la plus grande quantité de DEEE par habitant, avec 28,4 kg, suivi de la Suisse et l'Islande avec 26,3 et 26,1 kg respectivement (Badé et al. 2015).

La région qui génère le moins de DEEE est l'Afrique, avec un rejet estimé à 1,7 kg par habitant. Au total, le continent africain a produit 1,9 millions de tonnes de ces déchets en 2014.

En termes de volume, les Etats-Unis et la Chine arrivent en tête, totalisant tous deux 32 % de la part mondiale DEEE. Ces déchets avaient ainsi pour 2014 une valeur estimée à 48 milliards d'euros (Badé et al. 2015).

Cependant, les résultats de cette étude portent certaines limites. Tout d'abord, la production nationale n'a pas été prise en considération pour les pays hors l'union européenne, cela peut générer une incertitude de $\pm 10\%$ selon les auteurs du rapport. De même, la durée de vie des équipements électroniques enregistrés en Europe a été appliquée pour tous les pays, cela peut engendrer une incertitude de $\pm 5\%$ de la quantité des déchets estimée. Le tableau 2.2 présente les différentes quantités des DEEE générés dans différents pays (Badé et al. 2015).

Tableau 2.2. Quantités des DEEE générés dans différents pays (Balde et al. 2015)

DEEE générés par pays en 2014					
Pays européens	kilotonne	kg/hab./an	Pays MENA	kilotonne	kg/hab./an
Allemagne	1769	21,6	Algérie	183	4,9
Autriche	188	22	Egypte	373	4,3
France	1419	22,1	Jordanie	30	4,5
Italie	1077	17,6	Koweït	69	17,2
Pays-Bas	394	23,3	Maroc	121	3,7
Suisse	213	26,3	Tunisie	56	5

2.4.2. La collecte

Avant de traiter les déchets électriques et électroniques efficacement, ils doivent d'abord être collectés. La collecte des déchets est donc la première phase importante de l'ensemble du processus de recyclage. Beaucoup d'études ont été réalisées pour améliorer l'efficacité de la collecte.

Dans la pratique, il existe différents canaux pour collecter les DEEE selon la réglementation du pays.

En Europe, la majorité des systèmes de collecte des DEEE générés par les ménages ont été mis en place en collaboration avec les municipalités et les vendeurs des EEE en détails.

L'union européenne a exigé dans la directive 2002/96/CE relative aux DEEE de collecter initialement 4 kg/hab./an des DEEE, cet objectif a été atteint par l'Europe de l'Ouest, tandis que pour les nouveaux États membres cela est encore un défi (Salhofer et al. 2016).

La directive européenne II a fixé des objectifs d'augmenter les taux de collecte des DEEE à partir de 2019 (65% de la quantité des équipements mise sur le marché ou encore 85% des DEEE générés) (Salhofer et al. 2016) ce qui a poussé plusieurs pays à analyser différentes options pour augmenter l'efficacité de la collecte.

- Le modèle de collecte Kerbside a été présenté comme une solution pour les habitants des zones densément peuplées. Un essai de la collecte des DEEE de petite taille à Vienne a touché le taux de 0,4 à 1,1 kg/hab./an, le même modèle a atteint 1,33 kg/hab./an à Copenhague (Borregaard, 2013)
- La collecte des conteneurs dans les lieux publics ; les études de cas montrent que le taux de collecte des DEEE de petite gamme pour la Suède et l'Allemagne vont de 0,04 à 0,84 kg/hab./an (Salhofer, S., 2014)

- La collecte intensifiée des DEEE de petites gammes dans les points de vente en détail ; deux études de cas en Suède et en Allemagne sont analysées, elles montrent que seules de faibles quantités sont récupérées (Salhofer, 2014)

Le tableau 2.3 présente les différentes quantités des DEEE générés et collectés dans certains pays européens.

Tableau 2.3. Quantités des DEEE collectés dans certains pays européens (Balde et al. 2015)

Pays	DEEE collectés	
	kg/hab./an	Année
Autriche	9,0	2012
Belgique	10,3	2012
France	6,8	2010
Suède	17,5	2012
Allemagne	8,5	2012
Italie	3,8	2012

Généralement dans les pays en voie de développement, les équipements électriques et électroniques en leur fin de vie sont stockés par des entreprises pour une certaine période avant de les vendre aux enchères. Pour les DEEE générés par les ménages, ils sont soit stockés ou bien jetés avec les déchets ménagers (Résultats de notre enquête réalisée auprès des ménages et entreprises algériens).

La réutilisation des DEEE est une pratique courante dans les pays en voie de développement. Selon la directive 2002/96/CE, la réutilisation est définie comme toute opération par laquelle les DEEE, ou leurs composants, sont utilisés pour le même usage que celui pour lequel ils ont été conçus y compris la poursuite de l'utilisation des équipements ou des composants déposés aux points de collecte, chez les distributeurs, chez les recycleurs ou chez les fabricants.

2.4.3. Le traitement des DEEE

Selon la directive 2002/96/CE, le traitement des DEEE est défini comme toute opération suivant l'arrivée des DEEE dans des installations de dépollution, de démontage, de broyage, de valorisation ou de préparation à l'élimination, ainsi que toute autre opération effectuée en vue de la valorisation et/ou de l'élimination des DEEE. Le traitement des DEEE diffère d'un pays à un autre et d'un équipement à un autre. Les décharges et les incinérateurs municipaux ne sont pas considérés comme des options de traitement appropriées pour la plupart des DEEE en raison de l'absence de

contrôle de la toxicité et la récupération des matériaux. Dans de nombreuses régions industrialisées, la séparation mécanique est la technique dominante pour le prétraitement des DEEE en raison des coûts élevés de la main-d'œuvre et aussi de la disponibilité des unités de traitement de haute technologie pour les plastiques et les métaux (Wang, 2014).

Par contre, le démontage manuel est utilisé dans la plupart des économies émergentes pour le prétraitement en raison des coûts relativement faibles de la main d'œuvre, aussi le démantèlement manuel permet de récupérer les composants en bon état (Wang, 2014).

La figure 2.3 présente une sélection de scénarios de traitement communs qui résultent de la combinaison de différentes options dans chaque étape du traitement de la dépollution et à la fin de traitement. Considérant la perte des matériaux et l'impact négatif sur l'environnement de l'incinération et l'enfouissement des ordinateurs, ce scénario est exclu dans cette thèse.

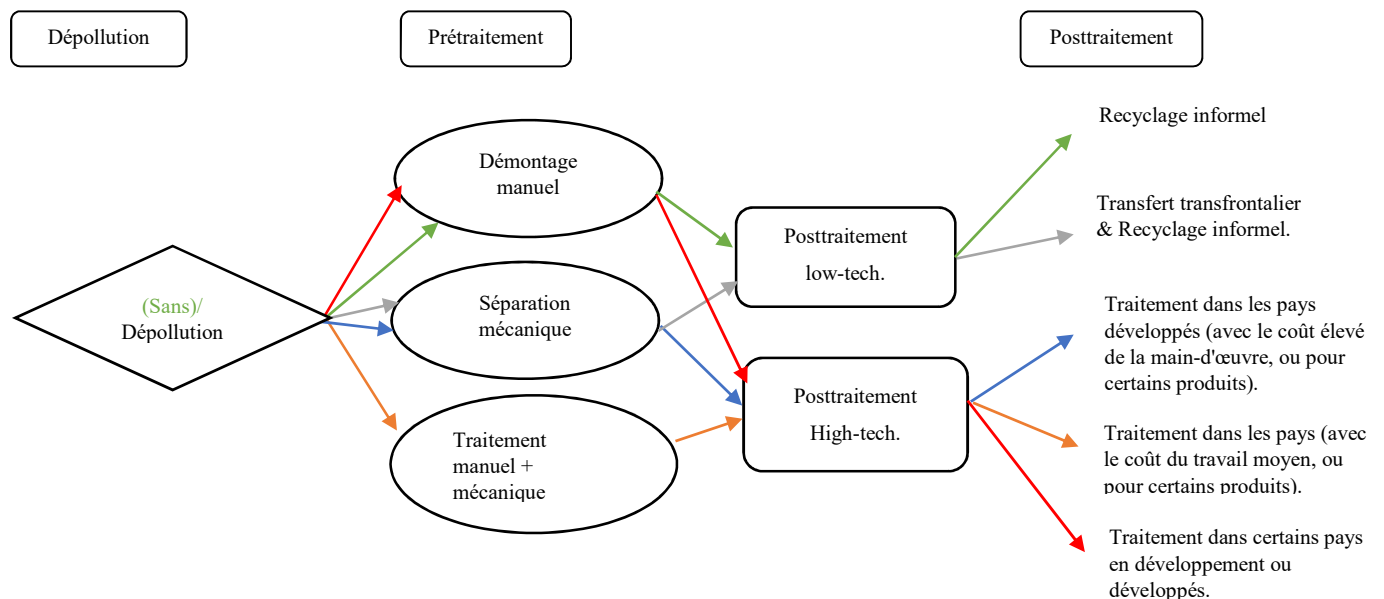


Figure 2.3. Scénarios potentiels de traitement des DEEE (Modifié de Wang, 2014)

Dépollution :

Après avoir classé les DEEE selon des critères bien définis (peut-être par taille, type ou autres), la dépollution est généralement la première étape du prétraitement. Il s'agit d'enlever et séparer toutes substances dangereuses et assurer que ces derniers sont préparés pour une élimination écologiquement rationnelle.

Prétraitement :

Le prétraitement peut être effectué (Cui et al. 2003) :

- Manuellement.
- Mécaniquement (réduction automatique de la taille des différents composants)
- Semi automatiquement combinant des techniques manuelles et mécaniques.

Le choix de la manière d'effectuer un prétraitement a une influence directe sur le post-traitement. Selon Hagelüken 2006, si par exemple le prétraitement envoie une substance précieuse, à un procédé de récupération qui ne peut pas la récupérer, ceci est considéré comme une perte économique et matérielle. Cependant, cela ne peut pas être complètement évité, il arrive que certaines cartes de circuits imprimés se retrouvent dans des unités de recyclages des métaux ferreux qui ne sont pas mis en place pour la récupération des métaux précieux.

Post-traitement :

C'est la dernière étape de la chaîne de traitement dans laquelle des différents matériaux sont raffinés et valorisés en des matériaux ou des produits qui peuvent être utilisés par la suite. Le post-traitement est un peu spécifique, chaque matériau nécessite une technologie bien déterminée pour atteindre la performance environnementale.

Ces technologies impliquent généralement, les procédés thermiques et chimiques métallurgiques pour réduire les impuretés et affiner les matériaux (Cui et al. 2003).

2.5. Les systèmes d'information et d'aide à la décision (SIAD)

Les systèmes d'information et d'aide à la décision ont pour objectifs d'aider les responsables à prendre des décisions de plus en plus efficaces et efficientes sur différents niveaux (Florin-Gheorghe et al. 2010). Il n'y a pas une définition uniforme pour le système d'aide à la décision, la plus utilisée est celle donnée par Adelman en 1992 : le Système d'information et d'aide à la décision est un programme informatique interactif qui utilise des méthodes d'analyse, telles que l'analyse de la décision, des algorithmes d'optimisation, la planification des programmes (Kai 2002)

2.5.1. Méthodes d'évaluation utilisées pour l'aide à la décision

Actuellement, un grand nombre de méthodes, des approches et des outils de modélisation ont été développés pour soutenir la prise de décision dans la gestion des déchets solides (Finnveden et al. 2007). Avec le grand nombre de méthodes disponibles, il devient de plus en plus difficile pour les

décideurs de comprendre, choisir et appliquer la méthode qui est la plus appropriée à leurs besoins spécifiques (Zurbrügg, 2013)

Depuis la fin des années 1960, la gestion des déchets solides et ses conséquences environnementales ont reçu une attention croissante dans le monde entier (Eriksson et al. 2003)

Avec la complexité croissante de la gestion des déchets, le choix de la meilleure solution devient une tâche plus difficile. Mettre l'accent sur les facteurs socio-économiques et environnementaux est devenu évident (El-Fadel et al. 2002).

Actuellement, un grand nombre de méthodes d'évaluation, comme indiqué dans la figure 2.4 ont été développées pour soutenir la prise de décision dans la gestion des déchets. En règle générale, les outils d'évaluation sont divisés en trois aspects.

Ces méthodes ont été conçues dans l'objectif d'aider les décideurs à appliquer des améliorations dans la gestion des déchets solides en fournissant une meilleure connaissance de la situation ou du problème étudié. Quel que soit le problème de décision, il faut tout d'abord bien définir des objectifs clairs qui sont aussi précis que possible, convenus entre les parties prenantes, réalistes et dépendantes du temps (DCLG, 2009).

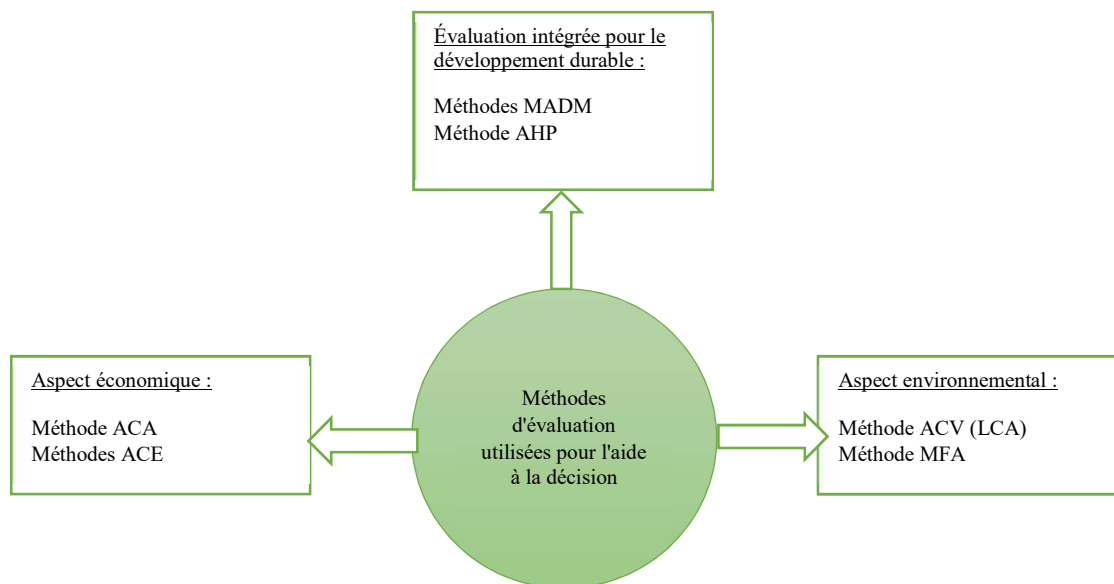


Figure 2.4. Différentes méthodes d'évaluation utilisées pour l'aide à la décision

L'application des outils ou bien des méthodes dépend de l'objet de l'investigation, par exemple organisation ou entreprise, matière ou substance, et les types d'impact étudiés. Dans certaines

études ces approches sont utilisées séparément ou bien combinées avec d'autres méthodes d'évaluation, afin de développer une vision plus globale de la situation.

2.5.1.1 Aspect environnemental

La gestion des déchets solides vise principalement à conserver les ressources naturelles et limiter leurs épuisements, et vise aussi à protéger l'environnement.

Parmi plusieurs méthodes d'évaluation, nous mettons l'accent sur les plus utilisées selon la littérature. La méthode de l'analyse du cycle de vie (ACV) (en anglais : life Cycle Assessment LCA) est une méthode qui permet de quantifier et d'évaluer la performance environnementale des produits, durant leur cycle de vie complet, c'est à dire de l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination des produits en fin de vie (Zurbrügg, 2013). La procédure de réalisation d'une ACV est bien définie et décrite par la norme ISO 14040 (ISO 14044, 2006).

La figure 2.5 présente les différentes étapes d'une analyse du cycle de vie (ACV).

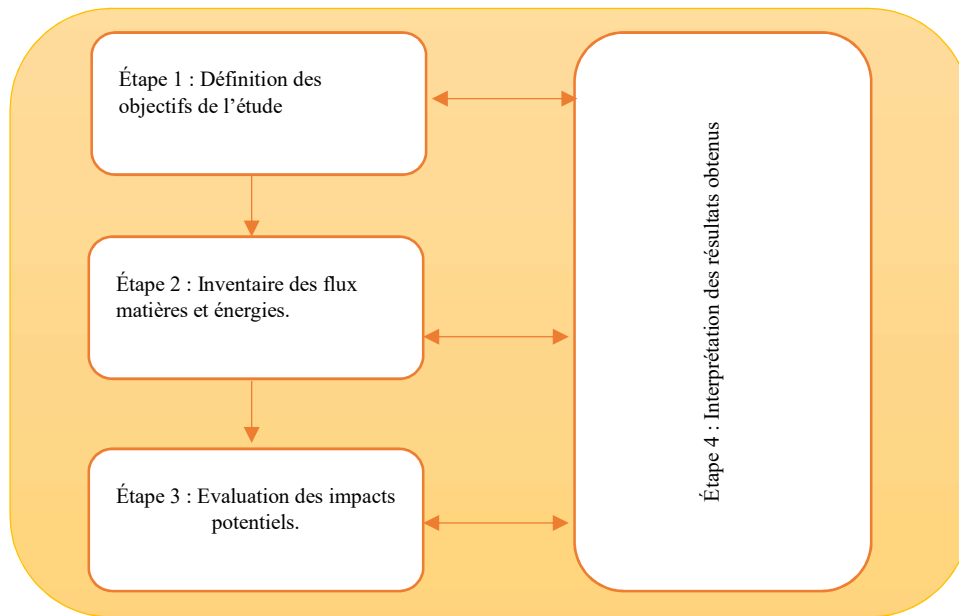


Figure 2.5. Le cadre méthodologique général pour appliquer une ACV (ISO 14044, 2006).

La méthode ACV a été largement appliquée dans le domaine de la gestion des déchets, surtout dans le domaine de la gestion des déchets électriques et électroniques, plusieurs études ont été menées sur l'impact environnemental du recyclage des DEEE particulièrement sur les effets de l'innovation technologique sur la gestion des déchets (B. Lu et al. 2015, Rodriguez-Garcia et al. 2016).

L'analyse des flux de matières ou AFM (en anglais : Material flow Analysis- MFA-) est une méthode scientifique qui consiste à calculer, interpréter et de décrire les processus du métabolisme. Le modèle de flux de matière peut servir comme un outil important pour le suivi et l'évaluation de la consommation des ressources et de l'émission des déchets. Une AFM fournit un ensemble complet et cohérent de l'information sur tous les flux et les stocks d'une matière particulière dans un système (Brunner et Rechberger 2003). Les termes « bien » et « substance » sont très utilisés pour déterminer le sort de la matière dans un système. La distinction entre ces deux termes est que la « substance » est un élément chimique (par exemple le carbone) ou le composé (par exemple dioxyde de carbone), alors qu'un « bien » se compose de plusieurs substances ou est un mélange de substances (Brunner et Rechberger 2003). Un « bien » peut avoir une valeur positive (par exemple l'eau potable) ou une valeur négative (par exemple les déchets solides). Dans le contexte de l'AFM, le terme « matière » peut servir comme un terme générique pour les substances et les biens. L'AFM a été utilisée dans des études dans les pays en voie de développement, particulièrement dans la gestion des déchets solides. Cependant, la disponibilité et la fiabilité des données est le problème principal qui a limité l'utilisation de cette méthode dans les pays en voie de développement.

Parmi les études publiées sur l'utilisation de l'AFM dans le domaine des déchets électroniques, nous citons : Ibrahim et al. 2013, leur travail a mis l'accent sur la quantité des déchets des micro-ordinateurs générés au Nigeria. Les auteurs ont développé un modèle de quantifications en utilisant l'AFM. Les résultats ont dévoilé qu'environ 41% des micro-ordinateurs sont stockés par leur utilisateurs, 35% sont réutilisés et environ 24% sont éliminés directement. Kahhat et al. 2012 ont utilisé l'AFM et développé une méthodologie pour quantifier l'exportation des équipements usés des États-Unis vers des pays en développement, les résultats montrent que la quantité des déchets des micro-ordinateurs générée en 2010, est de 40 millions unités et que 6 à 29 % de cette quantité est exportée.

2.5.1.2 Aspect économique

Pour mettre en place une stratégie adéquate pour gérer les déchets électroniques, trouver une combinaison entre l'aspect économique et l'aspect environnemental est impératif. Malheureusement, la gestion des déchets dans les pays en développement est considérée comme un lourd fardeau sur les budgets destinés à la gestion des déchets (Zurbrügg, 2013). Améliorer le

coût d'estimation pour la gestion des déchets améliore la prise de décision dans les différents aspects du service tel que les contrats pour les nouveaux équipements (Milke, 2006).

Les deux méthodes d'évaluation économique les plus utilisées sont l'Analyse coûts-avantages (ACA) appelée aussi Analyse coûts-bénéfice (en anglais Cost-Benefit Analysis CBA) et l'analyse coût-efficacité (ACE) en anglais (Cost-Effectiveness Analysis CEA).

L'Analyse coûts-avantages (ACA) est un processus systématique pour calculer et comparer les avantages et les coûts d'un projet (Zurbrügg, 2013). Elle considère les effets positifs et négatifs, à court et long terme (figure 2.6). L'ACA est réalisé en comparant la valeur monétaire des bénéfices avec la valeur monétaire des coûts. Il convient de souligner que l'ACA est un outil d'aide à la décision, et non pas un outil de prise de décision.

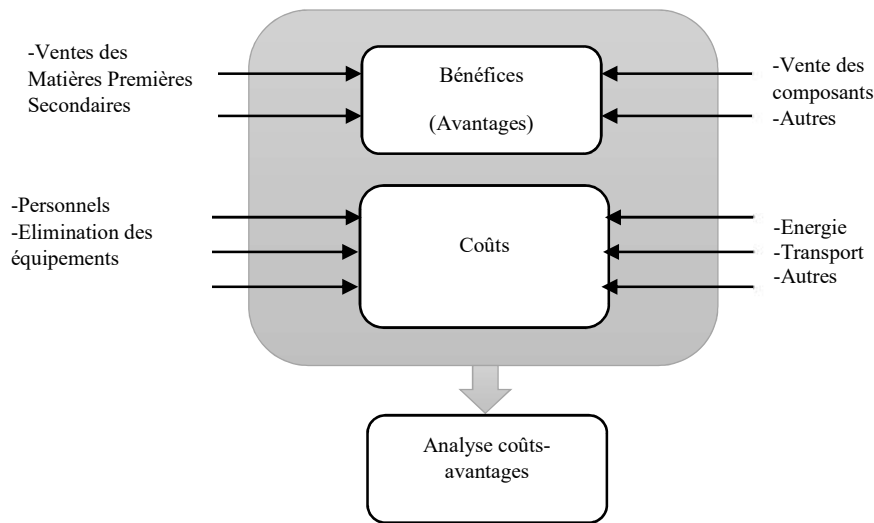


Figure 2.6. Un exemple d'une analyse coûts-avantages

L'analyse coût-efficacité (ACE) s'est largement répandue ces dernières années dans le domaine de la santé. C'est une alternative à l'analyse coûts-avantages (ACB). L'optimisation est l'objectif pour lequel la méthode est utilisée (www.betterevaluation.org).

Elle est très utile lorsque les analystes font face à des contraintes qui les empêchent d'effectuer une analyse coût-avantages. La contrainte la plus courante est l'incapacité des analystes à monétiser les bénéfices surtout dans le domaine médical, par exemple « Le nombre de vies sauvées » (betterevaluation.org).

2.5.1.3 Évaluation intégrée pour le développement durable

Les méthodes d'aide à la décision multicritères ont été utilisées la première fois dans le secteur de l'économie et de la finance dans les années 1960 (Steuer et al. 1996). Toutes les méthodes

d'aide à la décision multicritères (MADM) impliquent des techniques de plusieurs étapes pour définir des objectifs, choix des critères pour mesurer les objectifs, spécifier les alternatives, utiliser l'algorithme mathématique approprié pour le classement des alternatives, en choisissant la meilleure alternative (Mosadeghi et al. 2009).

Malgré les différentes définitions attribuées à la MADM par différents chercheurs, la théorie fondamentale reste la même. Ils identifient généralement une seule option privilégiée, classent les alternatives possibles et produisent un nombre limité d'alternatives pour une évaluation ultérieure détaillée (Mosadeghi et al. 2009).

Selon Li, 2007, il existe plus de 70 techniques de MADM (figure 2.7). Chacune a une méthodologie d'analyse et de combinaison des différentes données afin de résoudre un type de problème particulier.

Les différentes approches de MADM aident les décideurs à prendre des décisions précises (Aragonés-Beltrán et al. 2010).

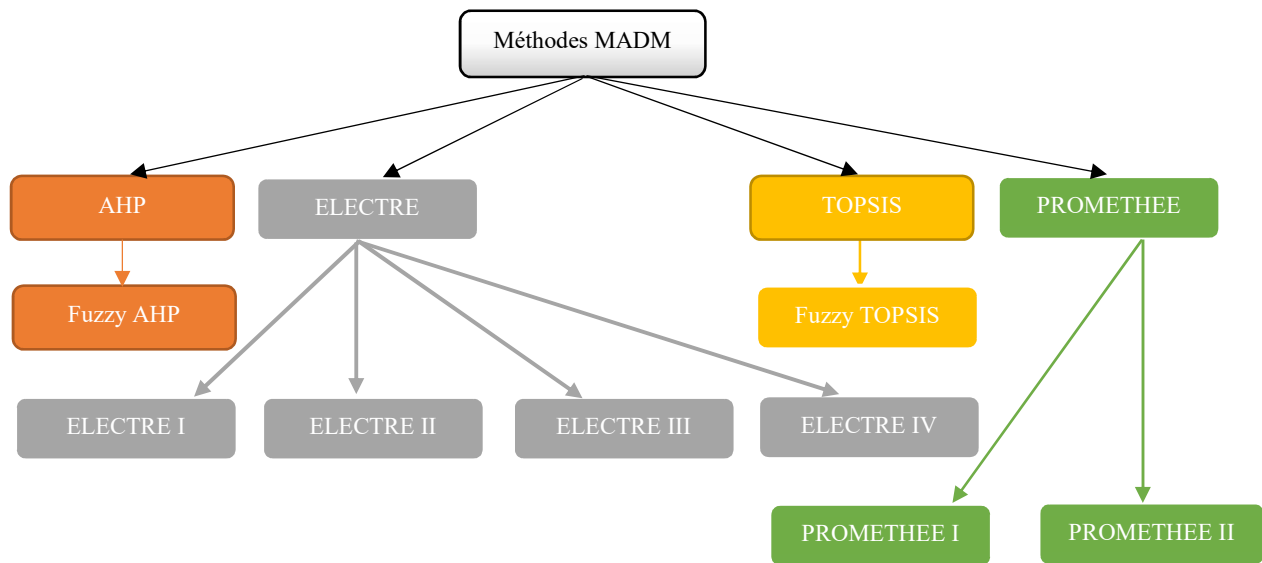


Figure 2.7. La structure hiérarchique des différentes méthodes ADM

Processus hiérarchie analytique (AHP) est l'une des plus anciennes méthodes de MADM, développés en 1980 par (Saaty, 1980). Le terme « analytique » indique que le problème est décomposé en ses éléments constitutifs. Le terme « hiérarchie » indique que la hiérarchie des éléments constitutifs est répertoriée par rapport à l'objectif principal tandis que le terme « processus » indique que les données et les jugements sont traités pour atteindre le résultat final.

La méthode AHP est caractérisée par sa souplesse d'être intégrée à différentes techniques comme la programmation linéaire et la logique floue.

ELECTRE a été appliquée dans plusieurs études dans les domaines de l'énergie, la construction et en particulier dans le domaine environnemental. La méthode ELECTRE donne un système complet de relations binaires de dépassement entre les alternatives. Elle permet de classer un nombre limité de variables (V) évaluées par un ensemble de critères (C).

TOPSIS est une méthode d'analyse de décision à critères multiples proposée par Hwang et Yoon en 1981. Elle est utilisée pour classer les alternatives avec un nombre fini de critères.

Comme les autres méthodes, PROMETHEE est basée sur le classement de l'ensemble des alternatives dont l'objectif principal est de trouver l'alternative qui est la plus appropriée pour les décideurs. Les méthodes de classement comparent généralement une solution à une autre.

Toutes ces différentes méthodes seront détaillées dans la partie des systèmes d'information et d'aide à la décision.

Le tableau 2.3 résume quelques travaux de recherche sur les différentes méthodes d'aide à la décision multicritères dans le domaine de la gestion des déchets.

Tableau 2.4. Quelques travaux de recherches sur les MADM

Méthodes	Déchets solide	DEEE	Références
Decision Support System (ELECTRE III)		X	Achillas et al. 2010
Decision Support Model (LINMAP)		X	Bereketli et al. 2011
GIS Based AHP And Ordered Weighted Averaging Method	X		Gbanie et al. 2013 Sener et al. 2010
GIS and Analytic Hierarchy Process	X		Queiruga et al. 2008
PROMETHEE		X	Gorsevski et al. 2012
GIS Based AHP And Ordered Weighted Averaging Method	X		
PROMETHEE		X	Rousis et al. 2008

3. Estimation des déchets électroniques générés en Algérie

L'évolution rapide des technologies de l'information et de la communication (TIC) et la durée de vie des produits électroniques, relativement courte, a engendré une importante quantité des déchets des équipements électriques et électroniques (DEEE, aussi e-déchets). Ces derniers présentent le flux croissant le plus rapide des déchets solides municipaux au cours de la dernière décennie (Robinson, 2009). Selon Baldé et al. 2014, près de 41,8 millions de tonnes (Mt) de DEEE ont été générés dans le monde entier en 2014 et devraient augmenter à 50 millions de tonnes en 2018.

La quantification et la prévision des DEEE sont des données clés pour mettre en œuvre une stratégie à long terme pour gérer les e-déchets. Selon les travaux de recherches publiés, il existe plusieurs méthodes utilisées pour estimer la quantité des DEEE produite. Le tableau 3.1 les résume.

Tableau 3.1. Comparaison entre les différentes méthodes d'estimation (Modifier de : EEA 2003, Chancerel 2010, Wang 2014)

Méthodes	Données requises					Applicable à	
	Ventes annuelles		Stocks	Durée de vie		Marchés saturés	Marchés dynamiques (non-saturés)
	Cont. *	Disc. *		Durée de vie moyenne	Durée de vie distribuée		
Modèle Market supply (Distribution Delay)	✓				✓	✓	✓
Modèle Market supply (Simple delay)		✓		✓		✓	
Modèle Time Step		✓	✓			✓	✓
Méthode Carnegie Mellon	✓			✓		✓	✓
Méthode Stock and lifespan			✓		✓	✓	
Leaching model			✓	✓		✓	

Cont. * Un historique des données des ventes est nécessaire pour le calcul.

Disc. * Données de l'année d'évaluation en cours sont suffisantes pour le calcul.

L'analyse des flux de matières (MFA) est la méthode la plus utilisée. Brunner et Rechberger (2004) l'ont défini comme une évaluation systématique des flux et des stocks des matériaux dans un système bien défini dans l'espace et dans le temps. La méthode est basée sur la loi de la conservation de la matière, c'est-à-dire, les flux et les stocks peuvent être contrôlés par un équilibre des matériaux, comparant toutes les données : d'entrées, des stocks et des sorties d'un processus.

Cette méthode était utilisée dans différentes études de cas, avec certaines modifications selon le cas étudié (Aizawa et al. 2008, Kang et al. 2006, Liu et al. 2006, Steubing et al. 2010 Streicher-Porte et al. 2005).

La plupart des modèles de MFA ont mis l'accent seulement sur les flux, cependant, les chercheurs ont récemment réalisé que les stocks jouent un rôle important dans l'estimation des futures quantités des déchets surtout pour les équipements ayant une longue durée de vie (D. Sinha, 2013). Les différentes méthodes d'estimation de la quantité des déchets électroniques sont données par les formules suivantes.

3.1 Le modèle "Market supply (Distribution Delay)"

La quantité des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) est le résultat de la convolution entre les ventes des années successives et les taux de l'obsolescence respectifs de l'année d'évaluation.

$$DEEE(t) = \sum_{t=t_0}^n V(t) \cdot L(d) \quad \text{eq. (1)}$$

$V(t)$: Les ventes des équipements électriques et électroniques (EEE) au cours de l'année t . $L(d)$: est la valeur de la durée de vie distribuée qui peut être représentée par une fonction de densité de probabilité (à titre d'exemple : la distribution de Weibull, de Gauss, exponentielle, et autres)

3.2 Le modèle "Market supply (Simple Delay)"

La quantité des DEEE générée est calculée à partir des données historiques des ventes (V) de l'année $(t - L)$ où t représente l'année d'évaluation et L est la durée de vie moyenne de l'équipement (eq. 2)

$$DEEE(t) = V(t - L) \quad \text{eq. (2)}$$

Cette méthode est applicable mieux pour les équipements ayant une longue durée de vie (les réfrigérateurs, machines à laver, appareils de ce type)

L'avantage de cette méthode est que le calcul peut être effectué facilement en utilisant les données de vente, ou bien les données de l'importation et/ou la production d'équipements électriques et électroniques (EEE) (Ikhlayel, M. 2016)

3.3 Le modèle “Time step”

La quantité des DEEE est calculée à partir des ventes et de la variation des stocks des EEE. La méthode est représentée par l'équation (3). La variation de stock est la différence entre le stock de l'année en cours d'évaluation et celui de l'année précédente.

$$DEEE(t) = V(t) - [S(t) - S(t - 1)] \quad \text{eq. (3)}$$

$V(t)$: représente les ventes des EEE pour l'année t . $S(t)$ et $S(t - 1)$: représente, respectivement, les stocks des EEE de l'année t et l'année $t - 1$ (Araújo et al. 2012).

3.4 La méthode “Carnegie Mellon”

La méthode Carnegie Mellon a été à l'origine, développée par Matthews et al. (1997) pour estimer la quantité des micro-ordinateurs fabriqués aux Etats-Unis. La méthode estime la quantité des DEEE produites en considérant la quantité d'EEE réutilisés, recyclés et stockés ainsi que les ventes tout dépend du cas d'étude. La méthode est donnée par l'équation (4)

$$DEEE(t) = V(t - L) + R(t - Lr) + Sr(t - Ls) \quad \text{eq. (4)}$$

$V(t - L)$: représente les ventes des EEE au cours de l'année $(t - L)$. L est la durée de vie moyenne d'EEE. $R(t - Lr)$ est la quantité des EEE réutilisée. $Sr(t - Ls)$ est la quantité des EEE stockée. Lr est la durée de vie moyenne des EEE réutilisés. Ls est la durée de vie moyenne d'EEE stockés. Cette méthode a été aussi utilisée par Peralta et al. 2006 et Dwivedy et al. 2010 pour estimer la quantité des DEEE en Philippine et en Inde, respectivement.

3.5 La méthode “Stock and lifespan”

Les données sur les stocks des EEE des années successives sont nécessaires. Ces derniers sont multipliés par la durée de vie distribuée des EEE. La méthode est donnée par l'équation (5) (Walk, 2009)

$$DEEE(t) = V(t) - [S(t) - S(t - 1)] = \sum_{t=t_0}^n V(t).L(d) \quad \text{eq. (5)}$$

$V(t)$: représente les ventes des EEE pour l'année t . $S(t)$ et $(t - 1)$: représente les stocks des EEE de l'année t et l'année $t-1$ respectivement. $L(d)$: est la valeur de la durée de vie distribuée qui peut être représentée par une fonction de densité de probabilité (à titre d'exemple : la distribution de Weibull, de Gauss, exponentielle)

3.6 Le modèle “Leaching”

La quantité des DEEE est considérée comme un pourcentage fixe du stock total des EEE divisé par la durée de vie moyenne de l'équipement. Ce pourcentage est calculé en utilisant l'équation (6) (Wang, 2014).

$$DEEE(t) = \frac{S(t)}{L} \quad \text{eq. (6)}$$

$S(t)$: représente le stock des EEE au cours de l'année t . L est la durée de vie moyenne de l'équipement.

3.7 Modèles de diffusion

La prévision des ventes des EEE a fait l'objet de plusieurs recherches et études depuis les années 1960. L'article publié par Bass 1969, était le premier article ayant utilisé la courbe logistique pour prévoir la diffusion des innovations dans un marché. Cet article était le point de départ pour développer d'autres modèles de diffusion et prévision (D. Sinha, 2013). Plusieurs articles ont utilisé différents modèles pour prévoir la diffusion des EEE et par conséquent la quantité des DEEE. Ces modèles vont être détaillées au cours de cette étude.

Walk, 2009 a présenté une méthodologie en trois étapes pour estimer et prévoir les quantités de déchets générés des télévision et écrans de tube cathodique (CRT) dans la région de Bade-Wurtemberg en Allemagne. La méthodologie consiste à :

- Modéliser la durée de vie en utilisant la distribution de Weibull.
- Extrapoler les stocks des écrans CRT.
- Utiliser l'approche Fisher-Pry pour estimer la substitution d'une technologie ancienne (CRT dans ce cas) par une nouvelle (écrans de type LCD)

Yu et al. 2010 ont combiné un modèle de diffusion et l'analyse des flux de matières pour prévoir la production mondiale des ordinateurs personnels obsolètes (PC). Contrairement à Walk et al. 2009, la durée de vie moyenne des PC est considérée comme une valeur constante.

Dans cette partie, nous présentons les modèles d'estimation des DEEE générés et les modèles de diffusion utilisés pour estimer les stocks des ordinateurs en Algérie.

3.8 Enquête sur l'utilisation des équipements informatiques en Algérie

Dans l'objectif de collecter autant de données statistiques sur les flux des ordinateurs et d'analyser le comportement des consommateurs et examiner le sort de ces ordinateurs à leur fin de vie en Algérie, nous avons mené une enquête en envoyant de nombreux questionnaires aux différentes institutions d'éducation, entreprises privées et publiques et des ménages. Les questionnaires portent des questions sur les ordinateurs et les écrans de la phase d'achat jusqu'à leur fin de vie. Le tableau 3.2 résume le nombre et le type d'entreprises contactées.

Tableau 3.2. Institutions et entreprises contactées.

	Nombre d'employés	Réponses reçues
Institutions & Education	\	250*
Entreprises Publiques	De 35 à 825	13**
Entreprises privés	De 6 à 110	9**
Ménages	\	180**

(*) Lors de notre visite à la Direction de l'éducation de la wilaya de Batna, nous avons le total d'ordinateurs utilisés dans toutes les écoles de Batna (78 écoles secondaires et 169 écoles moyennes)

(**) Peu de ces entreprises et des ménages étaient hors de la wilaya de Batna.

Au cours de la préparation de cette enquête, nous avons rencontré plusieurs obstacles :

- Les producteurs et les importateurs des ordinateurs et leurs accessoires refusent de divulguer toute information sur les quantités produites ou bien importées.
- Le taux de réponse des entreprises aux questionnaires était relativement faible.

En raison de leur nature, de leur manière d'acheter les équipements informatiques, et la façon dont ils les disposent, les consommateurs ont été divisés en quatre groupes dans cette étude : les institutions et les services d'éducation, les entreprises publiques, les entreprises privées et les ménages. Les figures de (3.1) à (3.5) présentent les résultats de l'enquête.

Nous devons interpréter les résultats de cette enquête attentivement, en raison du faible taux de réponses, le nombre des échantillons n'est pas homogène.

3.8.1 Type d'ordinateurs en utilisation

L'enquête a révélé les pourcentages suivants des ordinateurs en utilisation (figure 3.1).

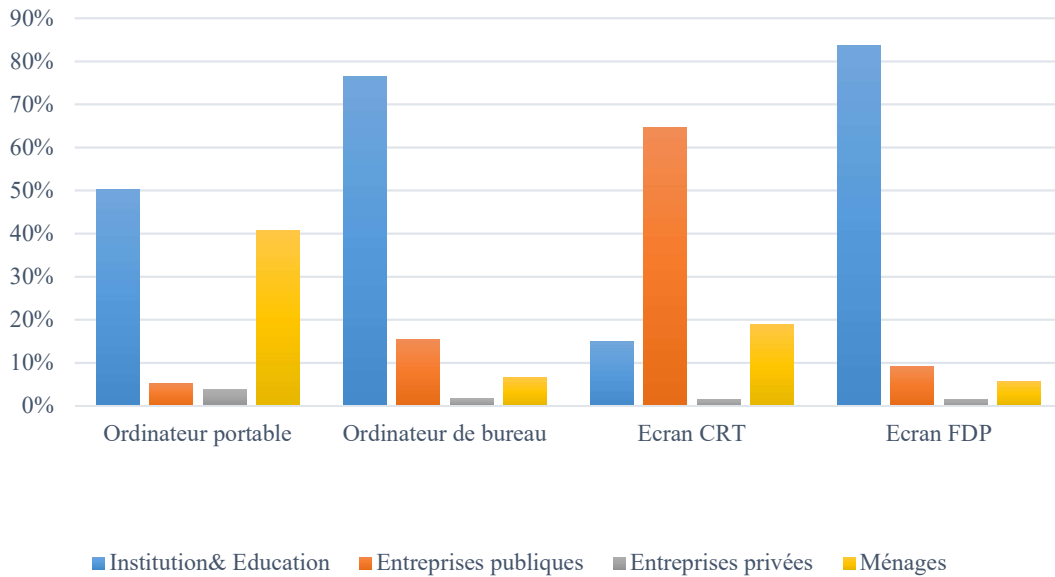


Figure 3.1. Différents types d'ordinateurs utilisés en Algérie en 2013.

D'après la figure 3.1, nous constatons que plus de 70% des ordinateurs de bureau, et environ 50% des ordinateurs portables du total des ordinateurs sont utilisés par les institutions et services de l'éducation. Aussi un pourcentage important de portables, environ 40%, est utilisé par les ménages.

3.8.2 Acquisition du matériel informatique : neuf ou occasion

L'enquête auprès des ménages a montré que la plupart de ces derniers préfèrent acheter de nouveaux équipements informatiques, mais certains d'entre eux ; en particulier les familles à faible revenu ; acquièrent un ordinateur utilisé (seconde main). Par contre toutes les entreprises interrogées achètent des ordinateurs neufs (figure 3.2).

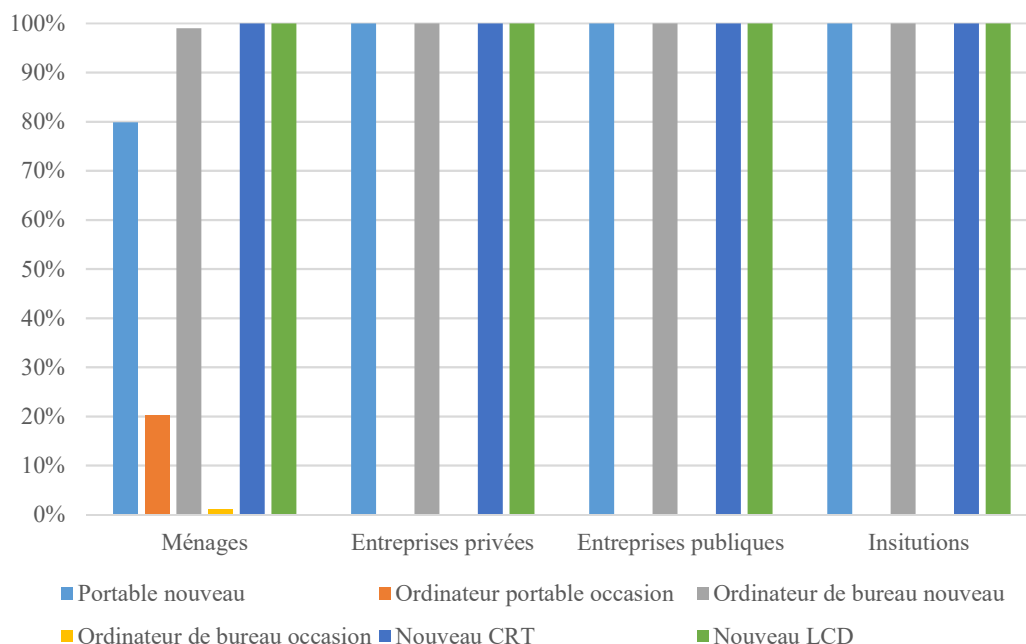


Figure 3.2. Acquisition d'équipements informatiques (Neufs ou d'occasion) en Algérie pour l'année 2013

3.8.3 Condition pour mettre l'ordinateur au rebut en Algérie

Pour les 180 ménages interrogés, près de 47% des ordinateurs portables mis au rebut étaient en état de marche, 47% cassés réparables et 6% cassés irréparables (figure 3.3).

Pour les ordinateurs de bureau mis au rebut, environ 51% étaient cassés réparables, 35% en état de marche et 14% cassés irréparables (Figure 3.4). Pour les entreprises, la cause principale de changement des micro-ordinateurs était les pannes irréparables.

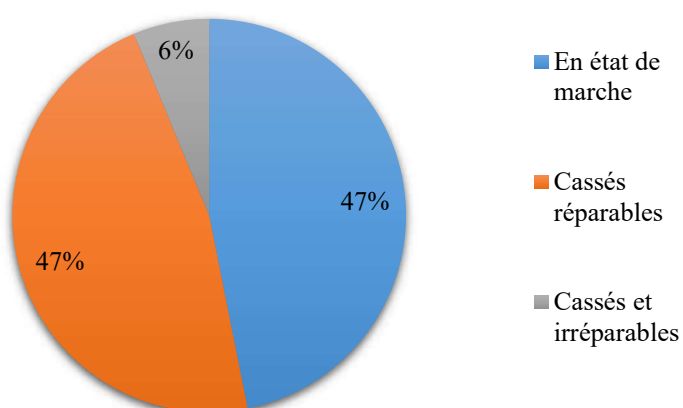


Figure 3.3. État des portables mis à l'écart par les ménages algériens.

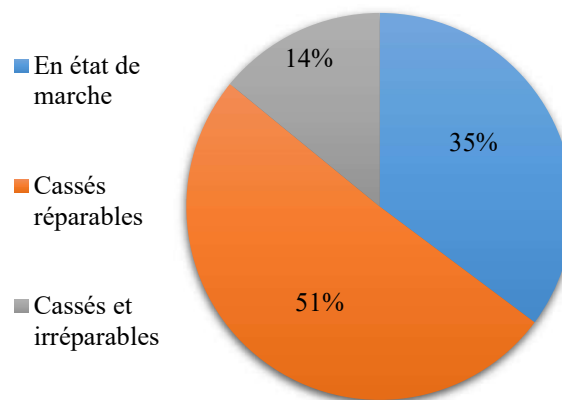


Figure 3.4. État des ordinateurs de bureau mis à l'écart par les ménages algériens.

3.8.4 La gestion des équipements informatiques obsolètes auprès de ménages

Les institutions, les services de l'éducation, les entreprises publiques et privées, généralement, vendent leurs ordinateurs par le biais de ventes aux enchères ou rarement par le fait des dons. Néanmoins, certaines entreprises privées (certaines micro-entreprises) jettent leurs ordinateurs cassés et irréparables. Les ordinateurs en leur fin de vie auprès des ménages connaissent des destins divers (figure 3.5). Plus de 60% des ordinateurs obsolètes sont vendus en seconde main, mais aussi des quantités importantes des écrans à tube cathodique (CRT) sont stockées.

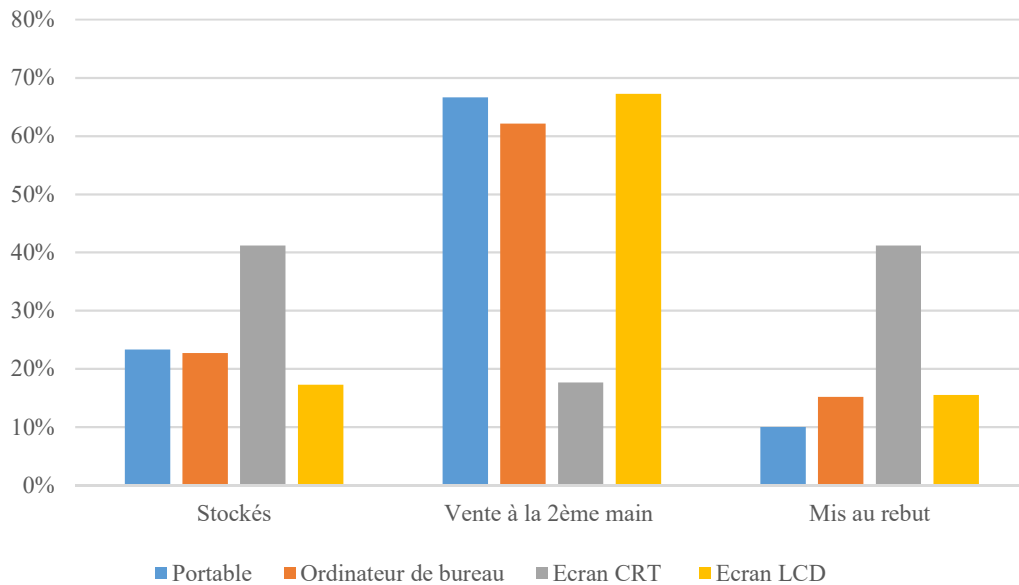


Figure 3.5. Le sort de l'ordinateur obsolète auprès des ménages

L'enquête a révélé aussi qu'environ 15% des ménages ont jeté leurs équipements informatiques avec les déchets ménagers. Les figures 3.6 et 3.7 présentent le sort des micro-ordinateurs en fin de vie en Algérie.



Figure 3.6. Des ordinateurs cassés irréparables stockés à l'université de Batna (CUB)



Figure 3.7. Un écran CRT et un clavier jeté avec les déchets ménages à Alger (Mai, 2014)

3.9 Estimation des déchets issus des micro-ordinateurs importés

Cette première étape consiste à utiliser deux méthodes d'estimation des DEEE (Distribution delay et la méthode Carnegie Mellon) pour évaluer la quantité des DEEE issus des micro-ordinateurs importés en Algérie. En l'absence des ventes et de la production locale, les importations sont considérées comme des entrées (inflows). La méthodologie de cette première étape est présentée comme suit :

3.9.1 La collecte des données

Les données sur les ordinateurs importés ont été obtenues auprès du Centre national de l'informatique et des statistiques (CNIS, 2014) pour la période 2000-2014, alors que les données sur les écrans à tube cathodique (CRT) et écrans plats (FDP) ont été extraites de la base de données COMTRADE.

Les données sur le comportement des consommateurs et le sort des ordinateurs obsolètes ont été obtenus par l'enquête menée dans la wilaya de Batna (Interviews face à face et des visites de terrain) aussi par téléphone et email pour le reste du pays. Au total, 452 questionnaires ont été remplis.

3.9.2 Modélisation de la durée de vie des ordinateurs

Dans cette partie, la durée de vie est variable et ses paramètres sont dérivés de l'enquête susmentionnée. Elle est limitée aux produits utilisés et ne comprend pas les produits qui sont stockés inutilisés. Le taux d'obsolescence est décrit par la distribution normale donnée par l'équation (7), où μ est la durée de vie moyenne et σ est l'écart type.

$$f(t) = \frac{1}{\sigma(2\pi)} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \text{eq. (7)}$$

3.9.3 Le modèle "Distribution Delay"

La quantité des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) est le résultat de la convolution entre les importations des années successives et les taux de l'obsolescence respectifs de l'année d'évaluation.

$$DEEE(t) = \sum_{t=t_0}^n Imp(t) \cdot L(d) \quad \text{eq. (8)}$$

$Imp(t)$: est la quantité des micro-ordinateurs importées au cours de l'année t ($t < n$). $L(d)$: est la valeur de la durée de vie distribuée modélisée par la distribution normal (Gauss).

3.9.4 La méthode “Carnegie Mellon”

L'enquête menée en Algérie, a révélé que la gestion des ordinateurs en leur fin de vie auprès des entreprises et différents institutions et organisations se fait par le biais des ventes aux enchères. Pratiquement, tous les ordinateurs ont un seul sort et toutes les entreprises et institutions doivent se conformer à la loi. Par contre, en l'absence d'une loi de gestion des DEEE auprès des ménages, ces derniers ont la possibilité de vendre leurs EEE en deuxième main ou bien les stocker ou bien les mettre au rebut.

La figure 3.8 illustre le schéma pour estimer la quantité des déchets d'ordinateurs en Algérie.

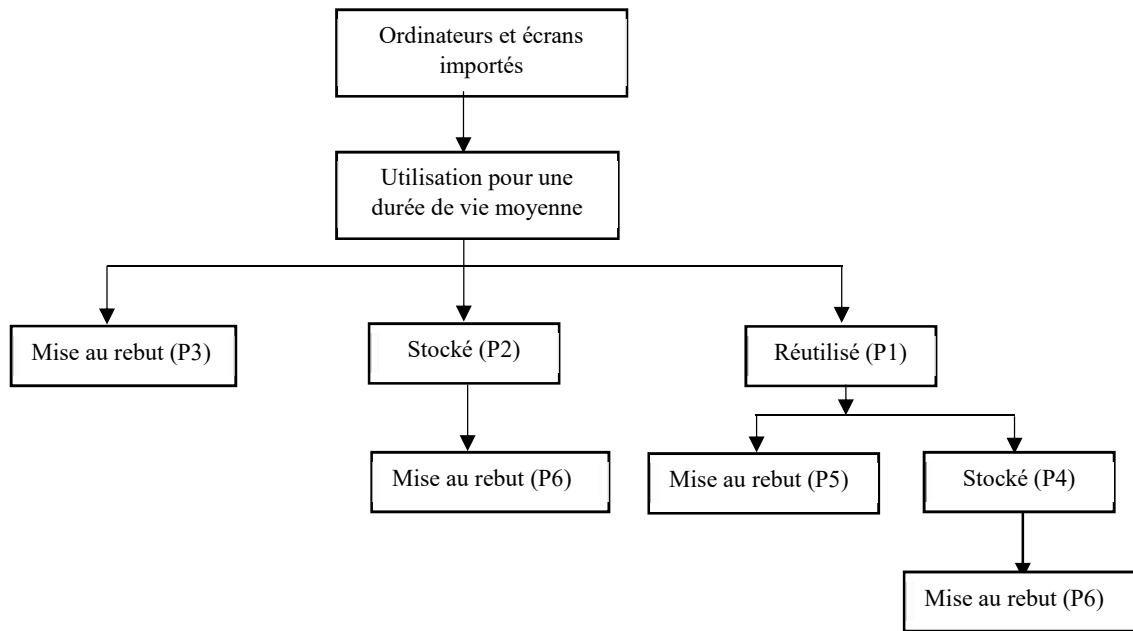


Figure 3.8. Présentation schématique pour estimer les déchets d'ordinateurs en Algérie.

Selon le sondage, le remplacement des ordinateurs est effectué en raison de l'obsolescence technologique plutôt que de l'obsolescence fonctionnelle. La réutilisation et le stockage ne sont que des phases intermédiaires. Après avoir réutilisé un ordinateur pendant au moins 2 ans, il peut être conservé pendant au moins 2 ans ou mis au rebut (tableau 3.3). Dans le cas des entreprises et des institutions, le matériel informatique était habituellement vendu par le biais de ventes aux enchères.

Tableau 3.3. Pourcentage de mettre au rebut les ordinateurs.

		Desktop	Laptop	Ecran CRT	Ecran LCD
Résultats de l'enquête	Durée de vie moyenne	5	3	7	5
	Obsolète réutilisés (P1)	66 %	68%	49%	67%
	Obsolète stocké (P2)	28%	28%	32%	26%
	Obsolète mis en rebut (P3)	6%	4%	19%	7%
Hypothèses	Réutilisé stocké (P4)	80%	80%	80%	80%
	Réutilisé mis au rebut(P5)	20%	20%	20%	20%
	Stocké mis au rebut (P6)	10%	10%	10%	10%

En partant des hypothèses ci-dessus, les équations (9) à (11) sont utilisées pour calculer la quantité d'ordinateurs réutilisés, stockés et mis au rebut.

$$R_{ut} = P1 \times (O_{t-L} \text{ Imp}) \quad \text{eq. (9)}$$

R_{ut} est la quantité totale des ordinateurs et écrans réutilisés dans l'année t. P1 indique le pourcentage d'ordinateurs et écrans réutilisés dans l'année t. $O_{t-L} \text{ Imp}$ est le nombre des ordinateurs et écrans obsolètes dans l'année t, qui ont été importés durant l'année t-L. L est la durée de vie moyenne de ces équipements.

$$S_t = [P2 \times (O_{t-L} \text{ Imp})] + [P1 \times P4 \times (O_{t-L-Lr} \text{ Imp})] \quad \text{eq. (10)}$$

S_t est la quantité totale des équipements stockés des premiers et derniers utilisateurs. P2 représente le pourcentage des équipements stockés inutilisés par le premier utilisateur. P4 représente le pourcentage des équipements stockés par le deuxième utilisateur. Lr est la durée de vie moyenne des équipements réutilisés.

$$D_{at} = [P3 \times (O_{t-L} \text{ Imp})] + [P2 \times P6 \times (O_{t-L-Lr} \text{ Imp})] + [P1 \times P5 \times (O_{t-L-Ls} \text{ Imp})] + [P1 \times P4 \times P6 \times (O_{t-L-Lr-Ls} \text{ Imp})] \quad \text{eq. (11)}$$

D_{at} est égale à la quantité totale des ordinateurs mis au rebut par les premiers et seconds utilisateurs. P6 désigne le pourcentage d'équipements mis au rebut.

3.9.5 Résultats

Les données collectées auprès du centre national des statistiques et de l'informatique (CNIS) et de la base de données COMTRADE (figure 3.9) ont montré une importante augmentation de

l'importation des équipements informatiques et leurs accessoires dans la période entre 2011 et 2013.

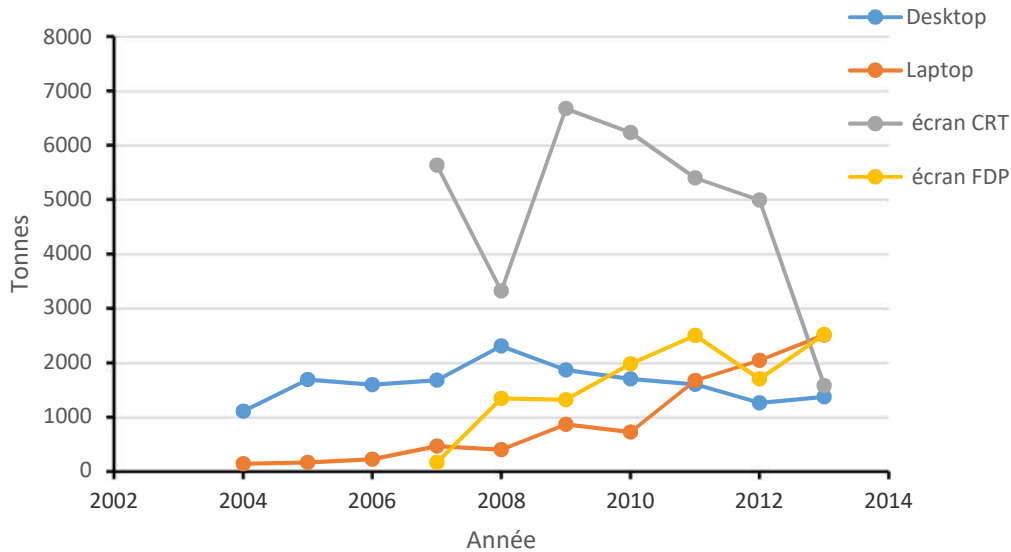


Figure 3.9. Importation des équipements informatiques en Algérie durant la période 2000-2013 (CNIS, COMTRADE)

A partir de 2008 nous observons une vraie baisse de l'importation des ordinateurs de bureau (Desktop) pour une augmentation relativement importante de l'importation des ordinateurs portables (laptops), celle-ci a atteint les 2386 tonnes (équivalent de 800.000 unités) en 2013. Pour les quantités des écrans importées, seulement des données à partir de l'année 2007 étaient disponibles. L'importation des écrans de type CRT a connu une très forte baisse, elle est passée d'environ 7000 tonnes (équivalent de 340.000 unités) en 2009 à 1500 tonnes (équivalent de 120.000 unités) en 2013.

Dans ce travail de recherche, la durée de vie des équipements est définie comme la période de temps pendant laquelle le produit est utilisé (y compris une réutilisation potentielle), mais le temps de stockage est exclu.

Les paramètres de la distribution normal (figure 3.10) étaient retirés de l'enquête où la durée de vie moyenne (μ) est 5,37 et 3,01 pour les ordinateurs de bureau (Desktop) et ordinateurs portables (Laptop) respectivement et l'écart type (σ) est 2,64 et 1,12 pour les ordinateurs de bureau et ordinateurs portables respectivement.

Par contre, la durée de vie moyenne (μ) est 7,42 et 4,97 pour les écrans CRT et FDP respectivement, et l'écart type (σ) est 2,64 et 2,26 respectivement.

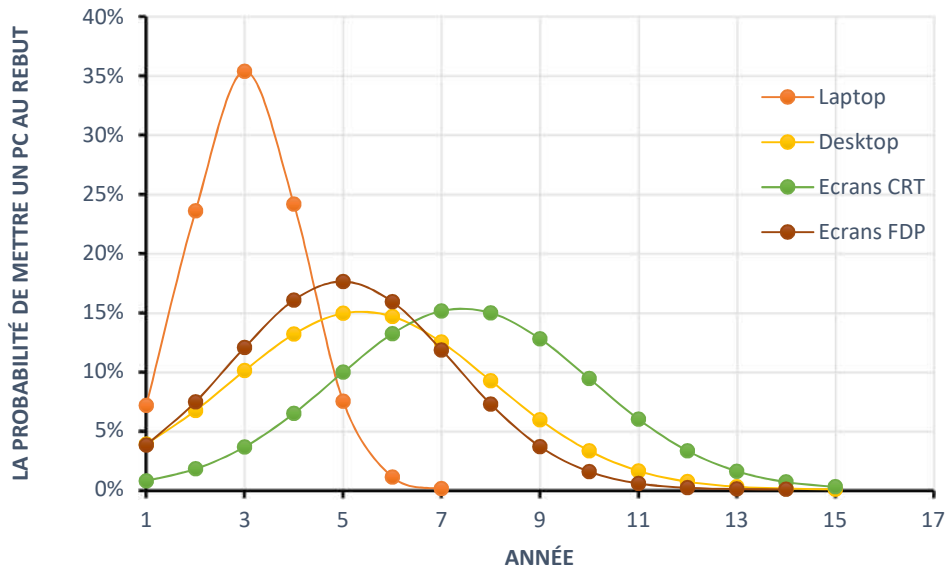


Figure 3.10. La distribution de la durée de vie des ordinateurs et écrans en utilisant la distribution normale.

Dans cette étude, seuls les ordinateurs importés en Algérie sont considérés. La quantité de déchets d'ordinateurs devrait être plus élevée si la production nationale avait été examinée. Les résultats de cette partie sont illustrés dans les figures (3.11) à (3.15)

Les résultats du modèle « Distribution Delay » montrent que la quantité des déchets des équipements informatiques la plus élevée a été enregistrée entre 2014 et 2016. La quantité la plus élevée était enregistrée en 2015 avec 686.947 unités de laptops.

En 2016 environ 310.088 unités d'écrans du type FDP étaient générées et 219.280 unités d'écran de type CRT sont prévus en 2017.

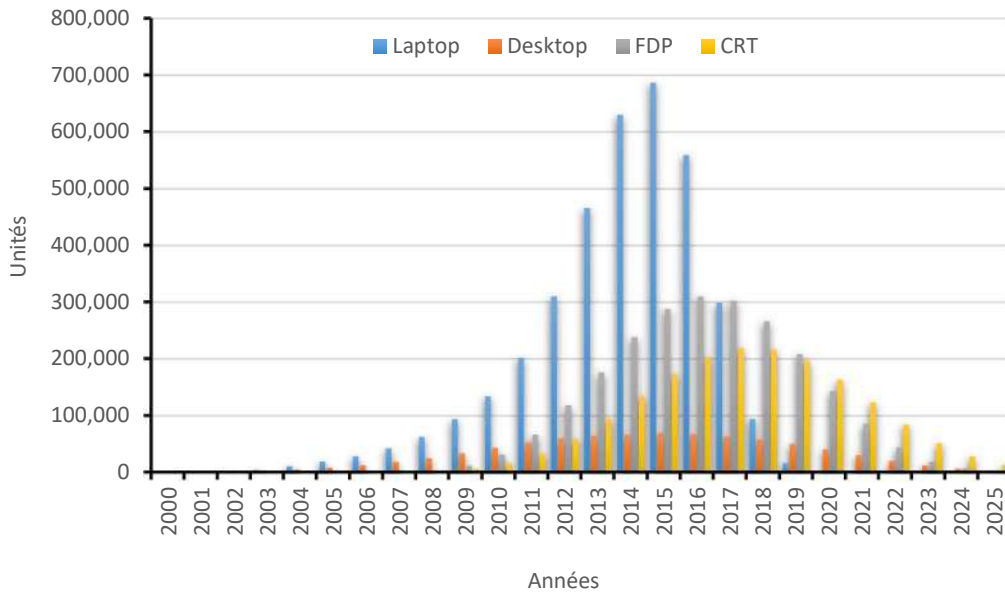


Figure 3.11. Quantité des déchets des équipements informatiques générés en Algérie en utilisant le modèle « Distribution Delay »

Dans cette étude, la durée de vie exclut le temps de stockage des équipements non utilisés, celle-ci est limitée à la période d'utilisation de l'équipement par un ménage ou une entreprise.

Cette période a été extraite directement de l'enquête mentionnée ci-dessus, cependant le taux de réponse n'était pas vraiment représentatif, ceci est corrigé par une analyse de sensibilité. Cette étude a testé, en particulier, l'influence de la durée de vie moyenne en l'augmentant et en la diminuant d'une année. Les résultats ont révélé que ce changement pourrait causer environ $\pm 15\%$ de variation de la quantité annuelle des ordinateurs obsolètes, par rapport au résultat précédent.

En ce qui concerne l'utilisation de la deuxième méthode 'Carnegie Mellon', la quantité des équipements informatiques obsolètes est représentée par les figures de 3.12 à 3.15.

Cette étude a révélé que jusqu'à 2016 environ 1539 tonnes d'ordinateurs portables sont réutilisées et 1351 tonnes sont stockées et environ 400 tonnes sont mises au rebut.

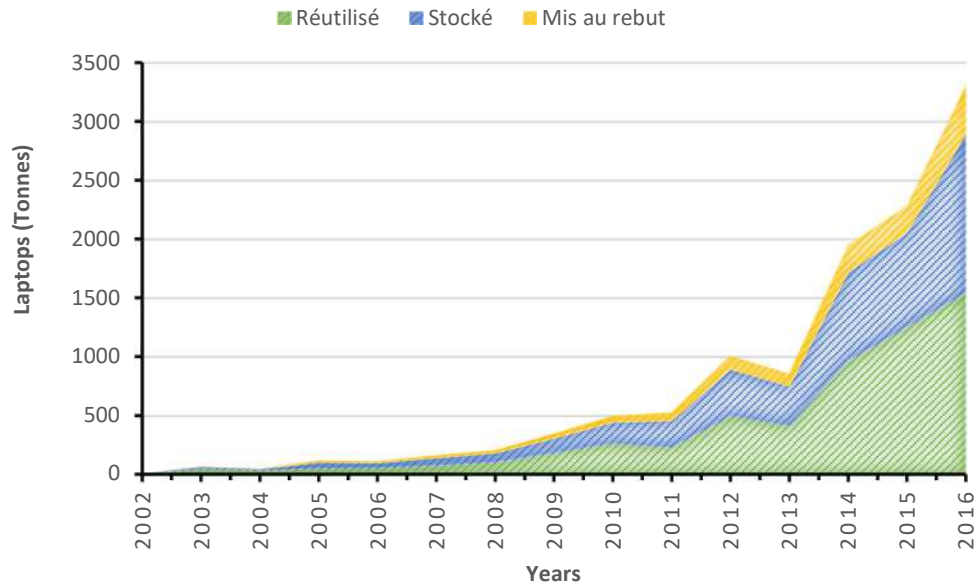


Figure 3.12. Quantité des laptops réutilisés, stockés et mis au rebut

Jusqu'à 2016, environ 643 tonnes des ordinateurs de bureau sont réutilisées et 891 tonnes sont stockées et environ 305 tonnes sont mises au rebut.

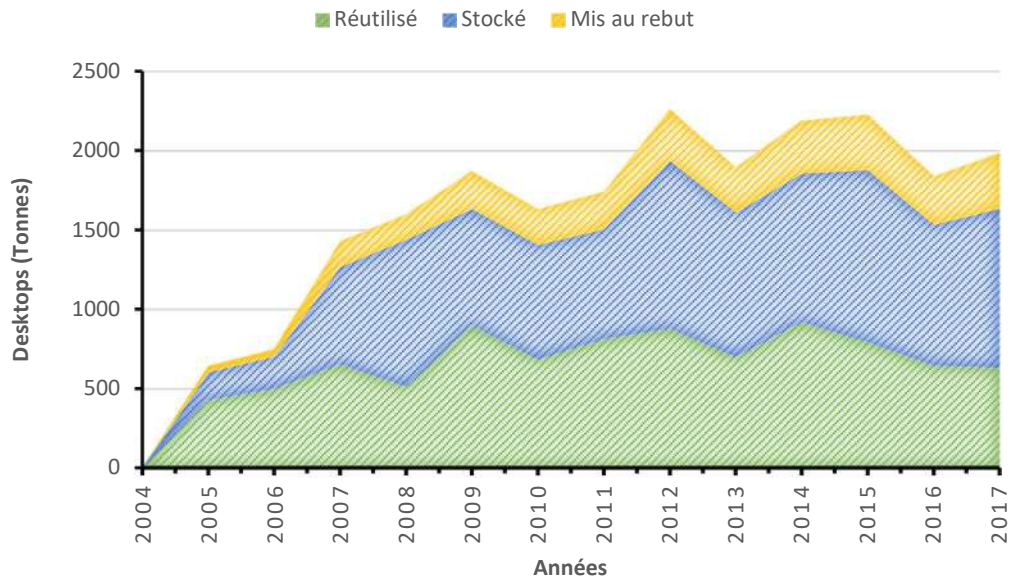


Figure 3.13. Quantité des ordinateurs de bureau réutilisés, stockés et mis au rebut

Pour les moniteurs CRT, environ 2378 tonnes des écrans CRT sont réutilisées et 3158 tonnes sont stockées et environ 1455 tonnes sont mises au rebut.

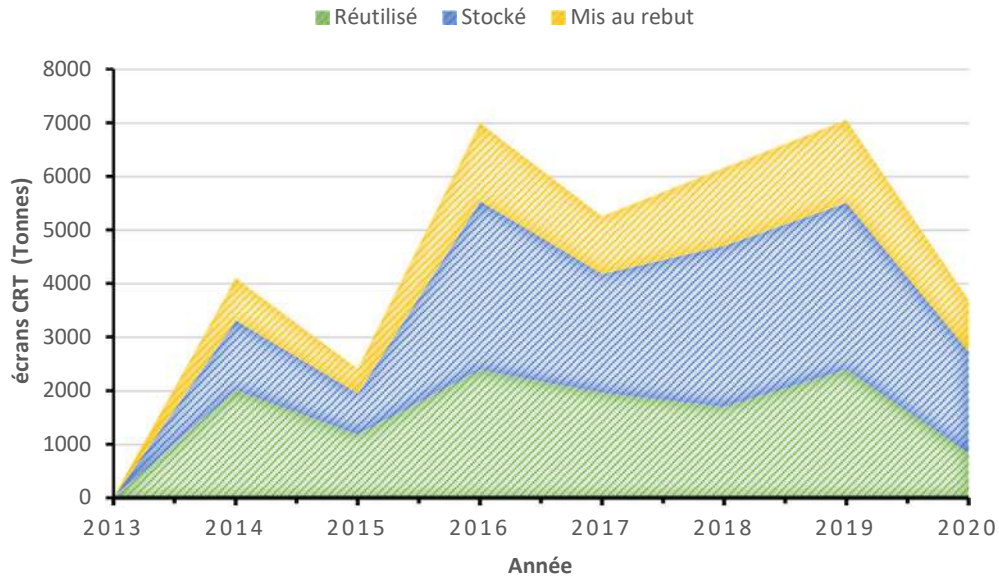


Figure 3.14. Quantité des écrans CRT réutilisés, stockés et mis au rebut

Jusqu'à l'an 2018, la quantité de moniteurs FDP réutilisés devrait atteindre 1289 tonnes, environ 1049 tonnes seront stockées et environ 290 tonnes seront mises au rebut.

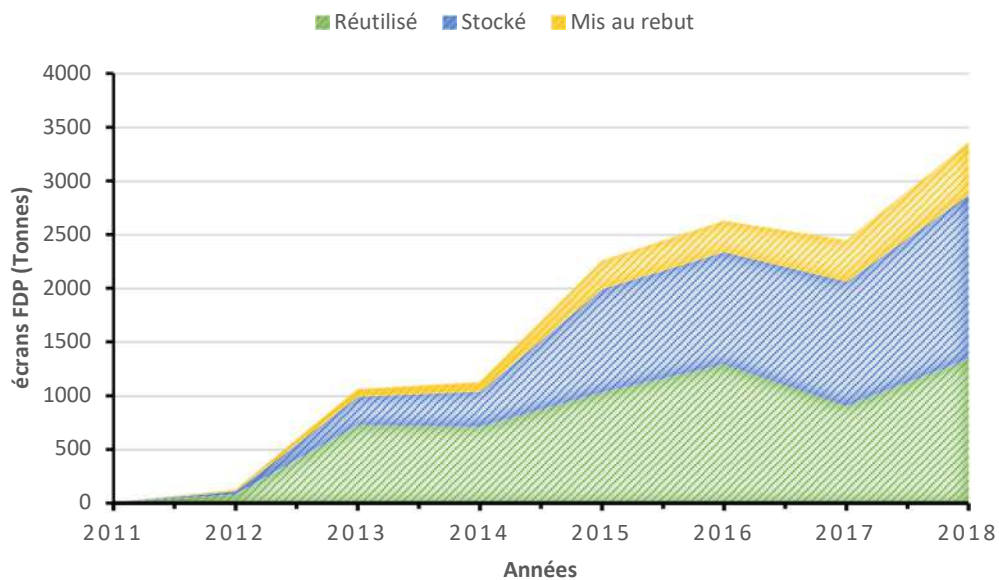


Figure 3.15. Quantité des écrans FDP réutilisés, stockés et mis au rebut

3.10 Estimation des stocks et des déchets des micro-ordinateurs générés en Algérie en utilisant les modèles de diffusion

Les ordinateurs de bureaux, les ordinateurs portables et les tablettes sont considérés comme des produits ayant le potentiel de générer des quantités importantes d'unités obsolètes chaque année.

Ils sont considérés comme des DEEE précieux depuis qu'ils intègrent des métaux précieux et critiques dans certains de leurs composants (UNEP, 2013). A présent, il n'y a pas de statistiques officielles pour le flux de déchets informatiques en Algérie. Par conséquent, cette partie porte sur l'évaluation et le suivi des déchets informatiques en Algérie. A cet effet, une méthodologie est proposée, c'est une approche en deux étapes. La première étape est la collecte et la compilation des données existantes provenant de différentes sources locales, nationales et internationales. Dans la deuxième étape différentes méthodes de prévision sont appliquées. Le choix de ces méthodes pour le cas de l'Algérie soit tombé sur les modèles fournissant l'indice d'erreur minimum. La figure 3.16 présente les différentes étapes de la méthodologie proposée pour estimer les stocks des micro-ordinateurs utilisées en Algérie et par conséquent les déchets générés.

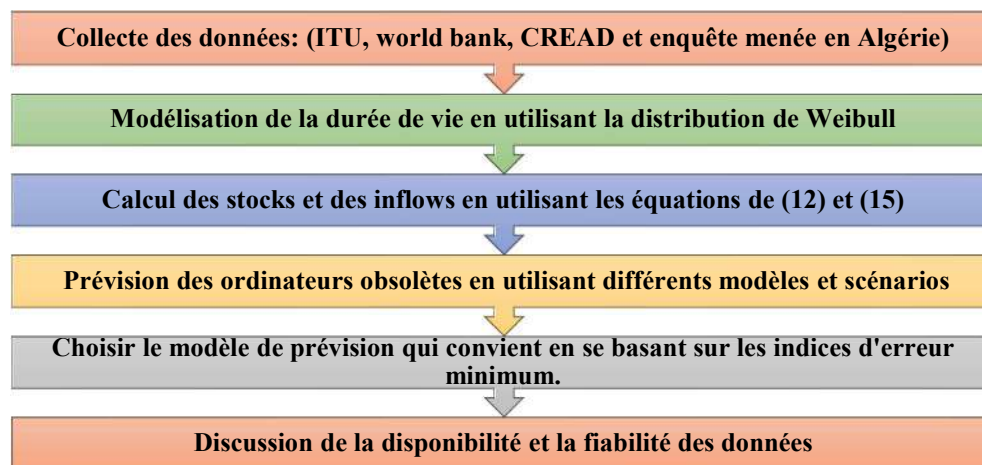


Figure 3.16. Méthodologie proposée pour estimer les stocks et les déchets des micro-ordinateurs utilisés en Algérie.

Avant de présenter, les différentes étapes, il est nécessaire de définir les différents paramètres et variables utilisés dans cette section.

Stock : Un stock est l'intégrale des entrées et sorties au fil du temps. Les stocks se développent lorsque les entrées dépassent les sorties d'un système, et vice-versa (Sinha, 2013). Différents auteurs ont conceptualisé plusieurs définitions pour ce terme. Cependant, ces définitions peuvent engendrer des conséquences importantes sur l'ampleur du stock.

Spatari et al. (2005) considèrent que les stocks se limitent seulement aux produits en cours d'utilisation et excluent les produits non-utilisés 'hibernés'. Par contre, Oguchi et al. (2008)

considèrent que les stocks comportent tous les produits dans les ménages, qu'ils soient utilisés ou stockés non- utilisés. Leur justification est que les produits non-utilisés ne sont pas considérés comme des déchets et peuvent être réutilisé encore une fois. L'avantage de l'approche utilisée par Oguchi et al. (2008) est qu'ils arrivent à distinguer entre les flux des déchets, soit des déchets mis au rebut ou bien des déchets stockés non utilisés. En revanche, Spatari et al. (2005) calculent la quantité DEEE mise au rebut sans distinction.

Les stocks des micro-ordinateurs dans une société sont donnés par la somme des stocks des ménages $StH(t)$ et ceux auprès de toutes les entreprises et sociétés étatiques et privées $StB(t)$ (eq. 12).

$$St(t) = StH(t) + StB(t) \quad (\text{eq. 12})$$

Les stocks des ordinateurs auprès des ménages sont donnés par le nombre de tous les ménages $HH(t)$ multiplié par le nombre moyen d'ordinateurs possédé par chaque ménage $PcM(t)$.

$$StH(t) = HH(t) \times PcM(t) \quad (\text{eq. 13})$$

Les stocks des ordinateurs auprès des entreprises et instituts sont le résultat de la multiplication du nombre de toutes les entreprises et instituts ($Etp(t)$) par le nombre moyen d'ordinateurs possédés par chaque entreprise $PcEtp(t)$.

$$StB(t) = Etp.(t) \times PcEtp(t) \quad (\text{eq. 14})$$

Inflows : sont les produits consommés par les ménages et/ou les différentes entreprises. Différentes études ont utilisé les données de vente pour obtenir des valeurs des inflows. Cependant, en l'absence des ventes et de la production locale, ils peuvent être construits en utilisant des données sur le changement en stock et les outputs. A partir de l'équation (15). Sachant qu'à l'instant t_0 les outputs sont égaux à zéro.

$$In(t) = \Delta S_{t-1} + Out(t) \quad (\text{eq. 15})$$

Où $In(t)$ est les inflows de l'année t , ΔS_{t-1} représente le changement de stock, et $Out(t)$ dénote les outputs (déchets d'ordinateurs)

Outputs : ou bien les déchets générés, sont donnés par une fonction des inputs (i.e. : ventes) est l'intervalle de temps durant lequel l'équipement est utilisé. Les outputs (déchets) à l'instant t sont

ensuite exprimés en une convolution des inputs $In(t)$ et la probabilité de mettre l'ordinateur au rebut $di(t)$ (eq. 16)

$$Out(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} di \times In_{t-1} \quad (\text{eq. 16})$$

3.10.1 Collecte des données

Les données sur le taux de pénétration des micro-ordinateurs ont été extraites de différentes sources locales, nationales et internationales (CREAD, IUT et la banque mondiale).

La Banque mondiale et l'Union internationale des télécommunications (UIT) publient régulièrement des données sur l'utilisation des TIC et l'accès par habitant. Dans le cas de l'Algérie, les données sont publiées sur PC par 100 habitants. Le nombre de PC comprend les ordinateurs de bureau et les ordinateurs portables utilisés par la société algérienne.

Si l'on considère les données existantes sur l'ordinateur moyen par habitant, on peut conclure que le marché des micro-ordinateurs en Algérie est encore dans sa phase initiale.

Néanmoins, il est possible de tracer différents scénarios d'analyse afin de tracer la ligne minimale et maximale de l'ordinateur moyen par habitant pour l'Algérie. Compte tenu des différents indicateurs économiques et sociaux, il est difficile pour l'Algérie d'atteindre le même niveau d'ordinateur par habitant que les pays industrialisés.

Dans le premier scénario, le taux de pénétration des micro-ordinateurs suit un faible taux de croissance (scénario 1). Dans le second, le taux de pénétration suit un taux de croissance élevé (scénario 2).

3.10.2 Modélisation de la durée de vie en utilisant la distribution de Weibull

Contrairement à la section 3.9.2, cette partie utilise la distribution de Weibull pour modéliser la durée de vie des ordinateurs. Cependant, la définition de la durée de vie est toujours la même, elle est limitée à la période d'utilisation des produits et ne comprend pas la période de stockage.

La fonction Weibull est caractérisée par un paramètre d'emplacement α et paramètre d'échelle β , donné par l'eq. (17). Les paramètres de Weibull ont été obtenus directement à partir de l'enquête susmentionnée.

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad \text{eq. (17)}$$

3.10.3 Modèles de prévision

Les modèles de prévision fournissent des cadres pour comprendre la voie par laquelle une technologie répartie entre les adoptants et permettre par conséquent d'estimer la quantité des déchets générés.

Les modèles de prévision les plus utilisés pour la diffusion des technologies sont : le modèle logistique, le modèle Gompertz et le modèle Bass. Ces modèles sont souvent décrits par une courbe de forme S.

3.10.3.1 *Le modèle de la croissance logistique*

La courbe de la croissance logistique (logistic growth) a été introduite par Verhulst en 1838. Plus tard, en 1920, elle a été réintroduite par Pearl et Reed au cours de leur étude sur l'évolution de la population de mouches.

Dans des études récentes, la croissance logistique a été utilisée pour prévoir la diffusion de l'innovation telle que les téléphones mobiles, les ordinateurs, les téléviseurs et les réfrigérateurs (Frank 2004, Boretos, 2007, Yang et al. 2008, Yang et al. 2009).

Pour reproduire et prévoir une série chronologique des taux de pénétration des ordinateurs en Algérie, nous avons supposé que le taux de pénétration est décrit par une courbe logistique. D'après des études antérieures (Yang et al. 2008, Yang et al. 2009), le taux de pénétration peut être décrit par la formule suivante :

$$P_r(t) = \frac{N}{1+e^{-rt+c}} \quad \text{eq. (18)}$$

Où $P_r(t)$ représente le taux de pénétration au cours de l'année t , r représente le taux de croissance et N désigne le nombre moyen d'ordinateurs qu'une personne est susceptible de posséder. La valeur ' c ' peut être calculée en utilisant l'expression suivante :

$$c = \ln\left(\frac{P_{r0}}{K+P_{r0}}\right) \quad \text{eq. (19)}$$

P_{r0} est le taux de pénétration initiale. K présente la capacité de charge, ce qui est le nombre moyen maximum de PC par personne.

3.10.3.2 Le modèle de Gompertz

Le modèle Gompertz a été utilisé dans la prévision des ventes de télécommunications (Christodoulos et al. 2010). Le modèle est donné par la formule suivante :

$$Pr(t) = N \cdot e^{-a \cdot e^{-b}} \quad \text{eq. (20)}$$

Où N représente le niveau de saturation, a et b sont des paramètres définissant le point d'inflexion et la vitesse du processus d'adoption, respectivement.

3.10.3.3 Le modèle de Bass

Le modèle Bass (Bass, 1969) est décrit par l'équation suivante :

$$Pr(t) = \frac{N(p+q)^2}{p} * \frac{e^{-(p+q)t}}{[\left(\frac{q}{p}\right)e^{-(p+q)t} + 1]^2} \quad \text{eq. (21)}$$

Où N est le niveau de saturation, et p représente la probabilité d'un premier achat et q représente le coefficient d'imitation (Michalakelis et al. 2008).

L'une des principales considérations des modèles de diffusion est la sélection du modèle qui décrit le mieux le processus de diffusion des équipements électroniques dans une société ainsi que l'estimation des paramètres correspondants afin de fournir le meilleur ajustement possible à l'ensemble de données considéré. Si cette analyse fournit des résultats fiables correspondant à l'historique du processus, la prévision de la diffusion ultérieure sera probablement aussi fiable.

3.10.4 Résultats

Dans cette étude, la durée de vie se limite au temps pendant lequel l'équipement était en service, (y compris une réutilisation potentielle), mais le temps de stockage est exclu.

Les paramètres de la distribution de Weibull étaient retirés de l'enquête, où le paramètre de l'emplacement (α) est 5,37 et 3,01 pour les ordinateurs de bureau (Desktop) et ordinateurs portables (Laptop) respectivement et le paramètre d'échelle (β) est 2,07 et 2,5 pour les ordinateurs de bureau et ordinateurs portables respectivement. La distribution de la durée de vie est présentée par la figure 3.17.

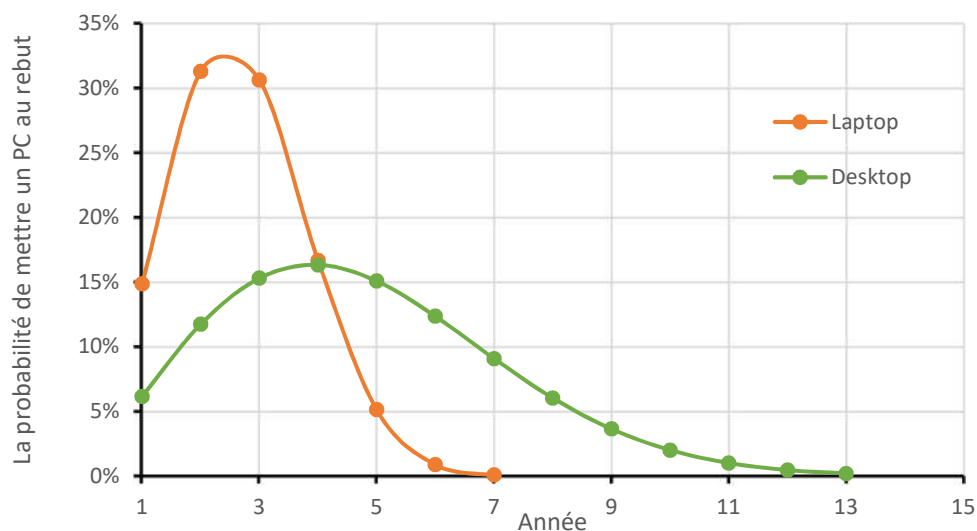


Figure 3.17. La distribution de la durée de vie des micro-ordinateurs (Distribution de Weibull)

3.10.5 Calcul des stocks et des inflows des ordinateurs en Algérie

Les données publiées par la banque mondiale montrent une croissance lente de la pénétration des ordinateurs en Algérie. Cependant, la période de 2010 à 2014 a connu une augmentation des importations d'ordinateurs et les ventes en raison de différents projets mis en place dans le pays. Selon IDC plus de 300.000 ordinateurs ont été vendus sur le marché algérien pour l'année 2012 (IPEMED, 2014) puis il est passé à 460.000 ordinateurs en 2014 (300.000 ordinateurs portables et 160.000 ordinateurs de bureau) (usine nouvelle, 2015).

Les taux de pénétration des ordinateurs prévus en utilisant différents modèles sont représentés par les figures 3.18 (a) et 3.18 (b) pour les deux scénarios. Le changement de la population algérienne est inclus dans le modèle. Pour ce qui est de la croissance de la population algérienne, nous supposons qu'elle suit une augmentation linéaire, passant de 40,4 millions d'habitants en janvier 2016 (ONS, 2016) à 48,3 habitants en 2030 en appliquant l'augmentation linéaire.

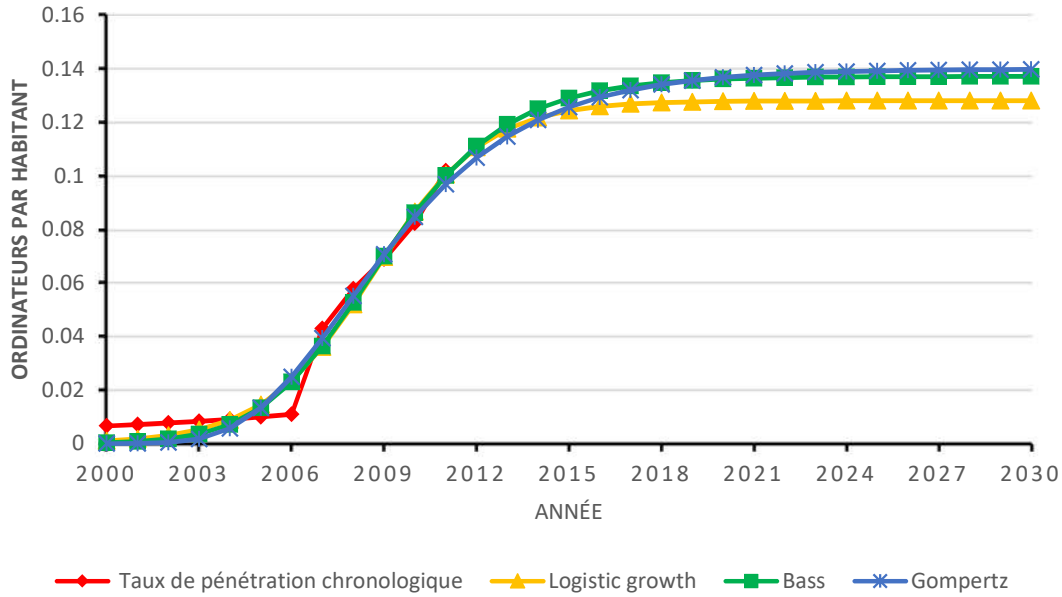


Figure 3.18 (a). Estimation des ordinateurs par habitants par année en Algérie en utilisant différents modèles (scenario 1)

L'évolution du taux de pénétration des ordinateurs en Algérie présente une tendance ascendante qui suit l'évolution de la forme S , passant de 0,0066 PC per habitant en 2000, en atteignant, d'ici 2030, une valeur maximale d'environ 0,128 PC par habitant en utilisant le modèle logistique et 0,137 PC par habitant pour le modèle de Bass et 0,14 selon le modèle Gompertz (Scenario 1).

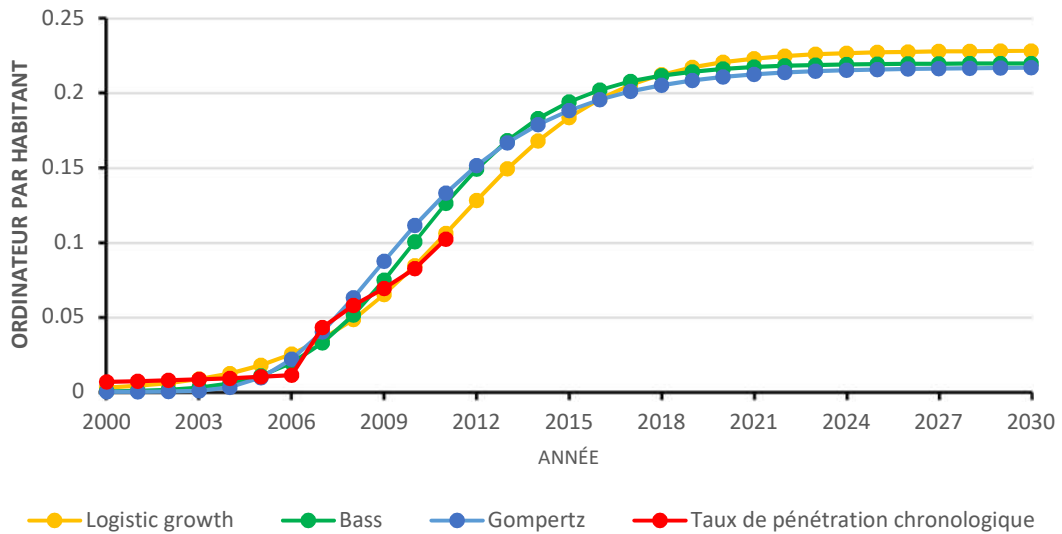


Figure 3.18 (b). Estimation des ordinateurs par habitant par année en Algérie en utilisant différents modèles (scénario 2)

Pour le scénario 2, la valeur maximale de l'ordinateur par habitant atteindra environ 0,22 PC par habitant d'ici 2030, en utilisant le modèle logistique (logistic growth) et 0,21 PC par habitant pour les deux modèles Bass et Gompertz.

Pour estimer le stock des ordinateurs en cours d'utilisation en Algérie, le résultat des ordinateurs par habitant sont multipliés par le nombre total de la population. Les résultats sont illustrés par les figures 3.19 (a) et 3.19 (b).

Pour le scénario 1 (faible taux de croissance), d'ici 2030, une valeur maximale d'environ 6,2 millions d'ordinateurs en cours d'utilisation est estimée en utilisant le modèle logistique, 6,64 millions et 6,76 millions d'ordinateurs en utilisant les modèles Bass et Gompertz, respectivement.

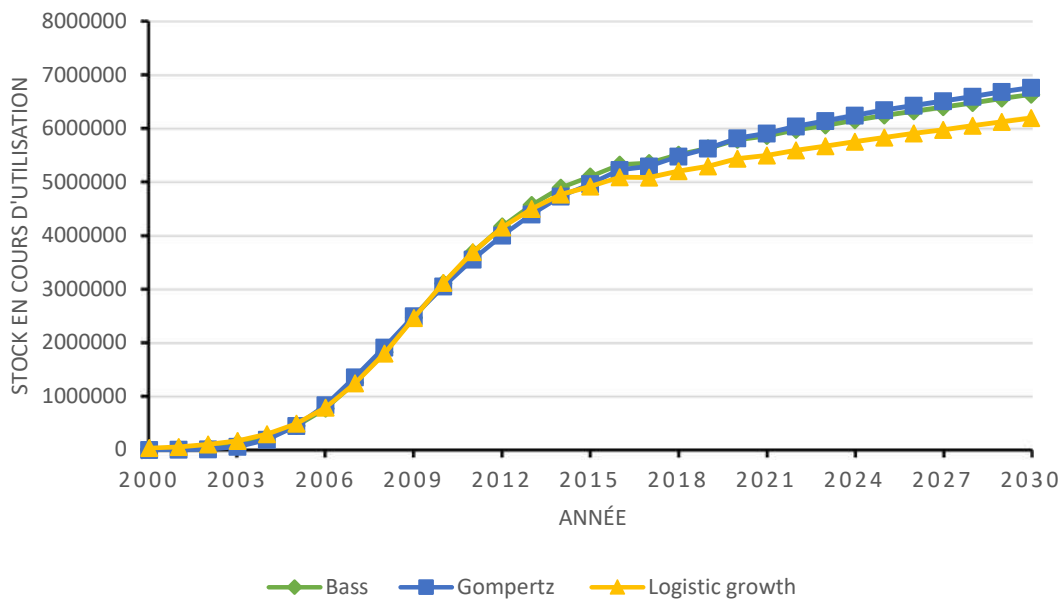


Figure 3.19 (a). Estimation des stocks des ordinateurs en cours d'utilisation en Algérie en utilisant différents modèles (scénario 1).

Scenario 1 a révélé que la quantité des stocks des micro-ordinateurs en cours d'utilisation, pour l'année 2010 était d'environ 3.118.508 PC, ce résultat est proche de celui publié par le rapport de recherche Madar, où la quantité des micro-ordinateurs est estimée à 3.000.000 de PC pour la même année.

Pour le deuxième scénario, d'ici 2030, une valeur maximale d'environ 11 millions d'ordinateurs en cours d'utilisation est estimée en utilisant le modèle logistique, 10,6 millions et 10,4 millions d'ordinateurs en utilisant Bass et Gompertz modèle, respectivement.

Le tableau 1.2 dans l'Annexe 1 présente les résultats détaillés des micro-ordinateurs en cours d'utilisation pour le premier scénario dans toutes les wilayas de l'Algérie.

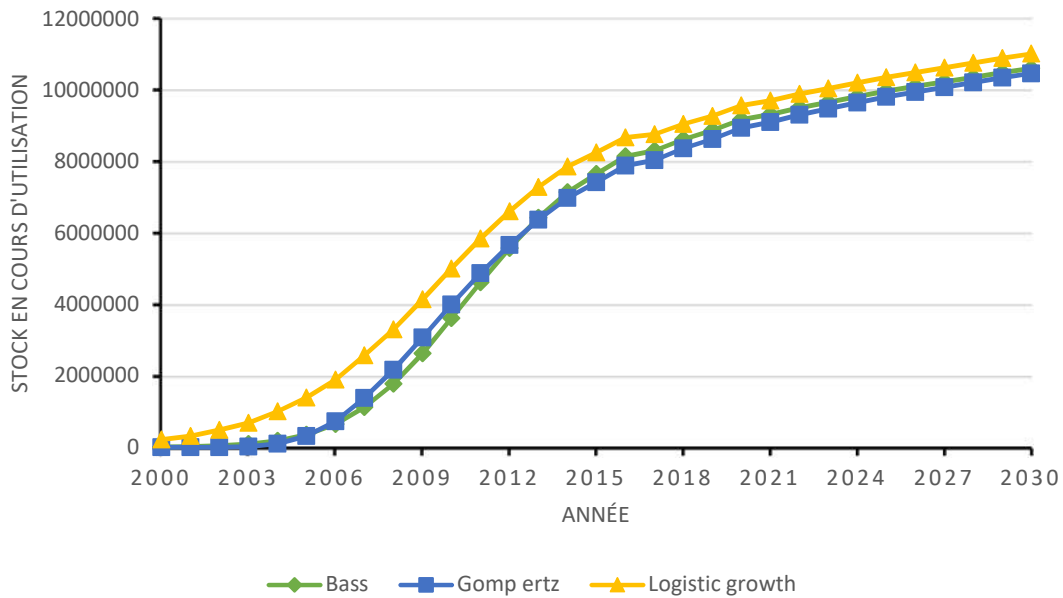


Figure 3.19 (b). Estimation des stocks des ordinateurs en cours d'utilisation en Algérie en utilisant différents modèles (scénario 2).

3.10.6 Prédiction des ordinateurs obsolètes en utilisant différents modèles

La quantité potentielle des ordinateurs obsolètes a été calculée en utilisant l'équation (5). Les figures 3.20 (a) et 3.20 (b) illustrent les résultats obtenus.

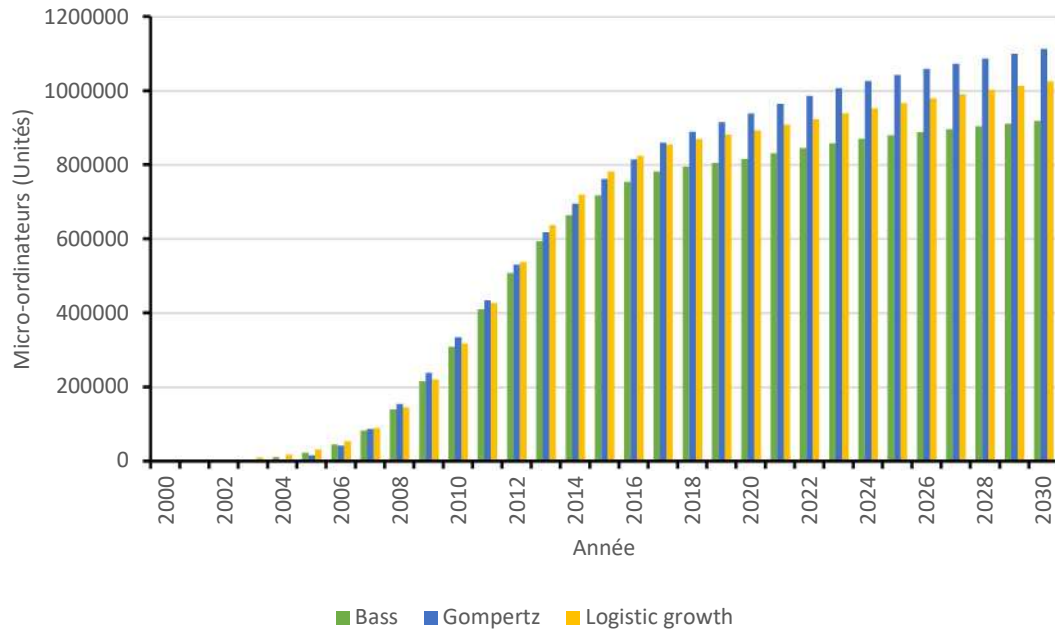


Figure 3.20 (a). Ordinateurs obsolètes prévus en Algérie en utilisant différents modèles de prévision (scenario 1)

La quantité d'ordinateurs obsolètes devrait être plus de 900.000 unités d'ici 2030, en utilisant le modèle de basse, alors qu'elle devrait dépasser les 1.000.000 unités en utilisant le modèle Gompertz et le modèle logistique.

Pour le scenario 2, d'ici 2030, les ordinateurs obsolètes devrait être plus de 1,7 million d'unités, en utilisant le modèle de Basse et le modèle logistique, alors qu'elle devrait dépasser les 1,8 million d'unités en utilisant le modèle Gompertz.

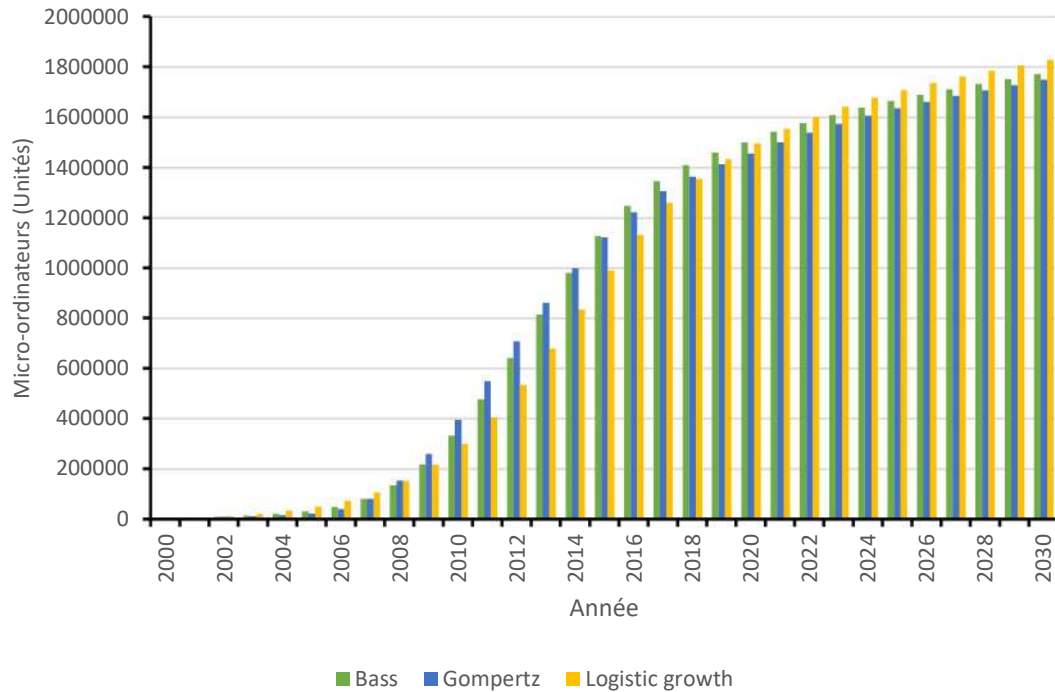


Figure 3.20 (b). Ordinateurs obsolètes prévus en Algérie en utilisant différents modèles de prévision (scenario 2)

L'enquête qu'on a menée a révélé que la substitution des ordinateurs est faite en raison de l'obsolescence technologique plutôt que de l'obsolescence fonctionnelle. Cela explique pourquoi la durée de vie des ordinateurs en Algérie est relativement courte par rapport à d'autres pays en développement. En Algérie, les gens ont tendance à changer leurs ordinateurs en particulier les ordinateurs portables en raison du développement technologique.

3.10.7 Le choix du modèle de prévision le plus adéquat au cas algérien

Le choix des méthodes de prévision les plus avantageux tombe sur les modèles, fournissant un indice d'erreur minimum. Pour cela, nous utilisons quatre indicateurs propres aux mesures d'écarts sur les variables quantitatives (Tableau 3.4).

Tableau 3.4. Les indicateurs d'écarts

Indicateurs d'écarts	Equation	Explication
La somme des carrés des résidus (SSR)	$SSR = (F - A)^2$	Permet de comparer des données expérimentales, à un modèle mathématique censé décrire ces données ⁽¹⁾ .
Le carré moyen des erreurs (MSE)	$MSE = \sum_{t=1}^n \frac{(At - Ft)^2}{n}$	C'est la moyenne arithmétique des carrés des écarts entre les prévisions et les observations ⁽¹⁾ .
L'erreur absolue moyenne (MAE)	$MAE = \sum_{t=1}^n \frac{ (At - Ft) }{n}$	Moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts ⁽¹⁾ .

⁽¹⁾ Définitions extraites de : <http://www.jybaudot.fr/Stats/indicecarts.html>

F : désigne les données de prévision et A représente les données réelles.

En général, il n'y a aucun indicateur d'écart préféré pour l'estimation de la précision et de prévision (Christodoulos et al. 2010).

Les résultats des indicateurs d'écarts sont présentés dans le tableau 3.5.

Tableau 3.5. Résultats des indicateurs d'écarts pour les différents modèles de prévision.

Formule	Modèles de prévision					
	Premier scénario (faible taux de croissance)			Deuxième scénario (taux de croissance élevé)		
	Logistic growth	Gompertz	Bass	Logistic growth	Gompertz	Bass
$SSR = (F - A)^2$	0,00037	0,00046	0,00038	0,01507	0,002	0,0013
$MSE = \sum_{t=1}^n \frac{(At - Ft)^2}{n}$	$3,0896 \times 10^{-5}$	$3,83602 \times 10^{-5}$	$3,20874 \times 10^{-5}$	0,0012	0,0002	0,0001
$MAE = \sum_{t=1}^n \frac{ (At - Ft) }{n}$	0,0046	0,0052	0,0049	0,029	0,011	0,0085

Dans l'ensemble, la valeur minimale d'erreurs observée était $3,0896 \times 10^{-5}$ en utilisant le modèle logistic growth et la plus grande valeur d'erreur a été signalée par le modèle Gompertz 0,52.

Nous observons que les indicateurs d'écarts calculés pour le modèle de Gompertz sont relativement élevés, par rapport aux autres modèles, ceci est justifié par le fait que le modèle de Gompertz est plus sensible aux paramètres d'entrée. À la vue de ces données, le modèle logistique est considéré comme le plus approprié pour le cas du premier scénario.

En ce qui concerne le deuxième scénario, le modèle *logistic growth* fournit des résultats avec un indice d'erreur le plus élevé par rapport à Bass, qui fournit des résultats précis basés sur l'erreur minimale.

Nous avons comparé les résultats de cette étude avec d'autres études similaires réalisées sur la gestion des DEEE dans la région du Moyen-Orient et Afrique du Nord (MENA), toutefois, chaque étude utilise différentes approches selon les données valables pour le pays étudié. Ce qui a rendu la comparaison entre eux un peu difficile (Tableau 3.6)

Les résultats de Laissaoui et al. 2008 ont révélé que la quantité des ordinateurs générée au Maroc par habitant est relativement élevée par rapport à l'Algérie. En 2007 par exemple 0,44 PC/habitant a été généré au Maroc, pour la même période seulement 0,0026 PC/habitant a été estimée pour l'Algérie.

Les résultats du cas d'étude de l'Algérie sont similaires à ceux obtenus pour l'Égypte, où seulement 0,012 PC/habitant a été généré en 2013. Les résultats surestimés présentés par Laissaoui et al. 2008 peuvent être justifiés par deux raisons :

- La méthode d'estimation choisie (la méthode de Leaching) : Cette méthode est généralement utilisée pour estimer les DEEE dans des marchés saturés, c'est-à-dire des EEE ayant une longue durée de vie moyenne (ex : les réfrigérateurs 25 années). Cette méthode n'est pas adéquate pour les marchés non-saturés (ex : téléphones portables et ordinateurs), ces équipements sont caractérisés par un fort changement technologique.
- La durée de vie moyenne des ordinateurs : Laissaoui et al. 2008 ont choisi une durée de vie moyenne au lieu d'utiliser une durée de vie distribuée. Généralement, pour avoir des résultats plus fiables pour les marchés non-saturés, la durée de vie des EEE doit être représentée par une fonction de distribution (Normal, exponentielle ou bien Weibull).

Tableau 3.6. Comparaison entre différents DEEE générés dans certains pays de la région MENA

Pays	DEEE étudiés	DEEE générés	DEEE par habitant (*)	Année	Références
Algérie	Ordinateurs	800.000 unités	0,02 PC/habitant	2016	Hamouda et al. 2017
Égypte	Ordinateurs	1.000.000 unités	0,012PC/habitant	2013	Degreif et al. 2014
Jordanie	Téléviseurs, téléphones portables, ordinateurs, réfrigérateurs, machines à laver, climatiseurs, micro-ondes, jeux électroniques, et d'autres catégories d'EEE.	23.400 tonnes	3,70 kg/habitant	2012	Fraige et al. 2012
	Téléviseurs, téléphones portables, ordinateurs, réfrigérateurs, machines à laver.	25.799 tonnes	3,29 kg/habitant	2013	Ikhlayel et al. 2016
Maroc	Téléviseurs, ordinateurs et téléphones mobiles	30.300 tonnes	0,98kg/habitant	2007	Laissaoui et Rochat 2008
Tunisie	Différents DEEE y compris les téléviseurs, climatiseurs, réfrigérateurs et des machines à laver	50.000 tonnes	4,73kg/habitant	2010	Seitz, 2014

(*) Nos propres estimations.

3.10.8 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité est une étape importante dans la validation de l'incertitude des résultats de prévision et dans l'évaluation de l'influence de la variation des paramètres d'entrée sur les résultats. Dans cette étude, les quantités prévues des ordinateurs sont sensibles envers la durée de vie des ordinateurs.

Nous avons effectué une analyse de sensibilité en augmentant et en diminuant d'une année dans la durée de vie moyenne des ordinateurs. Les résultats ont révélé que ce changement peut causer environ $\pm 17\%$ de variation de la quantité annuelle des ordinateurs obsolètes pour le modèle logistique et le modèle de Gompertz, alors que la baisse de la durée de vie d'une année peut engendrer un changement de près de 20% pour le modèle de Bass.

3.10.9 Discussion de la disponibilité et la fiabilité des données

Les chiffres de vente sont généralement utilisés pour estimer la quantité des DEEE produites. Cependant, cela n'a pas été le cas pour l'Algérie, car aucune donnée sur les ventes ou bien la production locale des ordinateurs était publiée en Algérie.

Des données sur les ordinateurs importés étaient disponibles auprès du centre national des statistiques. Néanmoins, ils ne suffisent pas pour estimer les DEEE générés en Algérie, car ils ne représentent pas la consommation intérieure.

Généralement, dans les pays en voie de développement les statistiques officielles ne sont pas fiables ou compatibles, une solution pragmatique consiste à obtenir des données de consommation directement par le biais d'un sondage où nous pouvons déterminer les stocks des équipements utilisés et leur durée de vie (tableau 3.7). Ainsi, les limites du système du sondage doivent être clairement définies en termes de taille d'échantillonnage et la couverture géographique (Murakami et al. 2010).

Tableau 3.7. Sources de données pour différentes variables nécessaires à l'estimation des DEEE.

Données	Source de données	Commentaires
EEE mis sur le marché	Les statistiques sur la production nationale et les chiffres d'importation / exportation. Les études de marché. Les associations de producteurs.	Ces données doivent être évaluées qualitativement afin d'éviter un déficit de données.
Stock	Enquêtes au sein des entreprises et des ménages	Les stocks doivent être définis s'ils comprennent des produits hibernants ou ils sont limités aux produits en cours d'utilisation.
Durée de vie	Depuis les enquêtes : L'âge des appareils mis au rebut. Les stocks au début et à la fin d'une période donnée ; Equipements en cours d'utilisation selon le principe du bilan massique	(Murakami et al., 2010 Polák et al., 2012)

La durée de vie des EEE est un paramètre clé dans l'estimation de la quantité des DEEE produites, plusieurs méthodes d'estimation des DEEE sont fortement tributaires de l'évaluation de la durée de vie.

De la recherche littérature, nous avons remarqué que, la définition de la durée de vie des EEE varie selon les pays pour des raisons socio-économiques.

La durée de vie des EEE peut être définie de différentes manières en fonction de la disponibilité des données et la méthode d'estimation des DEEE utilisée.

Dans le cas des ordinateurs, la durée de vie a pris plusieurs définitions (Yu et al. 2010) :

- L'intervalle de temps entre l'achat de nouveaux équipements de même type.
- La durée de temps pendant laquelle un individu ou une organisation possède l'équipement.
- La période entre la première acquisition de l'équipement et sa gestion finale en sa fin de durée de vie.

Après la collecte et la compilation des données, différentes méthodes d'évaluation des DEEE peuvent être appliquées. Cependant, il est important de différencier entre le niveau de saturation du marché des EEE. Araújo et al. 2012 distinguent entre deux types de marché des EEE :

- Marchés matures (saturés) comprend les réfrigérateurs, les congélateurs, machines à laver, téléviseurs, l'estimation de la quantité des DEEE produite se fait en supposant une durée de vie moyenne pour les équipements.
- Marchés non-matures (non-saturés) englobe des produits comme les ordinateurs et les téléphones cellulaires, en raison des changements technologiques qui affectent la durée de vie, la production des DEEE est estimée en fonction de la différence entre les ventes et la variation du stock en cours d'utilisation.

Cette étude a présenté une méthodologie pour évaluer et surveiller les déchets informatiques en Algérie. On peut en conclure que les modèles existants sont tout à fait capables de décrire le processus de diffusion de la pénétration de l'informatique dans la société algérienne. Cependant, le modèle logistique est considéré comme le plus précis en se basant sur les valeurs les plus faibles des erreurs pour l'étude de cas en Algérie.

Les différents modèles de prévision utilisés dans cette étude ont été largement utilisés pour prévoir le taux des produits TIC adoptés. Cependant, l'inconvénient principal de ces modèles est qu'ils sont sensibles aux conditions initiales.

En Algérie, les consommateurs des équipements de technologies de l'information (TIC) peuvent être divisés en ménages et les non-ménages (institutions, les établissements d'enseignement, les industries publiques et privées). Plusieurs programmes sont mis en œuvre afin de diffuser l'utilisation des ordinateurs dans les entreprises et les institutions algériennes, ce qui conduit au fait que le secteur non-ménage est un important consommateur de matériel informatique. Par

conséquent, la mise en œuvre des règles spécifiques pour gérer les déchets électroniques dans ce secteur contribuerait à traiter une partie importante des e-déchets.

Les données de consommation entre les ménages et les non-ménages doivent être complètes afin de garantir la fiabilité de l'évaluation de la production des déchets électroniques.

Les résultats de la présente étude ont mis en évidence la nécessité d'une nouvelle enquête pour recueillir des données qui sont nécessaires pour soutenir les parties prenantes à mettre en place une politique efficace de gérer les DEEE dans le pays.

4. Evaluation de la faisabilité économique de traitement des déchets des micro-ordinateurs en Algérie

L'objectif de cette partie est d'appliquer la méthode "Analyse coût-avantage (ACA)" dans le secteur de la gestion des déchets des micro-ordinateurs en Algérie.

En outre, cette partie vise à fournir des informations sur les méthodes de traitement des déchets des micro-ordinateurs afin d'améliorer l'analyse du système et l'évaluation des effets environnementaux dans l'ACA.

Il existe de différentes méthodes de traitement des déchets électriques et électroniques (DEEE), comme nous l'avons déjà mentionné dans le deuxième point (Etat de l'art). Pour les pays en voie de développement il est difficile de mettre en place un système de recyclage développé dont l'objectif est de recycler les matériaux précieux et ceci pour plusieurs raisons :

- Le flux des quantités entrant l'unité de traitement doit être considérable.
- Difficulté d'assurer la continuité de consommation des EEE dans les pays en voie de développement en raison de la situation économique instable et difficile dans ces pays.

Le traitement des DEEE diffère entre les pays développés et ceux en voie de développement pour des raisons socio-économiques. Dans les pays industrialisés, le traitement automatique ou semi-automatique est généralement adopté en raison des coûts relativement élevés de la main-d'œuvre. Par contre dans les pays en voie de développement, les coûts de l'adoption de la technologie sont élevés, dans ces pays les coûts de la main d'œuvre ne sont relativement pas cher, ce qui va permettre de créer des postes d'emploi. Plusieurs études ont été réalisées dans les pays en voie de développement pour étudier la faisabilité économique de traitement des DEEE (Projets Bo2W et EMPA). Pratiquement, toutes ces études s'entendent sur la nécessité d'une collaboration internationale. Le principe de cette philosophie (Bo2W) consiste à développer des unités de démantèlement local tout en coopérant avec le réseau mondial d'infrastructures modernes pour un traitement durable des déchets électroniques (Wang F. 2012).

La principale préoccupation pour certains pays en voie de développement est de mettre en place un système adéquat de prétraitement des DEEE tout en respectant l'environnement et en réalisant un profit.

Le prétraitement des DEEE peut se faire par un démontage manuel ou bien semi-mécanique, une évaluation économique est nécessaire pour évaluer les techniques de prétraitement en Algérie.

Le profit de prétraitement est exprimé par la formule suivante :

$$P = RV_{total} - C_{tot}$$

Sachant que : P est le profit, RV_{total} représente le total des revenus provenant de la vente de composants démontés et C_{total} représente le coût total de traitement des déchets électroniques.

$$RV = \sum_{i=1}^n x_i * P_i$$

X_i est la quantité des matériaux récupérés, P_i est le prix des matériaux récupérés.

$$C = C_{fixe} + C_{variable}$$

C_{fixe} est l'ensemble des coûts fixes et $C_{variable}$ est la somme des différents coûts variables.

La sélection d'une technique de prétraitement optimale repose principalement sur l'efficacité technique et économique.

L'efficacité dépend de la valeur marchande des matériaux libérés (figure 4.1). Elle est limitée par les coûts de main-d'œuvre et d'équipement. Quelle que soit la méthode de prétraitement choisie, il est toujours nécessaire de prendre en considération les paramètres environnementaux, économiques, sociaux et législatifs.

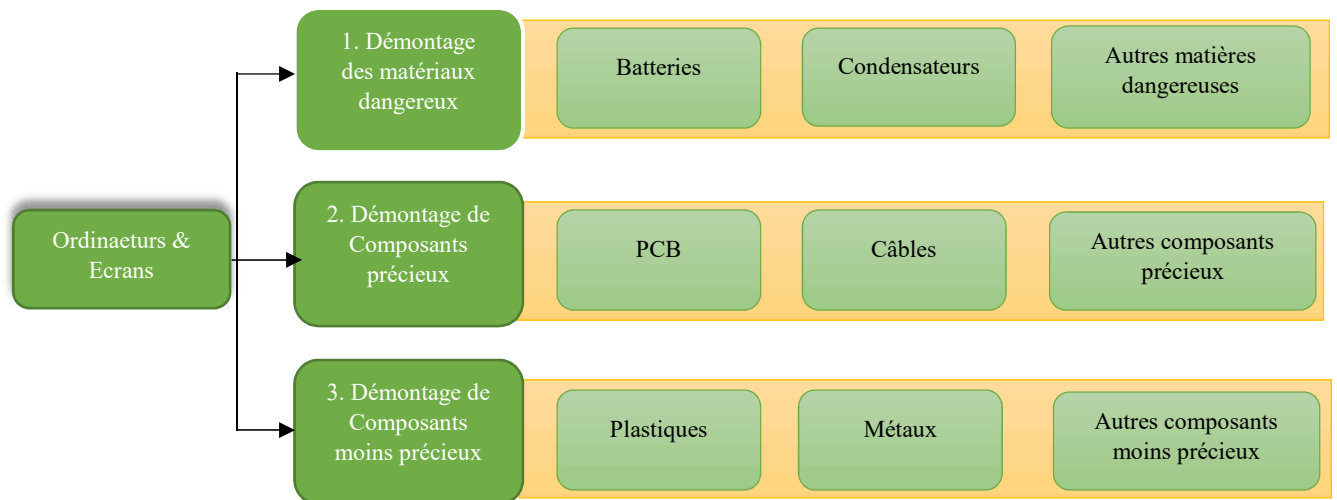


Figure 4.1. Différentes étapes de démontage des ordinateurs et écrans et les différents matériaux résultants (modifié de Bohr, 2007).

4.1 Méthodologie

Cette partie consiste à évaluer la faisabilité économique et de mettre en place une unité de traitement des déchets électroniques en Algérie, et de peser les coûts prévus par rapport aux avantages escomptés à travers une analyse coûts-Avantages (ACA).

Selon Wang et al. 2012, la meilleure façon de traiter les déchets électroniques se présente dans la philosophie «Best-of-2-Worlds» (Bo2W), cette dernière fournit une solution pragmatique pour le traitement de ce type de déchets dans les économies émergentes. Cette philosophie vise à intégrer d'une manière technique et logistique le «meilleur» prétraitement dans les pays en voie de développement pour démanteler manuellement les déchets électroniques et les «meilleurs» traitements finaux pour traiter les fractions complexes et dangereuses dans les installations de traitement de pointe les plus modernes au monde. Cette philosophie est adoptée dans cette étude. Dans cette partie nous estimons les revenus et les coûts de traitement. Ces derniers devraient être fondés sur des hypothèses réalistes concernant les inputs des déchets micro-ordinateurs calculés dans le troisième point (Modélisation des déchets électroniques générés en Algérie). En simplifiant le modèle structurel d'une étude de faisabilité d'un projet complexe, les étapes essentielles de l'étude de la faisabilité du recyclage des déchets électroniques sont identifiées comme suit :

- Analyse du marché des matériaux recyclés.
- Estimation des coûts des installations de traitement des DEEE.
- Analyse des investissements (y compris la valeur actuelle nette, le temps de rendement interne).

4.2 Description de l'unité de traitement prévue

Les déchets des micro-ordinateurs sont générés à la fois par des ménages et des différents instituts et entreprises. Il est recommandé de discuter la mise en place d'une unité de démontage des déchets électroniques en étroite collaboration avec les institutions gouvernementales (ex : Des ministères) pour deux raisons :

- Il se peut que la valeur intrinsèque des déchets électroniques n'assure pas un financement équilibré de l'entreprise de traitement des déchets électroniques.
- La mise en place des différentes réglementations pour organiser la récupération et la collecte des équipements électroniques en leur fin de durée de vie va certainement permettre de collecter une quantité d'ordinateurs considérable surtout au niveau des entreprises et institutions

Cette étude économique est basée sur l'expérience d'autres études élaborées dans le continent africain (Maroc, Uganda et la Tanzanie)

Les hypothèses pour développer une unité de traitement des déchets des micro-ordinateurs en Algérie :

- La dépollution des écrans CRT est assurée par cette unité de traitement.
- Malgré le fait que le marché international des matières secondaires est très volatile, seuls les prix des matériaux de toute l'année 2016 sont considérés dans cette étude (voir tableau 4.1).
- Selon le résultat de notre enquête (présenté dans le 3^{ème} point), les ménages n'envoient leurs équipements électroniques directement aux décharges que lorsqu'ils ne fonctionnent plus. A partir de là, nous négligeons toute activité de réparation ou remise à neuf des flux des équipements entrant à l'unité de traitement.
- Frais de recyclage que les différents producteurs et importateurs doivent payer sont requis en tant que revenus supplémentaires pour assurer une performance financière positive.

Tableau 4.1 : Prix du marché des matériaux (Euro/ kg) (LME, 2016)

Matériaux	€/kg		Matériaux	€/kg	
	σ	μ		σ	μ
Aluminium	1.23	0.30094	Or	33196.57	2686.121
Cuivre	3.9568	1.297611	Argent	465.70	92.10652
Plomb	1.73	0.35159	Platine	28604.18	6651.15
Plastic	0.39	0.349476	Palladium	17336.66	5794.674
Acier inoxydable	4	0.097161	Cobalt	23.14	5.913958

σ = valeur moyenne; μ = écart-type

Évidemment, la vente des métaux de base (Aluminium, cuivre, etc.) n'apporte pas 100% des prix présentés dans le tableau 4.1. En se basant sur les indicateurs des entreprises de recyclages, ces métaux (Aluminium, cuivre) perdent 20% de leur valeur alors que pour les métaux ferreux, ils perdent environ 50% de leur valeur.

4.3 Composition des micro-ordinateurs et moniteurs

Afin d'identifier les différents matériaux composants les micro-ordinateurs et moniteurs de type FPD (soit Écrans plats, en anglais Flat-Panel Display), nous avons mené une recherche biographique approfondie (voir annexe 4) et une série des démontages des micro-ordinateurs et moniteurs au sein du laboratoire de gestion des déchets à l'université technique de Berlin.

Il existe plusieurs méthodes pour présenter les résultats de démontage (Voir annexe 4) et la classification des matériaux varie pour plusieurs raisons :

- Le poids de l'équipement, par exemple les moniteurs CRT pèsent de 17 kg à 23 kg, tandis que les moniteurs FPD pèsent de 4,3 à 5,5 kg.
- L'objectif derrière cette étude, par exemple si l'auteur se concentre sur les matériaux précieux, il détaille plus les composants qui contiennent des matériaux précieux (Cartes électroniques).

Les figures de 4.2 à 4.4 présentent la composition des micro-ordinateurs (ordinateurs de bureau et portables) et moniteurs FPD.

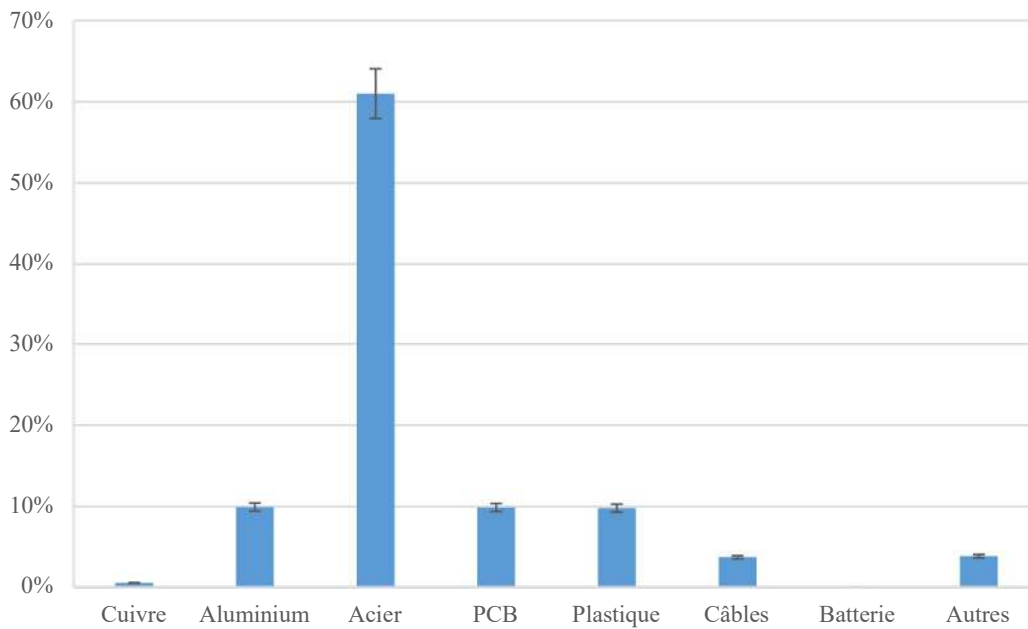


Figure 4.2. Part de la composition des matériaux d'un ordinateur de bureau (Böni et al. 2011)

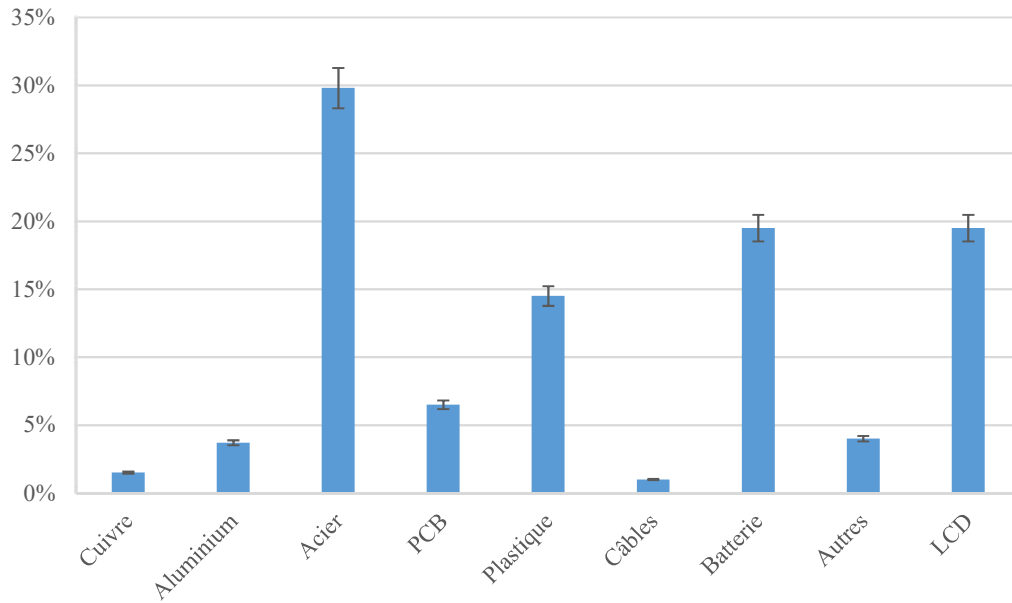


Figure 4.3. Part de la composition des matériaux d'un ordinateur portable (Böni et al. 2011)

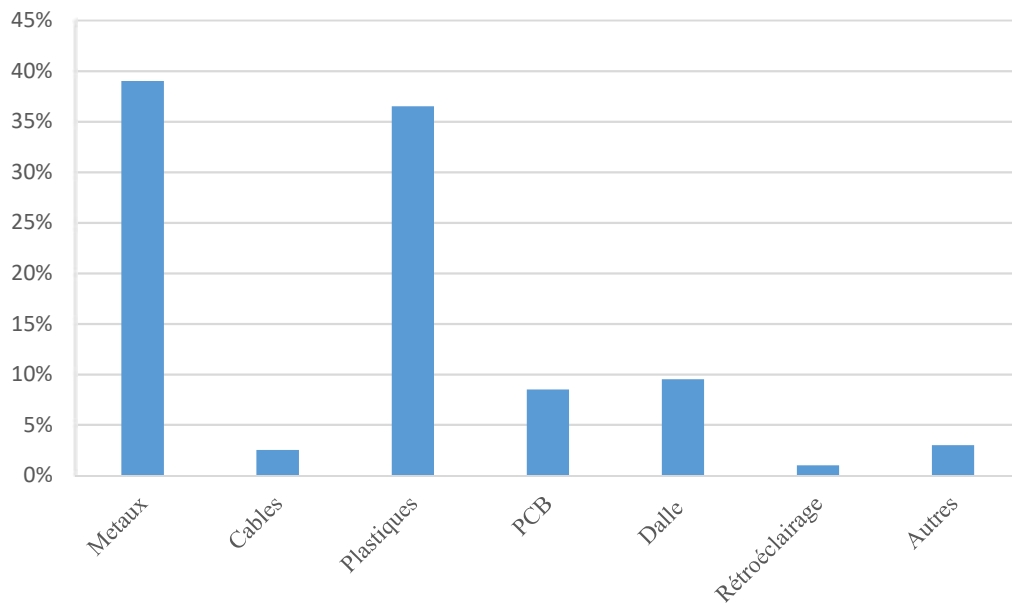


Figure 4.4. Part de la composition des matériaux d'un moniteur de type FPD (Böni et al. 2011)

Par ailleurs, le tableau 4.2 présente une autre façon pour présenter la composition d'un micro-ordinateur portable. C'est le résultat d'une série de démantèlement de plusieurs micro-portables que nous avons fait au sein du département de gestion des déchets à l'université technique de Berlin. (Voir annexe 4).

Tableau 4.2. Résultats de démantèlement et de la composition d'un laptop Toshiba.

Données générales	Fabricant	Toshiba
	Modèle	Satellite M30x-102
	Année de fabrication	/
	Type de batterie	Li-ion
	Equipement incomplet	Sans chargeur
	Poids total avant démontage [g]	3002,9
Matériaux homogènes		
	[g]	[%] par poids du produit
acier et alliages d'acier	149,05	4,96%
Al et Alliages Al	279,47	9,31%
Mg et Alliages Mg	39,57	1,32%
Cu et Alliages Cu	34,09	1,14%
Alliages à aimants NdFeB	26,09	0,87%
Caoutchouc et plastiques	1196,36	39,85%
Matériaux non-homogènes		
	[g]	[%] par poids du produit
Composites d'acier au cuivre (y compris les moteurs)	19,71	0,66%
plastique-cuivre (y compris les fils et les câbles)	21,17	0,71%
Fe / Cu / Plastique	71,67	2,39%
Al / Cu / Plastique	766	0,26%
caoutchouc et matières plastiques	9,21	0,31%
Fe/Al	52,72	1,76%
Cu/Fe/PCB	3,43	0,11%
Plastique / Fe / Aimant	4,13	0,14%
Non-précisé	5,06	0,17%
Composants et sous-systèmes complexes		
	[g]	[%] par poids du produit
PCB après l'enlèvement des condensateurs Ta.	442,46	14,74%
Condensateurs Ta.	0,69	0,02%
PCB de la batterie	5,85	0,19%
Dalle LCD	275,00	9,16%
Tube CCFL	1,00	0,03%
Paquet de cellules Li-ion	358,00	11,92%
Total	3002,394 [g]	100%

4.4 Les flux d'entrée (Inputs) attendues

Convaincre les différents consommateurs à déposer leurs déchets électroniques à l'unité de traitement et assurer un taux de collecte des déchets électroniques élevé est un vrai défi pour assurer le rendement et l'efficacité de l'unité de traitement. Afin de convaincre les différents consommateurs à déposer leurs déchets électroniques, les responsables de cette unité doivent mettre en place une stratégie de collecte attrayante, cela signifie que l'effort logistique fourni par

le consommateur doit être minimal, ainsi l'unité de traitement des déchets électroniques doit encourager les différents consommateurs en leur payant des rémunérations.

De l'expérience dans certains pays africains, la collecte des déchets peut se faire de quatre différentes voies (Spitzbart & Schluep, 2014)

- a. La collecte peut se faire directement au niveau de l'unité de traitement. Cette dernière paiera des prix d'achat concurrentiels afin de s'assurer qu'il est intéressant de remettre les déchets directement à l'unité de traitement. Cette voie concerne les consommateurs privés (ménages).
- b. La collecte entre entreprises («business to business - B2B»), l'unité de traitement peut collecter les déchets électroniques directement auprès des différentes entreprises, instituts et les autorités locales.
- c. La collecte des déchets électroniques peut se faire aussi au niveau des magasins de réparation.
- d. Points de collecte décentralisés, la collecte des déchets électroniques peut se faire aussi au niveau des différents points des collectes avant d'atteindre l'unité de traitement.

On s'attend à ce que la composition des déchets électroniques collectés soit différentes selon les sources (ex : ménages et instituts). On s'attend à ce que la collection soit dominée par des moniteurs de type CRT et des ordinateurs de bureau et viennent plus des différentes entreprises et instituts. Le tableau 4.3 donne la quantité des flux d'entrée (Inputs) attendus.

Tableau 4.3 : flux d'entrée (Inputs) attendus.

	Ordinateurs portables (t/an)	Ordinateurs de bureau (t/an)	Ecrans FDP (t/an)	Ecrans CRT (t/an)	Total (t/an)
Année 1	5	17,5	7,5	20	50
Année 2	8	67	10	65	150
Année 3	10	95	15	80	200
Année 4	25	195	30	50	300
Année 5	35	250	35	30	350

La faisabilité économique de l'entreprise est évaluée sur l'horizon de cinq ans et la quantité des flux entrant l'unité devraient augmenter d'une entrée initiale de 50 t/an jusqu'à 350 t/an. On s'attend à cette augmentation en raison de la liquidation attendue des stocks des différents instituts et entreprises gouvernementales.

La distribution des flux d'entrée pour la première année est donnée par : 10% ordinateurs portables, 35% ordinateurs de bureau, 15% écrans FDP et 40% écrans CRT.

Selon ces hypothèses, les flux d'entrée pendant les premières années sont dominés par les écrans de types CRT et des ordinateurs de bureau. En cinquième année, la distribution des flux attendus est donnée par : 10% ordinateurs portables, 71% ordinateurs de bureau, 10% écrans FDP et 9% écrans CRT.

4.5 Différents traitements existants en aval et les fractions de sortie (Outputs) produites

4.5.1 Différents traitements existants en aval

L'Agence Nationale des Déchets (AND), a annoncé qu'environ 1000 entreprises actives dans le secteur de la gestion des déchets en Algérie et approximativement 80% du taux de récupération se fait par les canaux informels (Jeune indépendant, 2017). Actuellement, au niveau national, il existe des options de recyclage que pour certains éléments (aluminium, fer / acier, acier inoxydable, verre et certains types de plastique).

Après la phase de démantèlement, les fractions séparées doivent être envoyées vers des unités de traitement de haute technologie afin de les recycler et les réutiliser encore comme une matière première. Certaines fractions (matières plastiques, métaux, etc.) séparées peuvent subir une éventuelle étape de déchiquetage afin de se conformer aux exigences de leurs acheteurs et aussi pour faciliter leur transport. Les fractions qui nécessitent un traitement perfectionné et avancé dans des unités de haute technologie sont les suivantes :

Ecrans de type (CRT)

Selon l'Université des Nations Unies, la quantité globale des déchets d'écran CRT produite en 2014 était d'environ 6,3 million de tonnes (Mt) (Baldé et al. 2015). La plupart de ces déchets ont été générés en 2014 : en Asie : 2,5 Mt, suivis de l'Europe, de 1,7 Mt, l'Amérique 1,7 Mt, et l'Afrique 0,3 Mt (Baldé et al. 2015).

Les écrans CRT représentent un danger pour l'environnement en raison de leur composition qui contient de nombreux métaux toxiques (par exemple le cadmium), ce qui nécessite un traitement écologiquement rationnel. Ainsi, les écrans CRT nécessitent un traitement spécial pour séparer le verre au plomb (Cône) et la poudre fluorescente du verre au baryum (Dalle) et d'autres composants.

Ecrans de type (FDP)

Au cours des dix dernières années, les écrans plats (écran LCD et plasma) ont remplacé les écrans CRT de plus en plus aux points de vente. Pour le recyclage des écrans FDP, la situation est presque

similaire que pour les écrans CRT, les options de recyclage et d'élimination sont bien établies pour les métaux (ferreux et non ferreux), les composants riches en métaux (câbles, cartes de circuit imprimé) et les composants contenant des substances dangereuses, tandis que le traitement des dalles FDP est encore en cours de développement (Salhofer et al. 2012). Le processus de traitement des écrans de type FDP et CRT est expliqué dans l'annexe 3.

Cartes à circuits imprimés (cartes électroniques) :

Les cartes électroniques (PCB, également PWB) sont des composants très complexes dans lesquelles différents métaux précieux et spéciaux sont mélangés (Hagelüken, 2006). Au niveau mondial, le traitement final des cartes électroniques est généralement effectué dans des raffineries de haute technologie. Des processus métallurgiques sont nécessaires pour récupérer les métaux dans les PCB. L'efficacité de la récupération métallurgique est affectée par les caractéristiques du matériau produit lors du prétraitement (Meskers et al. 2009). L'utilisation des technologies de prétraitement appropriées qui produisent des fractions de sortie qui répondent aux spécifications de l'étape de traitement final est une condition préalable pour une bonne séparation métallurgique (Meskers et al. 2009). Une composition typique d'un PCB d'un micro-ordinateur est la suivante : 7% de Fe, 5% d'Al, 20% de Cu, 1,5% de Pb, 1% de Ni, 3% de Sn et 25% de composés organiques. En outre, 250 ppm (partie par million) Au, 1000 ppm Ag et 100 ppm Pd et des traces de As, Sb, Ba, Br et Bi peuvent être trouvées (Hagelüken, 2006).

Batteries

Les déchets électroniques contiennent de nombreux types de batteries dont leur composition est diversifiée, la plupart d'entre elles contiennent des substances dangereuses qui doivent être éliminées d'une manière rationnelle. Schluep et al. (2009) recommande d'envoyer les batteries des déchets électroniques à des unités spécialisées pour la récupération de cobalt, de nickel et de cuivre.

Les prix des batteries qu'Umicore (un groupe mondial de technologie des matériaux et de recyclage,) offre dépendent des prix actuels des produits de base pour le cobalt (dans le cas des batteries Li-ion) et du nickel (batteries NiMH) (Aissaoui et al.2008). Selon Umicore, la part moyenne de ces deux types de batteries d'ordinateur portable est d'environ 87,5% de batteries Li-Ion et 12,5% NiMH (Aissaoui et al.2008). Les prix des batteries usagées offerts par Umicore sont confidentiels. Par conséquent, les revenus des ventes de batteries et des cartes électroniques (PCB)

utilisés dans ce modèle, ont été extraits des différentes études (Aissaoui et al. 2008, Blaser et al. 2014)

Plastiques

Différents types de plastique sont utilisés dans la fabrication d'ordinateurs dont l'Acrylonitrile butadiène styrène (ABS), le polystyrène (PS) et le polypropylène (PP). Le problème majeur des plastiques utilisés dans les équipements électroniques est les ignifugeants halogènes (FR) trouvés dans divers plastiques et le polychlorure de vinyle (PVC) dans l'isolation des fils, si ces matières plastiques sont brûlées, des dioxines toxiques et des furannes sont générés. Par conséquent, ces fractions nécessitent un traitement spécial (Aissaoui et al. 2008). Le tableau 4.4 présente les traitements potentiel en aval pour les différentes fractions résultantes.

Tableau 4.4. Traitements potentiel en aval pour les différentes fractions résultantes pour l'Algérie.

	<i>Récupération des matériaux</i>	<i>Elimination des déchets dangereux</i>
Traitement disponible au niveau national	Métaux ferreux et non ferreux Verre- plastiques sans RFB*	Plastiques avec RFB* Tubes fluorescents
Traitement disponible dans des unités modernes	Aimant de néodyme Processeurs PCB (de toute qualité)	Cône (écrans CRT) – Modules FPD avec lampes et dalles- Batterie- Condensateurs-

*RFB : Retardateur de Flamme Bromé

4.5.2. Les fractions de sortie (Outputs) produites

Un démantèlement profond est l'option de traitement adéquate dans les pays en voie de développement où le coût de la main d'œuvre n'est relativement pas cher par rapport aux pays industrialisés. Les objectifs du démantèlement profond sont :

- Elimination des composants et substances dangereuses (dépollution).
- Séparation et tri des différents matériaux et composants, pour un traitement ultérieur potentiel.
- Le taux de récupération des métaux précieux est très élevé.
- Création des postes d'emplois et inclusion du secteur informel.

Un traitement mécanique peut être économiquement faisable plus tard pour le décapage des câbles et le broyage des matières plastiques (Spitzbart et al. 2014) Cependant, dans le cas algérien, dans les premières années, la quantité présumée des câbles issue de déchets électroniques atteint un potentiel de 1.3 t/an ce qui n'est pas suffisant pour supporter l'investissement d'une machine de

décapage de câble. Mais, après cinq ans la quantité présumée des câbles atteindra un potentiel maximal de 14 t/an dans ce cas une étude d'investissement est nécessaire.

4.5.3 La profondeur de démontage

En raison des coûts de personnel relativement faibles, un démantèlement profond (voir annexe 2) est l'option de traitement adéquate. Les déchets électroniques collectés sont démontés manuellement jusqu'à un certain point, où seuls d'autres procédés (mécaniques ou métallurgiques) peuvent obtenir une plus grande pureté matérielle des fractions produites.

La profondeur de démantèlement sélectionnée et les différentes options de traitements existantes, nous conduisent aux fractions présentées dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5. Part des fractions résultantes du démantèlement (notre propre calcul, Aissaoui et al. 2008, Blaser et al. 2014)

	Ordinateur portable (%)	Ordinateur de bureau (%)	Ecran FPD (%)	Ecran CRT (%)
Cuivre	1	1,3	0,65	7
Aluminium	5,4	7,9	3,1	2
Fer	11,6	59,1	36,25	10
Bronze / laiton	0,3	0,02		
PCB haute qualité		9,78	8,5	
PCB de qualité moyenne	6,5	0,3		
PCB de faible qualité		2		8
Verre (CRT)				60
Plastiques	27,6	8,8	36,5	13
Câbles	7	4,5	2,5	
Déchets résiduels	0,6		3	
Ecrans FPD (dalle)	5,5		9,5	
Batterie	15,5	0,3		
Moteurs / transformateurs	1,2	1,1		
Condensateurs		0,8		
Mélange métal-plastique	15,8	3,1		
Aimant de néodyme	0,2	0,1		
Acier inoxydable	1	0,5		
Processeurs	0,7	0,4		
 Tubes fluorescents	0,1			
Total (%)	100	100	100	100

4.6 Différents coûts

Le but de ce point est de donner un aperçu sur les coûts actuels considérés dans ce modèle. Les nombres les plus importants sont énumérés ci-dessous, tandis que dans l'annexe 5, des nombres plus détaillés sont présentés.

4.6.1 Coûts de la main d'œuvre

Le salaire national minimum garanti (SNMG) en Algérie est estimé à 18 000 dinars (environ 163 euros) en 2015 (Journal Officiel N° 66 DU 04/12/2011).

Selon les expériences d'autres pays en développement (Maroc, Tanzanie et Uganda) le salaire d'un travailleur dans une unité de démantèlement varie de 140 dollar par mois (Blaser et al. 2014) à 312 dollar par mois (Aissaoui et al. 2008).

Le tableau 4.6 présente une comparaison entre les salaires des employés dans des unités de traitement dans des différents pays africains. Toutes les valeurs sont en Dollars (USD) par mois.

Tableau 4.6. Comparaison des salaires dans des unités de traitement des déchets électroniques (en USD).

	Ouganda	Tanzanie	Maroc	Algérie
Secrétaire	140	335	312,5	310
Chauffeur	120	200	312,5	310
Assistant d'administration	500	1000	535,7	600
Gestionnaire	1000	2000	1339	1200
Travailleur qualifié	140	/	/	350
Travailleur moins- qualifié	120	/	/	300
Référence	Blaser et al. 2014	Blaser et al. 2012	Aissaoui et al. 2008	Cette étude*

1 USD= 0,92094 EUR (le 31/12/2015) et 1 USD= 92,5300 DZD (le 31/12/2015) (www.boursorama.com)

*les salaires proposées pour le cas algérien sont obtenus de la grille des salaires publiée par le ministère du travail algérien et adaptée par rapport aux études dans des pays africains.

Le coût de la main d'œuvre en Algérie est proche à celui du Maroc.

4.6.2 Coûts de transport

Plusieurs et différentes manières de transport sont impliquées dans la gestion des déchets électroniques, particulièrement si elles sont interconnectées au marché mondial.

Après avoir collecté et traité les déchets électroniques dans l'unité de traitement, les fractions respectives sont envoyées au traitement aval national et international. En général, le transport représente une part des coûts pertinents, dont le montant réel dépend fortement des facteurs tels

que la couverture géographique de la collecte et la conception logistique (SWICO, 2009). Dans le cas Algérien, le transport national des déchets électroniques, sera principalement effectués par camions. Par contre, pour les équipements ou bien les composants qui nécessitent un traitement spécial dans des unités de haute technologie, le transport par bateaux est généralement impliqué ce qui va augmenter les coûts de transport.

4.6.3 Coûts d'infrastructure

Les coûts d'infrastructure couvrent les frais de location, électricité, frais d'entretien et de réparation. Connaître l'endroit où mettre en place l'unité de traitement est très important en raison des coûts de location qui peuvent varier en fonction des lieux.

4.6.4 Coûts des équipements et matériels nécessaires

Selon les flux des déchets électroniques attendus et les étapes et les options de traitement correspondantes, un ensemble d'équipements et de matériels est requis. Les dépenses pour les équipements ayant une durée de vie plus d'une année (tel que : Tables de démantèlement, Palettes, unité de traitement CRT, etc.) ont été prises en compte dans le calcul des investissements. Pour les équipements ayant une durée de vie moins d'une année (Les outils de travail et sécurité, chaussures, gants, etc.) sont mentionnés dans le tableau 4.8 (Coûts d'équipements). Les coûts de ces équipements ont été extraits de l'étude de cas de l'Ouganda (Blaser et al. 2014).

4.6.5 Coûts d'amortissement

Ils sont donnés par le rapport entre les coûts des équipements et leur durée de vie. Dans notre étude la durée de vie des équipements varie d'une année (ex : outils de travail) à dix années (ex : table de démontage).

4.6.6 Coûts d'administration

Ces coûts impliquent toutes les dépenses pour l'administration (Fournitures de bureau, télécommunication / Internet, etc.)

4.7 Revenus

La part principale des revenus provient de la commercialisation des différentes fractions. Les résultats sont résumés dans le tableau 4.7.

Tableau 4.7. Coûts et revenus prévus de ventes des fractions.

	1 ^{ère} année	2 ^{ème} année	3 ^{ème} année	4 ^{ème} année	5 ^{ème} année
Cuivre	6830,11	21985,66	27778,32	25595,99	23413,58
Aluminium	2810,27	9022,03	12435,27	22982,53	28689,74
Fer	2005,21	6523,37	9115,21	17311,66	21654,07
Bronze / laiton	36,97	74,76	97,98	227,95	309,93
PCB haute qualité	5736,87	7650,00	11474,76	22949,85	26774,89
PCB de qualité moyenne	10035,02	34440,35	48353,15	100850,63	130349,93
PCB de faible qualité	4572,97	15194,21	19111,20	16386,23	14187,46
Verre (CRT)	-719,98	-3900,01	-4800,01	-3000,01	-1800,00
Plastiques	3302,59	8081,56	10797,92	16603,92	19333,94
Câbles	1298,30	3748,48	5242,97	11049,45	14283,45
Mélange métal-plastique	22,69	30,97	45,39	93,45	112,14
Ecrans LCD	-987,31	-1389,99	-1974,97	-4224,97	-5249,99
Batterie	289,51	504,34	642,24	1560,97	2161,23
Moteurs / transformateurs	75,73	249,87	349,46	733,42	950,90
Condensateurs	-181,98	-696,77	-987,96	-2027,92	-2599,90
Aimant de néodyme	40,00	63,96	80,00	200,00	280,00
Acier inoxydable	549,96	1659,96	2299,99	4899,99	6400,00
Processeurs	5899,38	18204,96	25285,41	53661,30	69956,45
Total (€)	41.616,31	121.447,69	165.346,34	285.854,44	349.207,83
Total (DA)*	5.081.351,45	148.287.63,00	201.887.88,00	349.028.27,00	426.382.76,00

* 1 €= 122,1 DA (le 10/09/2016) (www.boursorama.com)

4.8 L'analyse coûts-Avantages (ACA)

Nous utilisons la méthode Analyse coûts-avantages (ACA) appelée aussi Analyse coûts-bénéfice (en anglais Cost-Benefit Analysis -CBA) pour évaluer la faisabilité économique de traitement des micro-ordinateurs en Algérie. Il est important de bien noter que l'ACA est un outil d'aide à la décision, et non pas un outil de prise de décision. La méthode ACA est censée fournir les meilleures informations disponibles sur le sujet en question.

L'intention de l'analyse coûts-avantages est de comparer les implications de l'efficacité économique des options alternatives qui peuvent être mises en œuvre pour répondre à un projet particulier ou une exigence de politique (TemaNord 2007). Une analyse coûts- avantages peut être effectuée dans le cadre des travaux préparatoires pour l'établissement d'une stratégie de gestion des déchets ou un plan de gestion des déchets.

Deux types d'ACB existent : ex-ante et ex-post. Une étude ex-ante examine l'efficacité des options différentes pour la mise en œuvre d'une stratégie ou une politique, par exemple la directive de

l'Union européenne. Alors qu'une étude ex-post examine si la stratégie ou bien la politique déjà mise en œuvre a été efficace (TemaNord 2007).

Pour établir une analyse CBA, nous étudions la faisabilité économique de mettre en œuvre une unité de traitement des déchets des PC en Algérie. Selon Wang et al. 2012, pour les pays en voie de développement, il est recommandé de mettre en place des unités de tri et démontage des DEEE, et de recycler ce qu'on peut localement (ex : Métaux ferreux) et d'envoyer les composants complexes (ex : PCB) vers les pays qui maîtrisent les techniques de traitement et récupération.

Gmuender (2007) affirme qu'un démontage profond des micro-ordinateurs (voir annexe 2) est plus rentable qu'un démontage partiel de l'équipement. Le tableau suivant présente tous les revenus et coûts associés.

Tableau 4.8. Différents revenus et coûts associés

	1 ^{ère} année	2 ^{ème} année	3 ^{ème} année	4 ^{ème} année	5 ^{ème} année
Rémunération (€) *	5.487,11	16.012,88	21.800,92	37.689,91	46.043,05
Revenus de ventes (€)	38.723,3	115.322,8	157.032,3	270.943,5	330.783,7
Revenus (€)	44.210,41	131.335,7	178.833,2	308.633,4	376.826,7
Revenus (DA)	5.398.091,06	16.036.089	21.835.533,72	37.684.138,1	46.010.540,1
Coûts d'achat des déchets et traitement en aval (€)	-18.405,4	-53.605,5	-72.237,7	-127.231	-157.694
Coût d'élimination (€)	-3.616,21	-10.095,3	-9.136,33	-10.757,2	-12.943,3
Coût du transport externe (€)	-9.922,15	-29.096,7	-24.472,2	-28.433	-33.729
Achat total et coût en aval	-31.943,7	-92.797,4	-105.846	-166.421	-204.366
Revenus nets (€)	12.266,67	38.538,22	72.986,92	142.212,2	172.460,3
Total des dépenses de personnel (€)	-28.732,8	-33.373,9	-31.053,3	-33.373,9	-38.014,9
Total des coûts d'infrastructure (€)	-6.195,19	-6.195,19	-9.359,59	-9.359,59	-9.359,59
Total des coûts d'équipement (€)	-1.314,98	-1.314,98	-1.314,98	-1.314,98	-1.314,98
Total des coûts de transport	-720,78	-1.170,83	-1.012,61	-1.093,48	-1.191,92
Total des coûts d'administration (€)	-1.758	-1.758	-1.758	-1.758	-1.758
Coût d'Amortissement (€)	-1.793,16	-1.793,16	-1.793,16	-1.793,16	-1.793,16
Coûts totaux (€)	-40.514,9	-45.606	-46.291,7	-48.693,1	-53.432,7
Coûts totaux (DA)	-4.946.869,29	-5.568.492,6	-5.652.216,57	-5.945.427,51	-6.524.132,67
Résultats d'exploitation (€)	-28.248,2	-7.067,82	26.695,27	93.519,12	119.027,6
Résultats d'exploitation (DA)	-3.449.105,22	-862.980,822	3.259.492,467	11.418.684,6	14.533.270
Investissement (€)	-34.448,00				
Investissement (DA)	-4.206.100,8				
Résultats d'exploitation + investissements (€)	-62.696,2	-7.067,82	26.695,27	93.519,12	119.027,6
Résultats d'exploitation + investissements (DA)	-7.655.206,02	-862.980,82	3.259.492,467	11.418.684,6	14.533.270,00

* Rémunérations sont les frais payés par les différents producteurs et importateurs.

1 € = 122,1 DA (le 10/09/2016) (www.boursorama.com)

Les résultats présentés dans le tableau 4.8 montrent que l'unité de traitement peut être rentable après deux années. Cependant, en raison des investissements initiaux et taxes, les résultats d'exploitation sont négatifs au cours des deux premières années.

4.9 Critères d'évaluation et indicateurs de performance économique

Afin de juger la rentabilité financière de la mise en œuvre d'une unité de traitement des déchets électroniques en Algérie, nous nous basons sur deux critères d'évaluation : la valeur actuelle nette (VAN) et le taux de rendement interne (TRI). La viabilité financière a été évaluée aussi en fonction du point de rentabilité et de délai de récupération.

4.9.1 Valeur actuelle nette

L'investissement (I), les coûts (Ct) et les avantages (Bt) et la manière dont ils s'accumulent au fil du temps (t) peuvent être illustrés comme le montre la figure 4.5.

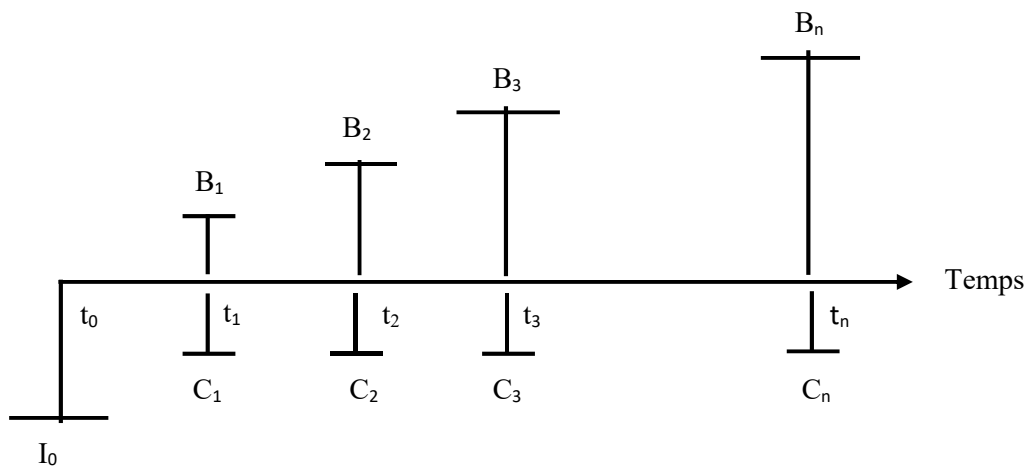


Figure 4.5. Illustration des investissements, des coûts et des avantages.

La valeur actuelle nette d'un projet d'investissement est une méthode d'évaluation qui soustrait la valeur actuelle des flux sortant de la valeur actuelle des flux entrant qui surviennent pendant toute la durée de vie du projet.

$$VAN = -C + \sum_{t=1}^N \frac{(FME-FMS)}{(1+r)^t} \quad \text{eq (4.1)}$$

Sachant que :

VAN : valeur actuelle nette (DA)

C : investissement initial (DA)

FME : flux monétaires entrants (DA)

FMS : flux monétaires sortants (DA)

t : index de temps (année)

N : durée de vie du système considéré dans l'investissement (année)

r : taux d'actualisation (%).

4.9.2 Le taux d'actualisation

Le taux d'actualisation sert à calculer la valeur actuelle de chacun des flux monétaires générés par le projet d'investissement tout au long de sa durée de vie (figure 4.6).

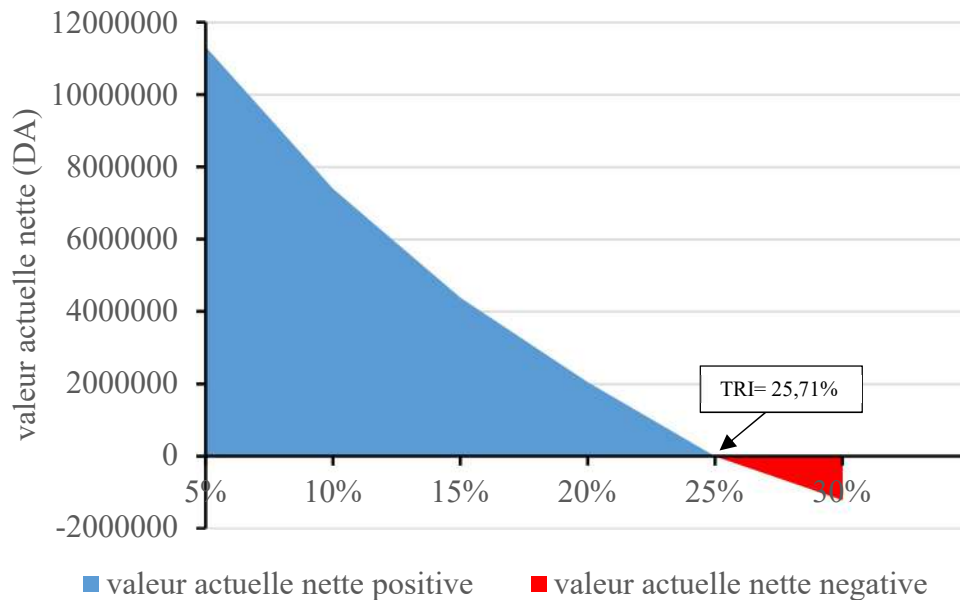


Figure 4.6. Les valeurs actuelles nettes obtenues pour différents taux d'actualisation.

4.9.3 Taux de rendement interne

Le Taux de rendement interne (TRI) est une mesure relative de rentabilité de projet définie comme le taux d'actualisation faisant en sorte que la valeur actuelle des entrées des fonds soit égale à celle des sorties de fonds.

$$\text{TRI} = r_a + \frac{\text{VAN}_a}{\text{VAN}_a - \text{VAN}_b} (r_b - r_a) \quad \text{eq (4.2)}$$

Tel que :

TRI : Taux de rendement interne (%)

r_a : Taux d'actualisation inférieur choisi

r_b : Taux d'actualisation supérieur choisi

VAN_a : Valeur actuelle nette a r_a (DA)

VAN_b : Valeur actuelle nette a r_b (DA)

Le taux de rendement interne de cette étude est de 25,71%. Alors on déduit que cet investissement serait attractif.

4.9.4 Point de rentabilité

Le point de rentabilité est le point où les revenus générés sont exactement égaux aux coûts. À ce stade, aucun profit n'est réalisé et aucune perte n'est engagée. L'analyse de rentabilité est un outil utile pour étudier la relation entre les coûts fixes, les coûts variables et les rendements. Un point de rentabilité est défini quand un investissement générera un rendement positif. D'après les résultats présentés dans le tableau 4.7, un solde positif du compte peut être atteint lors de la troisième année de l'exploitation.

4.9.5 Délai de récupération

Le délai de récupération d'un projet d'investissement (en anglais payback) est un critère qui sert simplement à déterminer la période du temps requis (généralement en nombre d'années) pour récupérer l'argent investie dans un projet. Le délai de récupération est donné par la formule suivante :

$$\text{délai de récupération} = \frac{\text{investissement initial}}{\text{Flux monétaires par période}} \quad \text{eq (4.3)}$$

Les résultats obtenus montrent que le délai de récupération de mettre en place une unité de traitement des déchets des micro-ordinateurs en Algérie est estimé de **2,77 années**.

4.10 Analyse de sensibilité des résultats

4.10.1 Prix des différents matériaux

Comme les ventes des fractions résultantes des opérations de démantèlement présentent la source principale des revenus pour l'unité de traitement, il est nécessaire d'analyser la sensibilité du modèle par rapport au prix du marché des différents matériaux. La figure 4.7 illustre les prix du cuivre (Cu), l'Aluminium (Al), l'Or (Au), le palladium (Pd) et le Platine (Pt) de 2010 à 2017 (LME, 2017 et APMEX, 2017).

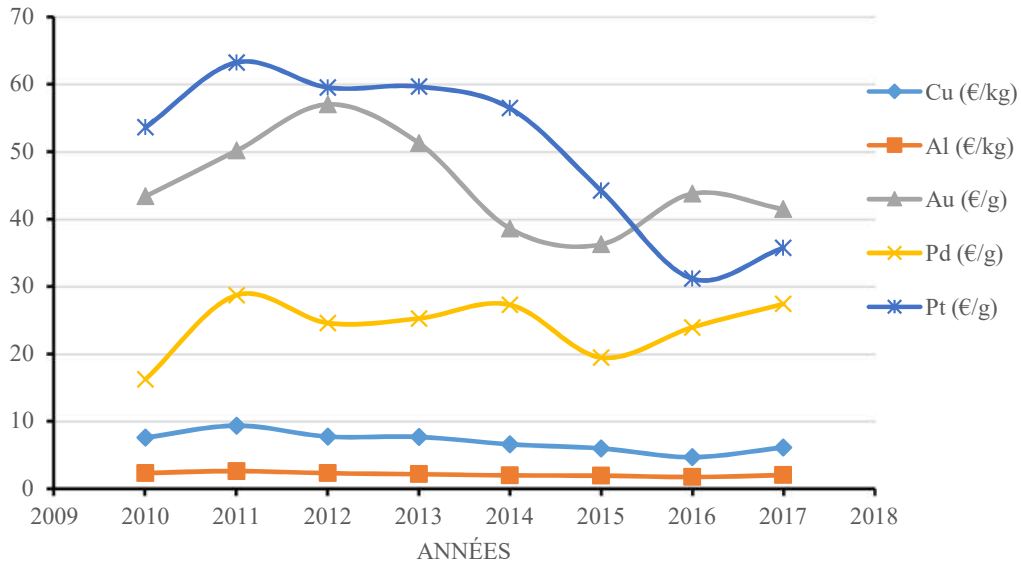


Figure 4.7. Prix des différents matériaux (2010-2017)

4.10.2 Frais de recyclage

Les frais de recyclage doivent couvrir entre 15% et 25% de tous les revenus afin d'obtenir un solde financier positif.

La figure 4.8 présente une comparaison entre deux scénarios, le premier avec frais de recyclage payés par différents producteurs et importateurs et le deuxième aucuns frais ne sont exigés. Dans ce cas d'étude, les frais de recyclage sont estimés de 15% des revenus totaux.

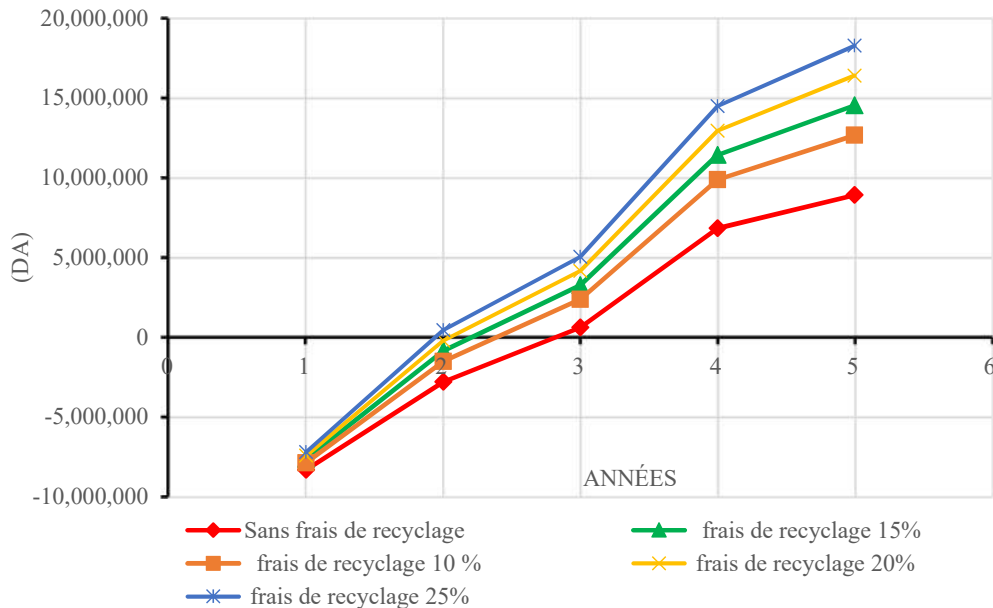


Figure 4.8. Total de résultats d'exploitation sans et avec frais de recyclage

Les frais de recyclage ont des conséquences importantes sur le résultat d'exploitation. Dans le cas où aucun frais de recyclage est exigé, le résultat financier positif ne peut être réalisé que lors de la troisième année.

4.10.3 Les flux attendus

En raison des différentes compositions des équipements obsolètes, la performance économique de l'unité de traitement dépend fortement de la composition des flux des déchets entrant l'unité. Il est difficile d'estimer la composition de ce flux, cependant, cinq scénarios différents concernant la composition du volume des déchets entrant l'unité sont présentés ci-dessous.

Le tableau 4.9 présente l'évolution des quantités des déchets entrant l'unité de la première à la cinquième année. Le tableau (5.3) dans l'annexe 5 présente les quantités détaillées des équipements par année.

Tableau 4.9. Différents scénarios des flux entrant l'unité de traitement.

Année	1	2	3	4	5
Scenario 1	50	80	100	120	150
Scenario 2	50	100	150	200	220
Scenario 3	50	120	170	220	280
Scenario 4	50	135	185	250	320
Scenario de référence	50	150	200	300	350

Pour comparer les différents scénarios, nous avons calculé le résultat d'exploitation pour chacun. Le scénario 1 n'est pas rentable du tout, malgré le traitement de 5 tonnes de micro-portables (soit l'équivalent d'environ 1786 unités) et 17,5 tonnes des ordinateurs de bureau (soit l'équivalent d'environ 1768 unités).

Le scénario 2 n'est rentable qu'en cinquième année, soit un total de 220 tonnes, où les ordinateurs de bureau et les micro-portables représentent 45 % et 11 % respectivement. un résultat d'exploitation de 339.484 DA est enregistré pour la 5^{ème} année.

Les scénarios 3 et 4 ne sont rentable qu'à partir de la quatrième année. Pour le scénario 3, un résultat d'exploitation de 1.177.035 DA est enregistré pour la 5^{ème} année (280 tonnes), où les ordinateurs de bureau et les micro-portables représentent 50 % et 9 %, respectivement, des quantités entrant l'unité. Tandis que les écrans CRT et FDP représentent 29% et 12.5% respectivement.

Pour le scénario 4, un résultat d'exploitation de 1.769.313 DA est enregistré pour la 5^{ème} année (320 tonnes), où les ordinateurs de bureau et les micro-portables représentent 52 % et 9 % respectivement. Alors que les écrans CRT et FDP représentent 28% et 11% respectivement. Quand on compare la 4^{ème} année du scénario 3 (220 tonnes) et la 5^{ème} année du scénario 2 (220 tonnes), nous constatons que les écrans de type cathodiques (CRT) et la tendance à la technologie des écrans plats (FDP) ont un l'impact économique sur la rentabilité de l'unité. La figure 4.9 illustre les différents scénarios des flux entrant l'unité de traitement.

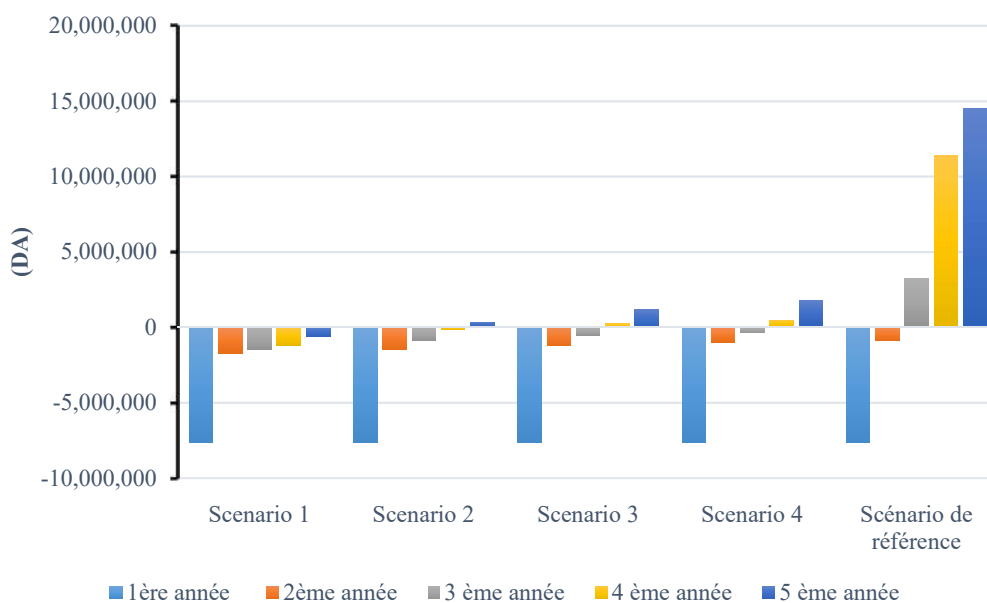


Figure 4.9. Résultats d'exploitations des différents scénarios des flux entrant l'unité de traitement
D'autres paramètres peuvent aussi influencer notre modèle : le coût des déchets CRT-FDP, les coûts de main-d'œuvre, le système de collecte et le prix payé pour acheter les équipements obsolètes.

4.11 Comparaison des résultats avec d'autres pays en développement

Différentes études (Blaser et al. 2012, Schlupe et al. 2015 et Spitzbart 2014) ont été établies dans les pays en développement (Cambodge, Ouganda) pour étudier la faisabilité économique pour mettre en place une unité de démantèlement de déchets électroniques en partant du principe de la philosophie (Bo2W) qui consiste à développer des unités de démantèlement local tout en coopérant avec le réseau mondial d'infrastructures modernes pour un traitement durable des déchets électroniques (Wang F. 2012). Le tableau 4.10 résume les résultats des différentes études.

Les résultats de ces études ont été présentés en US dollars, ainsi, nous avons converti les résultats présentés dans cette étude (le cas algérien).

Tableau 4.10. Comparaison entre des différentes études.

		1 ^{ère} année	2 ^{ème} année	3 ^{ème} année	4 ^{ème} année	5 ^{ème} année
Algérie	Flux prévu des DEEE (Tonnes)	50	150	200	300	350
	Revenus totaux (USD)	49.761,16	147.825,3	201.286,26	347.383,28	424.138,46
	Coûts totaux (USD)	-45.601,67	-51.331,97	-52.103,76	-54.806,67	-60.141,34
	Résultats d'exploitation + investissements (USD)	-7.655.206,02	-862.980,82	3.259.492,46	11.418.684,6	14.533.270
Cambodge	Flux prévu des DEEE (Tonnes)	50	100	200	300	300
	Revenus total (USD)	18.900	37.800	75.600	113.400	113.400
	Coûts totaux (USD)	-32.400	-42.900	-58.500	-74.200	-74.200
	Résultats d'exploitation + investissements (USD)	-29.400	-30.700	-22.000	6200	38.200
Ouganda	Flux prévu des DEEE (Tonnes)	90	270	220	255	300
	Revenus total (USD)	36.132	117.477	83.753	94.086	107.024
	Coûts totaux (USD)	-44.452	-54.529	-51.560	-53.085	-55.530
	Résultats d'exploitation + investissements (USD)	-47.510	62.948	32.193	40.400	51.494

* 1 USD= 108,48 DA (le 10/02/2017) (www.boursorama.com)

Ces études présentent des résultats différents. La mise en place d'une unité de recyclage n'est pas rentable durant les deux premières années. Cependant, à partir de la troisième année l'unité génère un profit important. Deux facteurs clés jouent un rôle important dans la génération du profit : la quantité des déchets entrant l'unité de traitement et la composition de ce flux.

Bien que les résultats suggèrent que le recyclage des déchets électroniques pourrait être rentable en Algérie, le modèle de calcul présenté dans ce travail et les résultats devraient être soigneusement interprétés pour les raisons suivantes :

- Les changements dans les conditions du marché (Ex : Prix des matériaux) et politiques (Ex : Frais de recyclage) pourraient modifier les résultats du plan d'affaires.
- Le prix d'achat des déchets électroniques est considéré comme paramètre clé pour assurer la performance économique de l'unité de traitement. Ce dernier doit être minimisé le maximum pour réaliser un profit.

- Le développement d'une entreprise de traitement des déchets électroniques nécessite une collaboration et coopération entre les différents acteurs (Différents consommateurs, producteurs, importateurs, décideurs et responsables).
- Un soutien politique est requis, des lois et décrets doivent être émis pour mettre en place une stratégie de collecte et traitement des déchets électroniques.
- Ces résultats, relativement positifs, ne peuvent être atteints qu'en raison de la composition favorable des déchets électroniques (dans notre cas d'étude : ordinateurs de bureau et ordinateurs portables).
- Les coûts de crédit et les taxes ne sont pas pris en considération dans cette étude.

5 Système d'information et d'aide à la décision pour gérer les déchets des micro-ordinateurs en Algérie

Depuis le début des années 1970, les travaux centrés sur la technologie des systèmes d'information et d'aide à la décision (SIAD) se sont considérablement développés. Différents acteurs utilisent les SIAD pour résoudre les différents problèmes rencontrés dans la vie quotidienne (ex : gestion des informations dans les entreprises). Avant d'introduire certaines définitions des SIAD, il est utile de donner une interprétation claire de la prise de décision.

La prise de décision est influencée par les caractéristiques et le contexte des situations de décision (Payne et al. 1993). Il est considéré que la compréhension des caractéristiques des différents types de contextes décisionnels organisationnels est une condition préalable nécessaire à la compréhension de la nature des processus décisionnels. En fait, la prise de décision est un processus plutôt qu'une seule activité.

Les systèmes d'information et d'aide à la décision sont des outils interactifs qui permettent aux utilisateurs de prendre des décisions éclairées sur les problèmes non structurés (Keefer et al. 2004)

Ces systèmes contiennent généralement une base de données d'informations sur un problème, un modèle de fonctionnement du problème étudié et une interface utilisateur.

Avec l'utilisation massive de l'ordinateur dans la gestion et la prise de décision, les systèmes d'aide à la décision modernes peuvent avoir plusieurs formes. Selon Kai Jin 2002, certains auteurs estiment que l'utilisation de l'ordinateur est indispensable pour prendre la décision par l'utilisateur. Cette méthode est appelée un système expert. La deuxième forme des systèmes d'aide à la décision est le traitement analytique en ligne, il est utilisé pour la prise de décision en temps non-réel, et particulièrement conçu pour la manipulation de données dans de grandes bases de données (Kai Jin 2002). Un Système d'information et d'aide à la décision (SIAD) peut prendre différentes formes. En général, on peut dire qu'un SIAD est un système informatique utilisé pour fournir des informations et un soutien à son utilisateur. La décision peut être définie comme un choix entre plusieurs alternatives basées sur les estimations des valeurs de ces alternatives.

Le terme d'aide à la décision signifie aider l'utilisateur à recueillir des renseignements ou bien des informations, à générer des alternatives et à prendre des décisions.

Un aspect très important lors du processus de prise de décision est de déterminer la méthode de prise de décision la plus appropriée pour le problème en considération avant que le processus décisionnel ne se déroule.

Chaque activité décisionnelle relève de l'une des deux catégories. Pour la première, la prise de décision est basée sur le brainstorming et/ ou l'expérience des décideurs. Dans cette catégorie, les décideurs proposent une décision finale d'une manière empirique sans utiliser des techniques ou des méthodes sophistiquées de prise de décision (Y. Li, 2007). Dans la deuxième catégorie, les décisions sont prises à l'aide des méthodes et techniques de prise de décision structurées qui ont un modèle d'analyse et une procédure de résolution de problèmes complexes (Y. Li, 2007).

5.1 Les systèmes d'aide à la décision utilisés dans la gestion des déchets

5.1.1 Systèmes d'information et d'aide à la décision spatiale

Les systèmes d'information et d'aide à la décision spatiale intègrent les deux disciplines distinctes : Systèmes d'aide à la décision et systèmes d'information géographique (SIG) pour des solutions avancées pour les problèmes de décision spatiale, en fournissant un environnement décisionnel pour des problèmes de décision spatiale complexes et non structurés (Sugumaran et al. 2005). La prise de décision spatiale nécessite des informations sur les alternatives spatialement distribuées et les préférences des décideurs.

5.1.2 Systèmes de gestion des connaissances et prise de décision

Les systèmes de gestion des connaissances et prise de décision sont une catégorie de systèmes d'aide à la décision construits à l'aide d'un système expert (Fiannaca et al. 2013). Ces systèmes ont leur propre expertise basée sur la connaissance sur de nombreux aspects du problème : le domaine d'application, la définition des problèmes dans ce domaine et les compétences nécessaires pour les résoudre (Power, 2002). La connaissance du système est souvent codée comme un ensemble de règles par un ou plusieurs experts humains : ce type de systèmes sont souvent appelés systèmes experts basés sur des règles.

5.1.3 Systèmes d'information et aide à la décision basés sur le web

Les derniers développements dans le domaine des systèmes d'aide à la décision sont des systèmes basés sur le Web (Power 2007), y compris beaucoup de systèmes récemment développés pour la gestion de l'environnement. Comme l'Internet devient de plus en plus la principale source d'information, différents organisations et utilisateurs s'appuient sur le web pour les processus

décisionnels (Jarupathirun et al. 2007). Il existe plusieurs avantages dans le développement des systèmes d'information et d'aide à la décision basé sur le web, par exemple la réduction des barrières technologiques et les rend plus facile et moins coûteux (Power et al 2007).

5.2 Qu'est-ce que l'aide à décisions multicritères (ADM) ?

L'aide de décisions multicritères est à la fois une approche et un ensemble de techniques, dont le but est de fournir un ordre global d'options, de l'option la plus préférée à la moins préférée. C'est une façon de voir des problèmes complexes qui se caractérisent par un mélange d'objectifs (Yong-Chang, 2004). Ainsi, selon Belton et al. 2002, l'ADM est un terme générique pour décrire une collection d'approches formelles qui cherchent à prendre explicitement en compte plusieurs critères pour aider les individus ou les groupes à explorer les décisions. Les objectifs souhaitables et les critères sont couplés dans un cadre de décision bien donné (Herath, 2006)

5.3 Pourquoi l'aide à la décision multicritères (ADM) dans la gestion des déchets ?

L'aide à la décision multicritères (ADM) est souvent utilisée comme un outil d'évaluation écologique où plusieurs critères complexes environnementaux, économiques et sociaux sont pris en considération et où des compromis entre des objectifs et des critères concurrentiels sont également pris en considération. Cette combinaison permet aux décideurs de prendre tous les critères en considération et d'avoir un aperçu général sur les différents critères qui peuvent avoir une influence générale sur les résultats finaux (Babalola et al. 2015).

Dans la plupart des cas, les objectifs et les critères choisis par le décideur sont ouverts à l'analyse et au changement s'ils sont considérés comme inappropriés (Dodgson et al. 2009).

En outre, l'ADM présente l'option d'introduire des données qualitatives ainsi que des données quantitatives. Ceci est relativement utile dans de nombreux cas, car les décideurs sont souvent confrontés à des difficultés lorsqu'ils traitent des données qualitatives (Dodgson et al. 2009)

5.4 Différentes méthodes d'aide à la décision multicritères (ADM)

L'aide à la décision multicritères (ADM) implique le choix de la "meilleure" alternative à partir d'un ensemble d'alternatives présélectionnées décrites en termes de leurs attributs (Chung-Hsing, 2012). Il existe différentes méthodes d'aide à la décision multicritères, cependant, nous mettons l'accent dans cette partie seulement sur les méthodes les plus utilisées dans le domaine de la gestion des déchets.

5.4.1 TOPSIS

Cette méthode aide les décideurs à organiser les problèmes à résoudre, et à effectuer des analyses, des comparaisons et des classements des alternatives. Elle a été initialement présentée par Hwang et al. 1981. La méthode TOPSIS suppose que chaque critère tend vers une utilité croissante ou décroissante (Triantaphyllou, 2000, Garvey, 2008), Il est donc quasiment facile de définir les solutions idéales aussi bien positives que négatives. L'approche de distance euclidienne a été proposée pour évaluer la proximité relative des alternatives à la solution idéale. Ainsi, l'ordre de préférence des alternatives peut être obtenu par une série de comparaisons de ces distances relatives (Triantaphyllou, 2000). La distance entre le point idéal et chaque alternative peut être calculée en utilisant l'équation (5.1). En utilisant la même mesure de séparation, la distance entre le point idéal négatif et chaque alternative peut être déterminée en utilisant l'équation (5.2) (Malczewski, 1999)

$$S_{i+} = \left[\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_{+j})^2 \right]^{0.5} \quad \text{eq. (5.1)}$$

$$S_{i-} = \left[\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_{-j})^2 \right]^{0.5} \quad \text{eq. (5.2)}$$

Sachant que : V_{ij} est la valeur du critère normalisée pondérée de l'alternative $i^{\text{ème}}$ qui est calculée en multipliant la valeur du critère normalisé par le poids correspondant, et v_{+j} est la valeur idéale et v_{-j} est la valeur idéale négative pour le $j^{\text{ème}}$ critère (Malczewski, 1999).

La proximité relative du point idéal peut être calculée par eq. (5.3)

$$C_{i+} = \frac{S_{i-}}{S_{i+} + S_{i-}} \quad \text{eq. (5.3)}$$

Les opérations dans le cadre du processus TOPSIS comprennent : (i) la normalisation de la matrice de décision, (ii) les mesures de distance et (iii) les opérateurs d'agrégation (Shih et al. 2007)

5.4.2 ELECTRE

L'acronyme ELECTRE signifie élimination et choix traduisant la réalité. Cette méthode a été conçue par Bernard Roy en réponse aux lacunes des méthodes existantes de prise de décision. La méthode est basée sur le concept de classement par comparaisons appariées entre alternatives sur les critères appropriés. Une alternative est dite dominer les autres alternatives si un ou plusieurs critères sont remplis (par rapport au critère des autres alternatives) et il est égal aux critères restants. Les relations de classement sont entre deux alternatives (Roy, 1991 et Kusumadewi,

2006). ELECTRE a été utilisé dans les domaines de l'énergie, l'économie, l'environnement, la gestion de l'eau et des transports. Son principal avantage est qu'elle tient compte de l'incertitude et de l'imprécision. La méthode fait en sorte que les forces et faiblesses des alternatives ne soient pas directement identifiées, et que les résultats et impacts ne soient pas vérifiés (Konidari et al. 2007) ELECTRE est basé sur des relations de dépassement binaire dans deux grands concepts "Concordance" (cj) et "Discordance (dj) "

5.4.3 PROMETHEE

PROMETHEE est une autre méthode répandue utilisée pour résoudre les problèmes de prise de décision. Elle exige que les critères et les alternatives soient spécifiés à l'avance, elle est basée sur des comparaisons par paires des alternatives selon chaque critère, c'est-à-dire le décideur attribue des scores pour mesurer la performance des alternatives comparativement à chaque critère (Oliveiraa et al. 2015).

Ces scores sont organisés en une matrice de performance, qui est considéré comme le point de départ de la méthode. Les étapes suivantes englobent : (i) la pondération donnée à chaque critère et (ii) la définition de la fonction de préférence utilisée par le décideur lors de l'appréciation de la contribution des alternatives en fonction de chaque critère (Oliveira et al. 2015). PROMETHEE a été utilisée plusieurs fois dans la gestion de l'environnement, la gestion de l'eau et la gestion financière. PROMETHEE I a été utilisée pour le classement partiel des alternatives et PROMETHEE II pour le classement complet des alternatives.

5.4.4 L'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP)

L'analyse hiérarchique des procédés (AHP), introduite la première fois par le mathématicien Thomas Saaty en 1980. Elle permet à son utilisateur la comparaison et le choix entre différentes options préétablies. L'objectif de AHP est de faciliter la sélection d'un certain nombre d'options et de critères en formulant des priorités. Le principe de cette méthode est basé sur le concept de traduire le problème de hiérarchie en une série de matrices de comparaison par paires et d'obtenir l'information de préférence pour les critères et les alternatives. Le processus exige que les décideurs donnent des jugements sur l'importance relative de chaque critère, puis spécifie une préférence pour chaque décision alternative sur chaque critère. Le résultat de l'AHP est classé par ordre de priorité, indiquant l'alternative la plus préférée pour chacune des options de décision (Saaty, 1980. Saaty 1990). La principale caractéristique de la méthode AHP est l'utilisation de

comparaisons par paires, qui sont utilisées à la fois pour comparer les alternatives par rapport aux différents critères et pour estimer les poids des critères (Loken, 2007)

La première étape de AHP est de développer une représentation hiérarchique du problème en termes d'objectif global, de critères et de différentes alternatives. Le niveau supérieur de la hiérarchie représente l'objectif global et le niveau inférieur représente les alternatives de décision. Le niveau intermédiaire comprend des critères et des sous-critères si nécessaire, en fonction de la complexité du problème. La figure 5.1 illustre les différents niveaux d'une AHP.

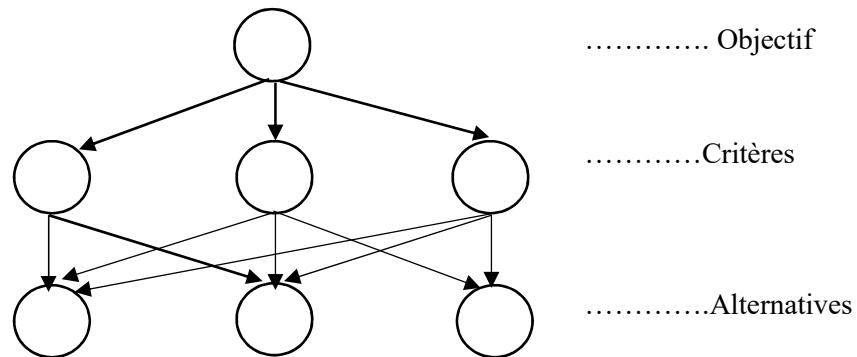


Figure 5.1. Illustration simple des différents niveaux de la méthode AHP

Saaty (1980) a développé une échelle (voir le Tableau 5.1) avec des valeurs de 1 à 9 pour évaluer les différents critères et alternatives. Le décideur doit indiquer sa préférence entre deux critères (par exemple, C1 et C2). Si le C1 est plus important que C2, une valeur de 5 est utilisée.

Tableau 5.1. Echelle de valeurs (Saaty, 1984)

Degrés d'importance	Définitions	Explications
1	Importance égale des deux éléments	Deux éléments contribuent autant à la propriété
3	Un élément est un peu plus important que l'autre	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un élément par rapport à un autre
5	Un élément est plus important que l'autre	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent fortement un élément par rapport à un autre
7	Un élément est beaucoup plus important que l'autre	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique
9	Un élément est absolument plus important que l'autre	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre, sont aussi convaincantes que possible

5.4.4.1 Matrice de comparaison

La matrice de comparaison est un concept important de la méthode AHP. En transcrivant les valeurs des évaluations du tableau 5.1, la matrice de comparaison est donnée par l'équation (5.4).

$$M = \begin{bmatrix} C_{11} & \dots & C_{1k} \\ C_{21} & \dots & C_{2k} \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{n1} & \dots & C_{nk} \end{bmatrix} \quad \text{eq. (5.4)}$$

La détermination des priorités des éléments de chaque matrice se fait par la résolution du problème de vecteurs propres et valeurs propres.

5.4.4.2 Calcul de l'Indice de Cohérence (IC)

L'indice de cohérence est le rapport entre la différence de la valeur propre λ_{\max} moins le nombre de comparaison, le tout est divisé sur le nombre de comparaison moins un.

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad \text{eq. (5.5)}$$

Tel que : λ_{\max} est la valeur propre maximale de la matrice de jugement et n est le nombre de comparaison (l'ordre de la matrice évaluée).

L'Indice de cohérence (IC) peut être comparé à celui de la matrice aléatoire proposé par Saaty. (Tableau 5.2).

5.4.4.3 Calcul de Ratio de Cohérence (RC)

Le Ratio de Cohérence (RC) est le rapport de l'indice de cohérence (IC) calculé sur la matrice correspondant aux jugements du décideur et de l'indice aléatoire (IA).

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad \text{eq. (5.6)}$$

Les différentes valeurs de l'indice aléatoire (IA) sont présentées par le tableau suivant :

Tableau 5.2. L'indice aléatoire proposé par Saaty (Saaty, 2001)

Ordre de la Matrice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L'indice aléatoire	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Toutes ces étapes vont être détaillées depuis que la méthode AHP a été choisie pour le développement du SIAD.

Le tableau 5.3 présente les avantages et les inconvénients des différentes méthodes d'aide à la décision multicritères.

Tableau 5.3. Avantages et inconvénients des différentes méthodes d'aide à la décision multicritères.

Méthodes	Avantages	Inconvénients
TOPSIS	A un processus simple ; Facile à utiliser et à programmer ;	Son utilisation de la distance euclidienne ne tient pas compte de la corrélation des attributs.
ELECTRE	Prend en compte l'incertitude.	Son processus et ses résultats peuvent être difficiles à expliquer en termes simples
ROMETHEE	Facile à utiliser ; N'exige pas l'hypothèse que les critères sont proportionnés	Ne fournit pas une méthode claire permettant d'attribuer des poids.
AHP	Ne comporte pas de mathématiques complexes. Facile à capturer et pratique.	Problèmes liés à l'interdépendance entre critères et alternatives.

5.5 Application de l'analyse Hiérarchique des procédés (AHP) pour l'optimisation de la sélection de l'endroit optimal pour mettre en place une unité de traitement (UT) des déchets des micro-ordinateurs

5.5.1 Méthodologie

Dans cette partie, nous prendrons en considération les aspects économiques et sociaux. L'aspect environnemental n'est pas négligé dans cette étude. Cependant, plusieurs études ont déjà prouvé que le démontage manuel des micro-ordinateurs est préférable d'un point de vue économique et environnemental. Gmünder, 2007 a mené une enquête sur l'évaluation de la profondeur optimale de démontage manuelle des micro-ordinateurs en Chine sur la base de calculs d'éco-efficacité. Durant son enquête, il a interviewé des experts de l'Europe et la Chine. Selon Jaco Huisman (UNU Bonn, TU Delft), le démontage manuel d'un PC est sans aucun doute éco-efficace.

Stephan van Ooyen (Taizhou Chiho Tiande) indique qu'en général, le démantèlement profond (démonter jusqu'à la dernière vis) est rentable aussi bien environnementalement qu'économiquement.

Selon Christian Hagelücken (Umicore) pour les composants contenant des fractions de métaux précieux, un démantèlement profond peut provoquer une perte de métaux rares et précieux. Par conséquent, les matériaux de haute qualité comme les cartes mères ne doivent pas être démantelés.

Donc, le Système d'information et d'aide à la décision développé dans le cadre de ce travail répond à la question de l'endroit optimal pour installer une unité de traitement des déchets des micro-ordinateurs.

Pour sélectionner un endroit optimal pour mettre en place une unité de traitement des déchets électroniques ; dans notre cas les déchets des micro-ordinateurs ; il faut une méthode qui appuie l'analyse des décisions pour évaluer plusieurs alternatives. Chacune de ces alternatives aura des avantages ou des déficiences. L'évaluation multicritères des sites alternatifs (site1, site2, site3, ...) pour l'emplacement d'une unité de traitement (UT) sur les attributs a été effectuée aussi objectivement que possible. Cette étude a tenté de sélectionner le meilleur endroit pour installer une UT de déchets des micro-ordinateurs basée sur les différentes wilayas de l'Algérie.

Dans le cas d'installer une unité de traitement des déchets des micro-ordinateurs, la préoccupation principale est d'augmenter le taux de collecte des déchets des micro-ordinateurs autant que possible, donc la superficie des wilayas ne peut pas influencer les résultats, car une grande superficie ne signifiait pas une grande population.

L'une des techniques de l'ADM est l'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP). C'est l'un des modèles complets d'aide à la décision en considérant les questions qualitatives et quantitatives.

Le principe de l'AHP est la simplification d'un problème complexe en l'organisant dans une hiérarchie. Ensuite, le niveau d'importance de chaque variable est donné subjectivement par la valeur numérique sur la signification de la variable par rapport à d'autres variables.

Le problème de prise de décision est divisé en une structure hiérarchique en plusieurs niveaux : Objectifs, critères, et alternatives. Les critères et les alternatives ont été évalués par la technique de la comparaison par paire selon l'échelle de 1 à 9 établie par Saaty, 1990. La figure 5.2 illustre les différentes étapes que nous avons suivi pour effectuer une analyse AHP.

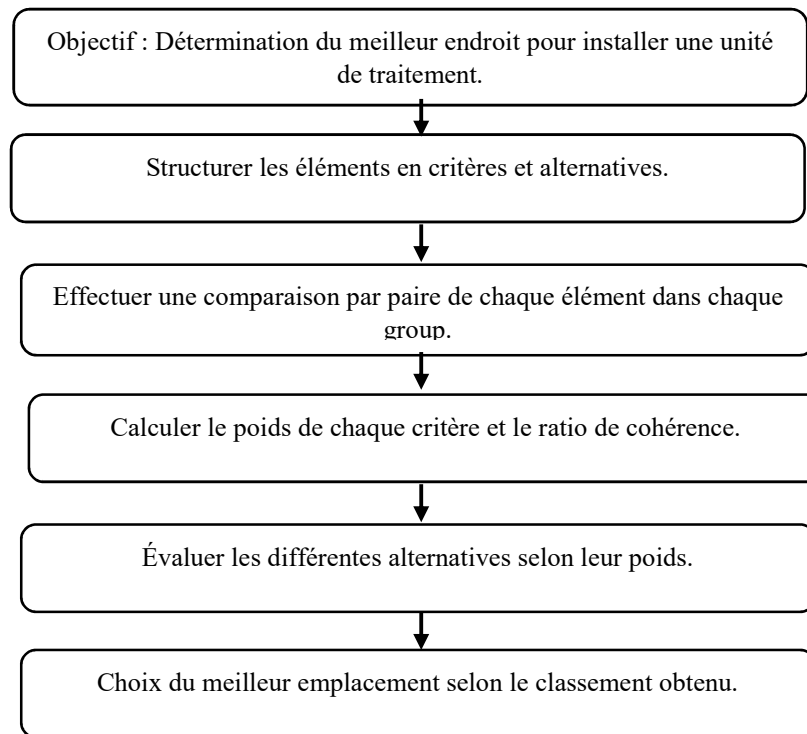


Figure 5.2. Méthodologie de la méthode AHP utilisée pour le système d'aide à la décision pour l'emplacement optimal des installations de traitement des PCs.

5.5.2 Les critères

Dans les études concernant l'emplacement des unités de traitement des déchets, la question la plus importante est de définir les critères influençant plus le choix. Cependant, dans cette étude, certains critères (c1 et c4) ont été sélectionnés selon Achillas et al. 2010 et le reste, en fonction des données disponibles en Algérie et selon des interviews avec des experts du domaine de la gestion des déchets qui ont donné les poids aux différents critères. Afin de déterminer le lieu optimal pour installer une unité de traitement des déchets des micro-ordinateurs nous utilisons les critères suivants :

Déchets générés par habitant (c1) : Comme nous avons calculé la quantité des micro-ordinateurs utilisée par habitant, la population dans chaque wilaya est utilisée pour déterminer le nombre des micro-ordinateurs utilisé par chaque wilaya. Par conséquent, la quantité des déchets des micro-ordinateurs générée par habitant pourrait être extraite pour chaque wilaya.

Capacité pour une collecte rationnelle des déchets (c2) : C'est un indicateur qui détermine la capacité de la wilaya à collecter les déchets électroniques, par exemple la présence des différentes entreprises de collecte des déchets, ainsi, si la wilaya possède des stratégies et schémas de collecte.

Distance par rapport à des unités existantes de traitements et de recyclage (c3) : Il existe en Algérie certaines unités de collecte et récupération des matériaux ferreux et non-ferreux (à Blida et Oran par exemple).

Population en chômage (c4) : comme indicateur de la main-d'œuvre disponible. L'unité de traitement devrait pouvoir créer des postes d'emploi.

La distance du port le plus proche (c5) : ce critère indique la disponibilité des infrastructures et détermine également le coût du transport.

On peut prendre aussi d'autres critères, par exemple le statut financier de chaque wilaya et sa capacité à financer un tel projet. Cependant, ce type de données n'est pas disponibles pour toutes les wilayas.

5.5.3 Alternatives

Initialement, toutes les wilayas sont considérées comme des alternatives pour le développement d'une unité de traitement des micro-ordinateurs. Toutefois, les deux critères les plus importants sont la quantité de déchets générés dans chaque wilaya et la distance du port le plus proche depuis que certains composants doivent être traités dans des unités ultramodernes. Dans cette étude, nous comparons les cinq grandes wilayas du pays d'un point de vue de la population.

En raison de diverses unités appliquées à la valeur de chaque critère, il est nécessaire de normaliser cette valeur en valeur comparable entre les critères individuels.

Les valeurs quantifiées de tous les critères (c) pour tous les emplacements alternatifs (A) sont normalisées dans une échelle de 0 à 100, comme suit

$$N_c = \frac{V_c(A) - V_c^{min}}{V_c^{max} - V_c^{min}} * 100 \quad \text{eq. (5.7)}$$

Où $V_c(A)$ est la valeur du critère c pour l'alternative A . V_c^{min} est la valeur minimale du critère c . V_c^{max} est la valeur maximale du critère c .

5.5.4 Conception de la base de données du SIAD

Les informations recueillies ont été soigneusement analysées pour construire une base de données efficace. Le processus de normalisation a été appliqué dans la conception de la base de données pour réduire la redondance des données et mettre à jour les anomalies. La figure 5.3 présente la conception de la base de données et le module d'analyse des décisions.

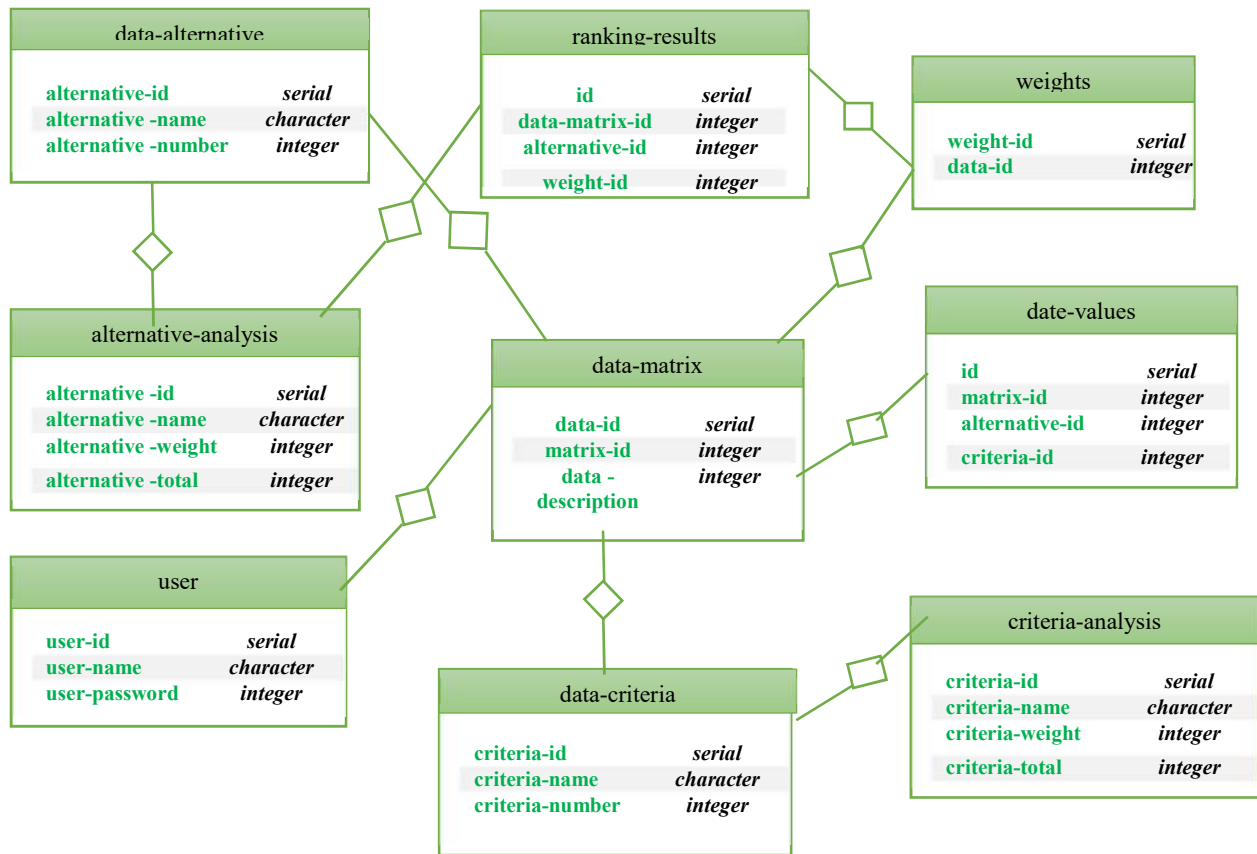


Figure 5.3. Conception de la base de données du système.

5.5.5 Conception de l'architecture du système

Étant donné que le système était basé sur le Web, il suivait l'architecture à trois niveaux, suivie de la conception d'interface utilisateur appropriée (figure 5.4) pour répondre aux exigences du système. Le premier niveau ou bien couche (c'est-à-dire le niveau client) contient la présentation et diffuse toutes ses demandes spécifiques au niveau intermédiaire. Le niveau intermédiaire s'exécute sur le serveur d'applications. Le dernier niveau est la phase de données qui permet d'optimiser l'accès général aux applications et la gestion du développement.

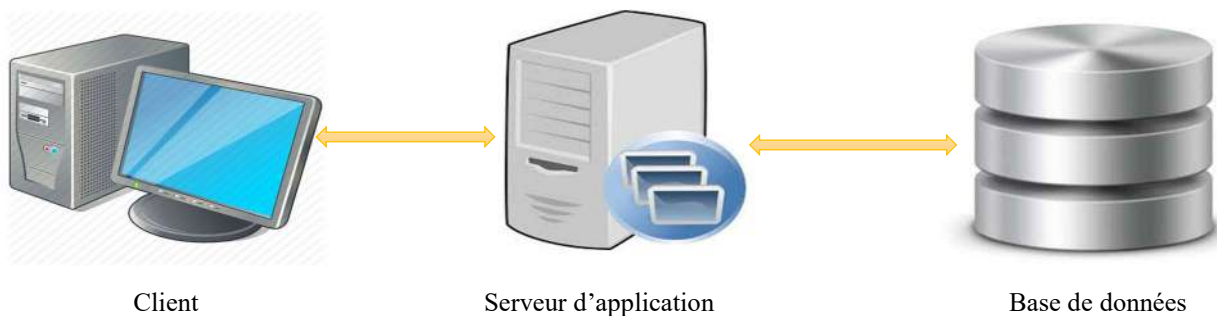


Figure 5.4. Architecture à trois couches (niveaux)

5.5.6 Conception d'interface utilisateur

L'interface utilisateur du système a été conçue pour être conviviale et d'utilisation facile. Les boutons, les icônes, les menus et les tableaux ont été utilisés pour l'interaction de l'utilisateur et les résultats du système.

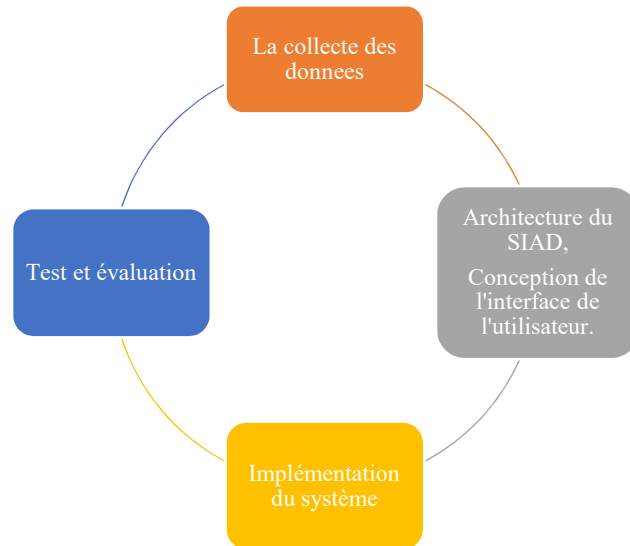


Figure 5.5. Cycle de vie du développement du SIAD

Le niveau de présentation fournit à l'utilisateur une interface graphique, qui est accessible via les navigateurs de nombreux périphériques, et permet aux utilisateurs d'extraire des informations sur la durée de vie des différents micro-ordinateurs et écrans, ainsi que sur la quantité des déchets des micro-ordinateurs générés par habitant durant la période 2000 à 2030 et prendre une décision sur l'endroit optimal pour mettre en place une unité de traitement.

La figure 5. 6 présente le plan du SIAD basé sur le web.

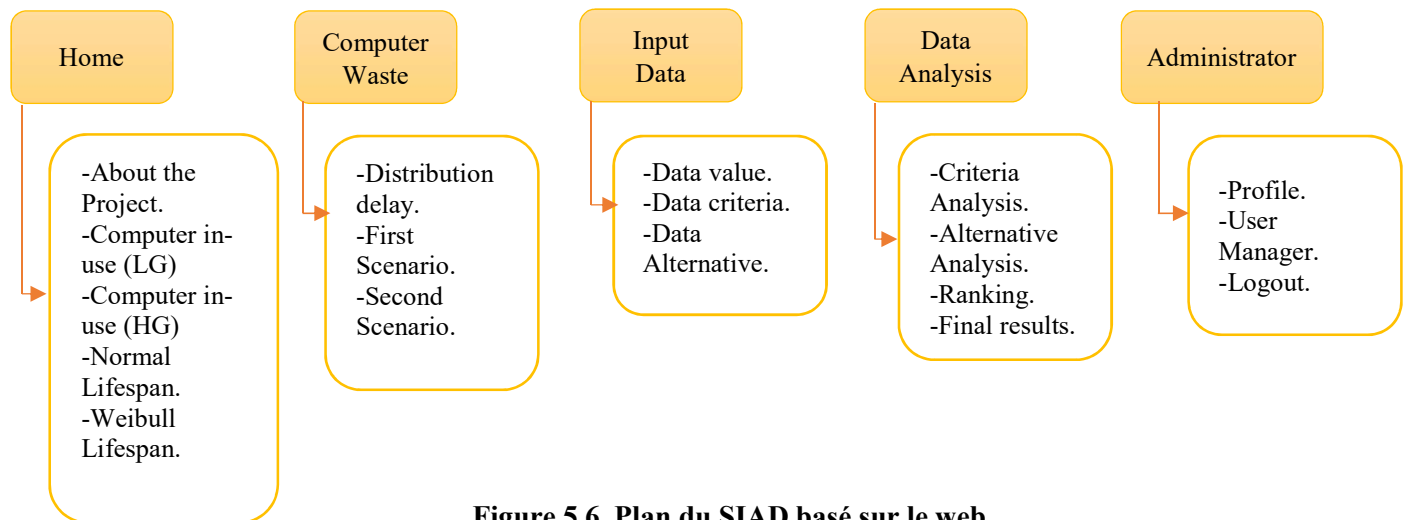


Figure 5.6. Plan du SIAD basé sur le web

5.5.7 Mise en place du système

Puisque le SIAD développé est une application basée sur le Web, il est nécessaire que nous utilisions un serveur Web. Afin d'enregistrer et de récupérer des données, nous avons également besoin d'un serveur de base de données et enfin, nous avons besoin d'un serveur pour implémenter l'environnement. Nous avons utilisé Apache XAMPP comme notre serveur web pour la mise en œuvre et l'essai de notre SIAD.

MySQL fait partie de XAMPP qui est utilisé comme base de données afin d'enregistrer et de récupérer des données. Enfin, il est important de mentionner que le langage de programmation utilisé côté serveur est PHP, ce qui signifie que notre SIAD est capable de fonctionner sous les serveurs Apache et il n'est pas limité à être utilisé uniquement dans XAMPP.

Pour une meilleure présentation web, nous avons utilisé Bootstrap (Shenoy et al. 2014) qui est un cadre applicatif (Framework), JavaScript et HTML. Pour la présentation des charts, nous avons utilisé la bibliothèque Highcharts (www.highcharts.com). C'est un outil simple qui permet d'ajouter des graphiques interactifs à notre application web.

Les figures de 5.7 à 5.10 présentent quelques différentes pages du SIAD. L'annexe 6 présente diverses prises de vue du système d'information et d'aide à la décision.

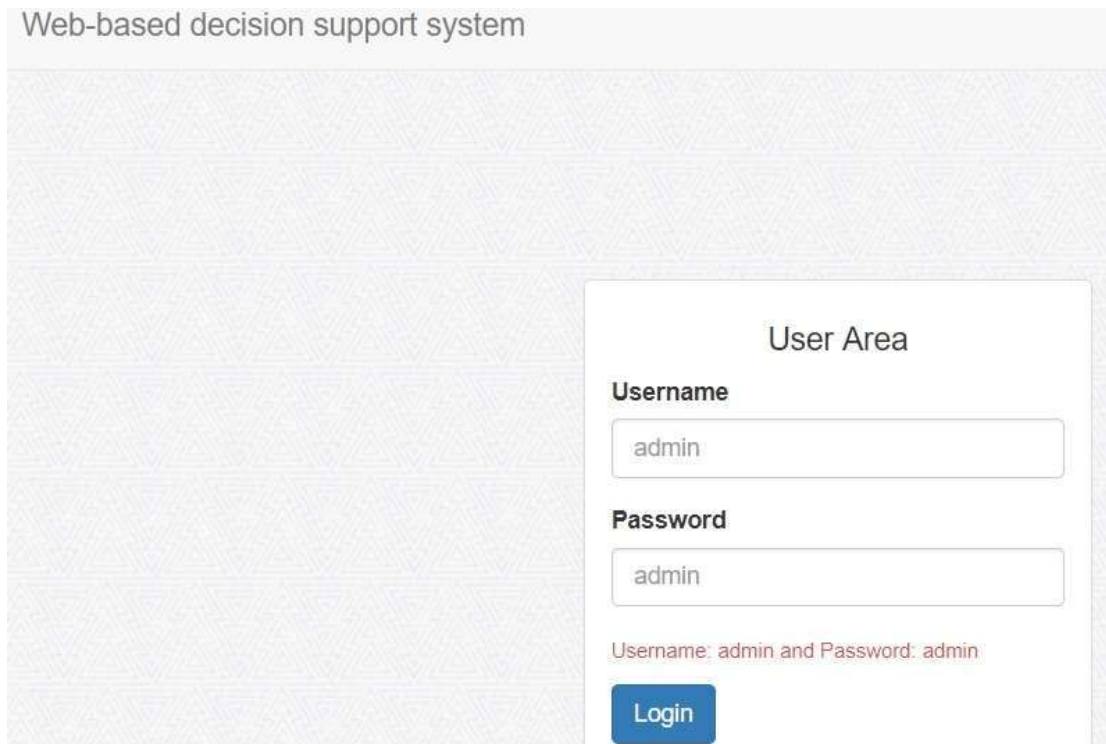


Figure 5.7 Page principale de connexion



WELCOME TO DSS FOR THE OPTIMAL LOCATION FOR WEEE TREATMENT

Electrical and electronic waste is considered as a set of electrical equipments that have reached their end-of life, thus, electronic waste includes consumer products such as refrigerators, washing computers as well as equipments used in energy production systems like solar modules, converters and regulators.

Algeria produces and imports electronic equipments that end up as waste. Since we do not currently have storage and recycling facilities, electronic waste is either thrown away in nature or stored, raising a real challenge in comparison to many other types of waste due to its contents which is characterized by the existence of some toxic materials.

Algeria has achieved a considerable progress in waste management over the last decade. Nevertheless, the issue of e-waste has not been addressed by the public authorities and the fate of e-waste is due to limited infrastructure and access to technology and investment. The situation regarding e-waste is therefore concerning, but not yet alarming. The general objective of this research is to solve the problem of e-waste, through a development of a decision support system, this one would aid the global effort for monitoring of e-waste and policy implementation of e-waste management. This document points:

Figure 5.8 Page d'accueil.

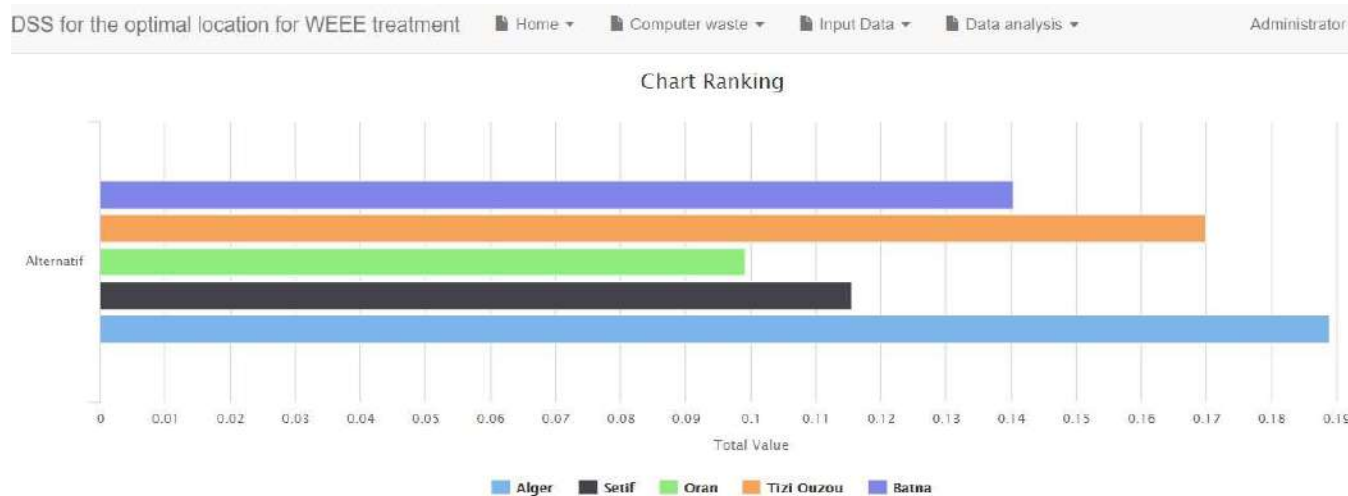


Figure 5.9. Résultats d'une comparaison aléatoire.

Computer in-use (Low growth rate)

In this study, the term 'in-use stock' refers to the number of computers that households and business possess.

The study revealed that the amount of stock-in-use in 2010 is approximately 3,118,508 PCs, this results is close to the data pub

Following figures show the forecast computer per capita rates. The evolution of the acquisition of computer per capita in Algeria 2030 there would be a maximum value of approximately 0.128 PC per capita using the logistic model and 0.137 PC per capita f

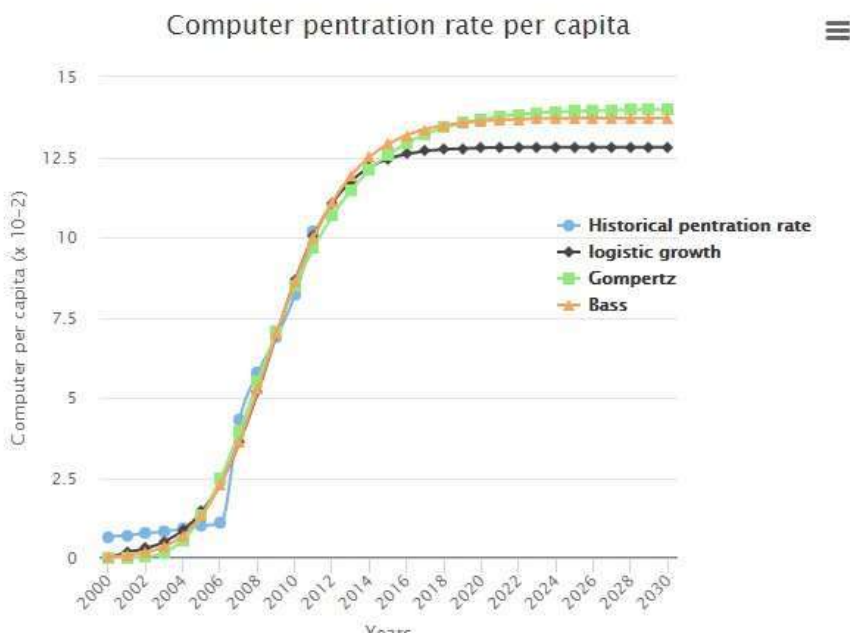


Figure 5.10. Le taux des ordinateurs utilisés par habitant par an (Faible croissance)

5.6 Résultats et discussion

Les données recueillies et la méthodologie mentionnée ci-dessus ont été appliquées afin de déterminer l'emplacement optimal pour mettre en place une unité de traitement des micro-ordinateurs.

Le système d'information et d'aide à la décision présente à ses utilisateurs des informations sur la quantité des micro-ordinateurs utilisés par habitant, par conséquent, l'utilisateur peut extraire le nombre des micro-ordinateurs utilisés dans chaque Wilaya de l'an 2000 jusqu'à 2030.

La prise de décision sur l'emplacement optimal pour le développement d'une unité de traitement des déchets électroniques en Algérie constitue une question d'importance critique, tant pour la viabilité de l'investissement lui-même et que pour l'efficacité du système de collecte des déchets électroniques.

Les résultats finaux (de la quatrième itération) de la comparaison entre les différents critères et alternatives sont présentés dans les tableaux suivants (5.4 et 5.5).

Tableau 5.4 Matrice des critères de décision (résultat de la quatrième itération)

<i>Critères</i>	<i>Vecteur propre normalisé</i>	<i>Lambda</i>	<i>IC</i>	<i>RC=IC/IR</i>
C1	0.222106370	7.243394538	0.040565756	0.030731634
C2	0.316477907			
C3	0.081816494			
C4	0.158190777			
C5	0.052339770			

Comme $RC \leq 0,1$ le rapport de cohérence de la matrice est acceptable.

Tableau 5.5 : Matrice des alternatives présentant le vecteur propre de priorité.

	Alger	Oran	Sétif	Tizi Ouzou	Batna
C1	0098670408	0,044275734	0,044275734	0,017442248	0,017442248
C2	0,103132152	0,093646372	0,070537636	0,027974348	0,021187399
C3	0,031326629	0,031326629	0,005537848	0,007360061	0,006265326
C4	0,049250988	0,049250988	0,027771931	0,013709462	0,018207409
C5	0,019263365	0,019263365	0,005295685	0,005295685	0,00322167
Vecteur propre	0,301643542	0,237763087	0,153418833	0,071781805	0,066324051

Les résultats finaux de l'analyse, tels que présentées dans les tableaux 5.4, 5.5 et la figure 5.11, indiquent que la capitale Alger est l'option la plus préférable pour mettre en place une unité de traitement des déchets des micro-ordinateurs, par contre la ville de Batna est le choix le moins préférable.

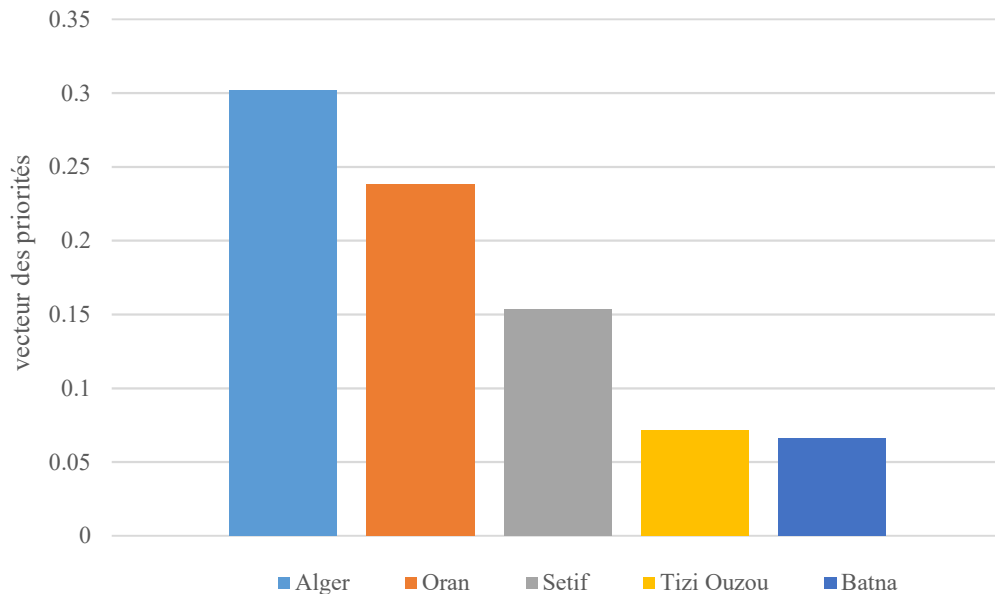


Figure 5.11. Les résultats finaux présentant les villes préférables pour la mise en place d'une unité de traitement des déchets des micro-ordinateurs.

En ce qui concerne l'emplacement optimal du site, les valeurs des critères : Déchets générés par habitant (c1), Capacité pour une collecte rationnelle des déchets (c2), et la Population en chômage (c4) doivent être maximisées, par contre le reste des valeurs doivent être minimisées.

Le critère « Déchets générés par habitant (c1) » a favorisé Alger par rapport au deuxième site optimal (Oran), vu que la population en 2016 dans la wilaya d'Alger est estimée à 3.460.110 habitants et qu'à la wilaya d'Oran elle est de 1.683.744 habitants (notre prévision à partir du recensement de l'année 2008). Donc, les déchets générés à Alger devraient être plus élevés que ceux générés à Oran.

L'existence des unités de traitement des déchets (métaux ferreux et non ferreux à Oran et Blida, Aïn Defla et une unité de collecte des déchets y compris les déchets électroniques à Alger) dans ces régions a favorisé la capitale Alger et Oran par rapport aux autres villes alternatives.

La population en chômage (c4) n'avait pas une grande influence, depuis que les taux publiés par l'Agence Nationale de Développement de l'Investissement (ANDI) ne sont pas d'un grand écart, et varient entre 7% et 9 % sauf pour la wilaya de Tizi Ouzou où le taux de chômage est relativement élevé et estimé de à 18% pour l'an 2013.

L'avantage de notre SIAD est de permettre à son utilisateur d'ajouter et effacer des critères et des alternatives, par exemple si le décideur veut limiter le choix du site optimal dans la région de l'Est du pays ou bien l'Ouest il a la possibilité d'ajouter et ou changer des villes, ainsi que pour les critères. De même, si l'utilisateur veut aborder d'autres critères il a la possibilité d'ajouter ou supprimer des critères (Figure 5.12)

DSS for the optimal location for WEEE treatment | Home | Computer waste | Input Data | Data analysis | Administrator

Data criteria

Show 10 entries

Search: Modifier

ID criteria	Name criteria	Weight criteria	Action
C1	Local population	<input type="text"/>	Modifier Supprimer
C2	The capacity to collect e-waste	<input type="text"/>	Modifier Supprimer
C3	Distance from existing treatment centers	<input type="text"/>	Modifier Supprimer
C4	Financial status of the wilaya	<input type="text"/>	Modifier Supprimer
C5	Distance from the nearest port	<input type="text"/>	Modifier Supprimer
C6	Unemployed population	<input type="text"/>	Modifier Supprimer
C7	Land value	<input type="text"/>	Modifier Supprimer
ID criteria	Name criteria	Weight criteria	Action

Showing 1 to 7 of 7 entries

Previous 1 Next

Figure 5.12. Différents critères et leur poids relatifs

Dans cette étude, nous avons développé un système d'information et d'aide à la décision basé sur le Web pour définir l'endroit optimal pour mettre en place une unité de traitement des déchets des micro-ordinateurs. XAMPP était la plate-forme de développement de système utilisée, Apache en tant que serveur web, MySQL pour le système de gestion de base de données et PHP comme langue de script pour le serveur. HTML, CSS et Bootstrap ont été utilisés dans la création des formes, des menus et d'autres éléments de l'interface utilisateur.

En outre, comme le système est basé sur le Web, une fois qu'il est déployé sur un serveur Web public, ses services peuvent être accessibles au grand public, à tout moment étant donné qu'il existe une connexion Internet.

La prise de décision sur l'emplacement optimal pour le développement d'une unité de traitement en Algérie constitue une question d'importance critique, tant pour la viabilité de l'investissement lui-même que pour l'efficacité du système de collecte.

L'objectif de cette partie est de développer un modèle qui répond à des questions quantitatives et qualitatives pour déterminer l'endroit adéquat pour installer l'unité de traitement. Le cadre méthodologique présenté fournit aux décideurs un outil facile à utiliser qui pourrait être utilisé soit par des investisseurs privés, soit par le secteur public.

Le système d'information et d'aide à la décision proposé peut être utilisé, avec des modifications nécessaires, afin d'aider des décideurs dans leurs jugements vers la gestion d'autres flux de déchets (par exemple, télévisions, téléphones portables, etc.)

6 Conclusion

Dans ce travail de recherche nous avons développé un système d'information et d'aide à la décision pour élaborer un programme de recyclage des déchets électroniques en Algérie.

Le recyclage des équipements électroniques en leur fin de vie est un problème complexe qui nécessite de mettre en place une stratégie qui prend en considération des différents facteurs environnementaux, sociaux et économiques. Dans ce travail de recherche, nous avons présenté un système d'information et d'aide à la décision qui fournit des informations sur les quantités des micro-ordinateurs générés en Algérie, et aidera le décideur à trouver l'emplacement optimal pour mettre en place une unité de traitement des déchets des micro-ordinateurs.

Sur la base des données présentées dans les différents points traités dans cette thèse, les conclusions suivantes ont été faites.

6.1 Evaluation des différentes quantités de déchets des micro-ordinateurs en Algérie.

Dans la première partie de cette étude, deux méthodes différentes ont été utilisées pour estimer les déchets des micro-ordinateurs et écrans en Algérie. Les résultats devraient être pris en considérant que la production locale n'était pas incluse. Si tous les micro-ordinateurs produits localement ainsi que les autres équipements électriques et électroniques ont été incorporés, la quantité totale de déchets électroniques pourrait être notablement supérieure à la quantité estimée par cette première partie de l'étude.

Les ensembles de données sur les ventes et la durée de vie des produits sont des paramètres essentiels pour une évaluation efficace de la quantité des déchets.

L'une des principales limites de cette première partie de l'étude était l'incapacité d'obtenir un meilleur taux de réponse des questionnaires remplis, ce dernier était relativement faible.

Les résultats de cette première partie de l'étude soulignent la demande de recherches supplémentaires sur l'évaluation des déchets électroniques pour acquérir plus de données sur le marché (les ventes) et la durée de vie des EEE afin de définir des stratégies pour collecter différents types d'appareils électroniques.

L'absence de ces de ces données, nous a poussé à développer une méthodologie pour évaluer et surveiller les déchets des micro-ordinateurs en Algérie, présentée dans la deuxième partie du troisième point de cette thèse (Modélisation des déchets électroniques en Algérie). L'objectif de

cette méthodologie est de combler le fossé entre le manque de disponibilité et de fiabilité des données et la nécessité d'évaluer et de surveiller les déchets électroniques. Elle présente la quantité des micro-ordinateurs en cours d'utilisation par habitant et par conséquent les déchets des micro-ordinateur générés par habitant pour la période 2000 à 2030.

On peut conclure que les modèles de prévision existants peuvent décrire le processus de diffusion de la pénétration des micro-ordinateurs dans la société algérienne. Le modèle logistique est considéré comme le plus précis en fonction des valeurs les plus faibles des erreurs pour le premier scénario. Néanmoins, pour le cas d'un taux de croissance élevé (deuxième scénario), le modèle Bass fournit des résultats plus précis.

Les données sur la consommation dans les ménages et le secteur industriel doivent être complètes afin d'assurer la fiabilité de l'évaluation de la production de déchets électroniques. La disponibilité de ces données fournira une plate-forme pour une politique efficace en matière de la gestion des déchets électroniques en Algérie.

6.2 Etude de la faisabilité économique de mettre en place une unité de traitement des déchets des micro-ordinateurs en Algérie

La mise en place d'une unité de traitement des micro-ordinateurs est rentable à partir de la troisième année. La mise en place de cette unité est influencée directement par la quantité des micro-ordinateurs entrant l'unité et la composition de ce flux (par exemple le nombre des écrans CRT par rapport aux micro-ordinateurs portables)

Cette unité est influencée aussi par d'autres facteurs externes, tel que les changements dans les conditions du marché (Ex : Prix des matériaux), les décisions politiques (Ex : Frais de recyclage et taxes) et les coûts d'achats des équipements en leur fin de vie.

Les coûts du transport et d'élimination d'écrans CRT et FDP peuvent être élevés que ceux utilisés dans cette étude. Il conviendrait de mettre l'accent sur l'identification des options écologiquement rationnelles pour le recyclage ou l'élimination du verre CRT en Algérie.

3.2 Développement d'un système d'information et d'aide à la décision pour gérer les déchets des micro-ordinateurs en Algérie

Cette partie a présenté un système d'information et d'aide à la décision développé pour assister son utilisateur à identifier l'emplacement optimal d'une unité de traitement des déchets des micro-

ordinateurs. Le cadre méthodologique présenté fournit aux décideurs un outil facile à utiliser qui pourrait être utilisé soit par des investisseurs privés ou publiques pour gérer les déchets des micro-ordinateurs. La méthodologie est mise en œuvre pour le cas des déchets des micro-ordinateurs en Algérie.

Toutefois, la procédure pourrait être facilement adoptée (avec certaines modifications et des ajustements) afin de résoudre des problèmes similaires (par exemple : le développement des centres de collecte et de tri des déchets) dans d'autres pays.

De même, ce système d'information et d'aide à la décision peut être utilisé pour d'autres types de déchets électriques et électroniques (télévisions, réfrigérateurs et machine à laver, etc.) ou bien d'autres types des déchets (industriels, toxiques, solides, etc.).

REFERENCES

1. Introduction

Aissaoui, S. and Rochat, D., 2008. Technical Report on the Assessment of e-waste Management in Morocco (Casablanca: Moroccan Cleaner Production Centre & Empa).

Babu, B., Parandu, A., Basha, C., 2007. Electrical and electronic waste: a global environmental problem. *Waste Management & Research*. Vol (25), pp: 307-318.

Baldé, C.P., Wang, F., Kuehr, R., & Huisman, J. 2015. The global e-waste monitor — 2014. Bonn, Germany: United Nations University.

Bohr, P. 2007. The Economics of Electronics Recycling New Approaches to Extended Producer Responsibility. Thèse de doctorat. Université technique de Berlin.

Centre de recherche en économie appliquée pour le développement (CREAD), 2015. Disponible en ligne sur: <http://www.cread.dz/> (consulté le 25 mai 2015).

Degreif, S., Mehlhart, G., Merz, C., Allam, H., Imam, S., Soliman, F., Bushra, M., 2014. Global Circular Economy of Strategic Metals – the Best-of-Two-Worlds Approach (Bo2 W-Egypt).

Disponible en ligne à: http://www.mate.gov.dz/index.php?option=com_content&task=view&id=872. (Consulté le 25 mars 2015).

Fraige, F.Y., Al-khatib, L.A., Alnawafleh, H.M., Dweirj, M.K. and Langston, P.A., 2012. Waste electric and electronic equipment in Jordan: Willingness and generation rates. *Journal of Environmental Planning and Management*, Vol (55), pp: 161–175.

Hamouda, K; Adjroudi, R; Rotter, V.S; Wang, F. 2017. Methodology for WEEE assessment in Algeria. *International Journal of Environmental Studies*.

Ikhlayel, M. and Tasaki, T., 2015. A Jordanian-MENA region WEEE input-output and material flow analysis case study: Examining different estimation methods. Présenté lors du Symposium international sur la gestion des déchets et l'enfouissement des déchets. Cagliari, Italie, 5-9 octobre 2015.

KPMG Algérie, 2015. Guide Investir en Algérie. Disponible en ligne à l'adresse : <https://home.kpmg.com/dz/fr/home.html> (Consulté le 22 juin 2015).

L'Institut méditerranéen de la prospective économique de la Méditerranée (IPEMED), 2015, Technologies de l'information au Maroc, en Algérie et en Tunisie : (Vers une TIC euromaghrébine).

MADAR, 2012. Arab ICT Use and Social Networks Adoption Report, 2012, (Dubai: Masdar Research & Development).

Ministère algérien de l'environnement et de l'aménagement du territoire (MATE), 2015.

Salehabadi, D. 2013. Transboundary Movements of Discarded Electrical and Electronic Equipment. Solving the E-Waste Problem (StEP) Green Paper. Université des Nations Unies, Bonn, Allemagne.

Schluep, M., et al., 2009. Recycling e from e-Waste to Re- sources, Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies. Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), Paris, France.

Seitz, J., 2014. Analysis of existing e-waste practices in MENA countries. Réseau régional d'échange d'informations et d'expertise sur les déchets solides dans les pays du Mashreq et du Maghreb, à Tunis (SWEEP-Net).

Stevens, A. 2012. The present recast of the WEEE Directive. Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook. V. Goodship and A. Stevens. Philadelphie, États-Unis, Woodhead Publishing Limited.

Usinenouvelle, 2015, <http://www.usinenouvelle.com/article/maroc-le-marche-des-services-itva-bondir-de-29-d-ici-a-2017-selon-idc.N310244>. (consulté le 10 mars 2015).

Wang F., 2014. “E-waste: collect more, treat better. Tracking take-back system performance for eco-efficient electronics recycling”. Thèse de doctorat. Université de technologie de Delft.

2. Etat de l'art

Achillas Ch, Vlachokostas Ch, Moussiopoulos N, 2010. Decision support system for the optimal location of electrical and electronic waste treatment plants: A case study in Greece. Waste Management. Vol 30 (5), pp: 870–879.

Aragonés-Beltrán P, Pastor-Ferrando JP, García-García F, et al. 2010. An analytic network process approach for siting a municipal solid waste plant in the Metropolitan Area of Valencia (Spain). Journal of Environmental Management. Vol (91), pp: 1071–1086.

BAN 2002. Basel Action Network and Silicon Valley Toxics Coalition (SVTC). “Exporting Harm: The High-Tech Trashing of Asia”

Bin Lu, Jingru Liu, Jianxin Yang, Bo Li 2015. The environmental impact of technology innovation on WEEE management by Multi-Life Cycle Assessment. Journal of Cleaner Production. Vol (89), pp: 148–158.

Borregaard, J., 2013. “Experiences from WEEE collection trials in Copenhagen”. In: Presentation at ISWA Beacon Conference, Düsseldorf.

Brunner P. H., Rechberger H. 2003. Practical Handbook of Material Flow Analysis. CRC Press, ISBN: 978-1-56670-604-9

C.P. Balde, R. Kuehr, K. Blumenthal, S. Fondeur Gill, M. Kern, P. Micheli, E. Magpantay, Huisman 2015, E-waste statistics: Guidelines on classifications, reporting and indicators. United Nations University, IAS - SCYCLE, Bonn, Germany. 2015

C.P. Baldé, Wang, F., Kuehr, R., Huisman, J. 2015. “The global e-waste monitor – 2014”, United Nations University, IAS – SCYCLE, Bonn, Germany.

Chancerel, 2009. Substance flow analysis of the recycling of small waste electrical and electronic equipment. An assessment of the recovery of gold and palladium". Université de technologie de Berlin. Thèse de doctorat.

COM 2008. Commission of the European Communities (COM). Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on waste electrical and electronic equipment (WEEE). COM (2008) 810/4. Brussels: Commission of the European Communities, 2008.

Cui, J.; Forssberg, E. 2003. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: A review. *Journal of Hazardous Materials (B99)*, pp:243–263

DCLG, 2009. Multi-criteria analysis: A Manual. Department for Communities and Local Government London.

Detmar, W. 2010. Information systems innovation for environmental sustainability. *MIS Quarterly* Vol. (34). No. 1, pp. 1-21.

Directive 2002/96/CE du parlement européen et du conseil du 27 janvier 2003 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE).

Dwivedy et al. 2010. Estimation of future outflows of e-waste in India. *Waste Management*. Vol 30 (3), pp: 483-491.

EERA 2008. European Electronics Recyclers Association. Why do we need change? Proceedings of the 4th Annual Conference Electrical and Electronic Waste. Brussels, 1-2 October 2008.

El-Fadal, M. and Abou Najm, M., 2002. Economic and Environmental Optimization of Integrated Solid Waste Systems, *Journal of Solid Waste Technology and Management* November 2002, Vol. (28), No. 4, pp 222-232.

Eriksson, O., Olofsson, E. and Ekvall, T., 2003. How model-based systems analysis can be improved for waste Management Planning, *Waste Management and Research*, Vol (21),pp: 488-500.

F. Ibrahim, D. Adie, A. Giwa, S. Abdullahi and C. Okuofu, 2013. Material Flow Analysis of Electronic Wastes (e-Wastes) in Lagos, Nigeria," *Journal of Environmental Protection*, Vol. (4) No. 9. pp: 1011-1017.

Finnveden, G., Björklund, A., Moberg, Å. Ekvall, T., 2007. Environmental and economic assessment methods for waste management decision-support: possibilities and limitations. *Waste Management & Research*. Vol (25), pp: 263-269.

Finnveden, G., Björklund, A., Moberg, Å., Ekvall, T., 2007. Environmental and economic assessment methods for waste management decision-support: possibilities and limitations. *Waste Management & Research*. Vol (25), pp: 263-269.

Florin-Gheorghe Filip, Ioana Moisil. 2010. Decision Support for Environmental Management. *Environmental Systems - Vol. II*

G. Rodriguez-Garcia, M. Weil. 2016. Chapter 7 – Life Cycle Assessment in WEEE Recycling. *WEEE Recycling Research, Development, and Policies*, pp: 177–207

GFK 2007. Ownership, disposal and collection of white, brown and gray goods.

Hagelüken, C. 2006. Improving metal returns and eco-efficiency in electronics recycling – a holistic approach for interface optimisation between pre-processing and integrated metals smelting and refining. Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics & the Environment, San Francisco, 8-11 May 2006, pp: 218-223

<http://betterevaluation.org/en/evaluation-options/CostEffectivenessAnalysis>. Consulté le: 15/10/2016.

Huisman et al. 2012. The Dutch WEEE Flows. Bonn, Germany, United Nations University, ISPS CYCLE.

Huisman et al., 2007. 2008 Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). United Nations University, Bonn, Germany, 2007

Ilke Bereketli, Mujde Erol Genevois, Y. Esra Albayrak , Melisa Ozyol. 2011. WEEE treatment strategies' evaluation using fuzzy LINMAP method. Expert Systems with Applications. Vol (38), pp: 71–79

ISO 14044, 2006. Environmental Management, Life Cycle Assessment, Requirements and Guidelines. International Organization for Standardization, Geneva (Switzerland).

K. Sasaki. 2004. Examining the Waste from Electrical and Electronic Equipment Management Systems in Japan and Sweden Lund University Master's Program in Environmental Science, Lund, Sweden, pp. 30

Kai jin. 2002. A multi objective decision-making model for materials management of end of life electronic products. Thèse de doctorat. Université de Texas de Technologie.

Kang & Schoenung 2005. Electronic waste recycling a review of U.S. infrastructure and technology options. Resource Conservation and Recycling. Vol 45 (4), pp: 368–400

Kang et al. 2006. "Estimation of future outflows and infrastructure needed to recycle personal computer systems in California." Journal of Hazardous Materials. Vol 137(2), pp: 1165-1174.

Katharina Kummer Peiry 2012. Convention de Bâle sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets dangereux et de leur élimination. United Nations Audiovisual Library of International Law.

Laissaou, S. & Roachat, D. 2008. Technical report on the assessment of e-waste management in Morocco. Moroccan Cleaner Production Center & Empa.

Lee J.-c., Song H.T., Yoo J.-M. 2007. Present status of the recycling of waste electrical and electronic equipment in Korea. Resources, Conservation and Recycling. Vol (50), pp. 380–397

Li, Y., 2007. An intelligent, knowledge-based multiple criteria decision-making advisor for systems design. Thèse de doctorat. Institut de technologie. Géorgie

Milke M. 2006. The Alchemist's dream resource. Waste Management. Vol (26), pp: 1203-1204.

- Mosadeghi, R., Tomlinson R., Mirfenderesk, H., and Warnken, J., 2009. Coastal Management Issues in Queensland and Application of the Multi-Criteria Decision Making Techniques. *Journal of coastal research*, SI56, pp:1252-1256.
- OECD, 2001. Organization for Economic Co-operation and Development. “Extended Producer Responsibility: A Guidance Manual for Governments”. *Environment & Sustainable Development Vol (5)*, pp: 1-159
- Olakitan Ogungbuy, 2012. E-Waste Country Assessment Nigeria. E-Waste Africa project of the Secretariat of the Basel Convention.
- Queiruga, D., Walther, G., Gonzalez-Benito, J., Spengler, T., 2008. Evaluation of sites for the location of WEEE recycling plants in Spain. *Waste Management. Vol (28)*, pp: 181– 190.
- Ramzy Kahhat, Eric Williams. 2012. Materials flow analysis of e-waste: Domestic flows and exports of used computers from the United States. *Resources, Conservation and Recycling. Vol (67)*, pp: 67–74
- Rotter et al., 2008. “Practical aspects of individual producers’ responsibility – lessons to be learned from experiences in Germany”. *Proceedings of Electronics Goes Green 2008+*. Berlin, 7-10 September 2008, pp: 47-52
- Rotter et al., 2009. *Implementing Individual Producer Responsibility (IPR) under the European WEEE Directive-Experiences in Germany*
- Rousis K. K. Moustakas, S. Malamis , A. Papadopoulos, M. Loizidou. 2008. Multi-criteria analysis for the determination of the best WEEE management scenario in Cyprus. *Waste Management. Vol (28)*, pp: 1941–1954
- Saaty, T.L. 1980. *The Analytic Hierarchy Process*, New York: McGraw Hill. Pittsburgh: RWS Publications.
- Salhofer S. , Steuer B. , Ramusch R.,Beigl P. 2016. WEEE management in Europe and China – a comparison. *Journal of Waste Management. Vol (57)*, pp: 27-35.
- Salhofer, S., 2014. Small, but powerful – why we should put more emphasis on the collection of small WEEE. In: *Proceedings SUM 2014, Second Symposium on Urban Mining Bergamo, Italy*
- Schluep, M., et al. 2009. *Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies: Recycling - from E-waste to resources*. Bonn, Germany, United Nations Environment Programme & United Nations University.
- Seitz, J., 2014. Analysis of existing e-waste practices in MENA countries. In: *The Regional Solid Waste Exchange of Information and Expertise Network in Mashreq and Maghreb Countries, Tunis (SWEEP-Net)*.
- Sener S, Sener E, Nas B, Karagüzel R. 2010. Combining AHP with GIS for landfill site selection: a case study in the Lake Beys, ehir catchment area. *Waste Management. Vol (30)*, pp:2037–2046.
- Solomon Peter Gbanie, Paul Bobby Tengbe, Jinnah Samuel Momoh, James Medo, Victor Tamba Simbay Kabba. 2013. *Modelling landfill location using Geographic Information Systems (GIS)*

and Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA): Case study Bo, Southern Sierra Leone. *Applied Geography*. Vol (36), pp: 3–12

STEP 2009. StEP - Solving the e-waste problem. Page Internet disponible en ligne: www.step-initiative.org

Steuer R. E. Gardiner L.R. Gray J. 1996. A Bibliographic Survey of the Activities and International Nature of Multiple Criteria Decision Making. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* Volume 5, Issue 3.

Vincke, P. 1992. *Multicriteria Decision - Aid*. Chichester: John Wiley & Sons

Wang et al. 2013. Enhancing e-waste estimates: Improving data quality by multivariate Input–Output Analysis. *Waste Management*. Vol (33), pp: 2397–2407

Wang Feng, 2014. “E-waste: collect more, treat better. Tracking take-back system performance for eco-efficient electronics recycling”. Université de technologie de Delft. Thèse de doctorat.

Wang Feng; et al., 2012. A systematic and compatible classification of WEEE. In *Proceeding Electronics Goes Green 2012*, Berlin.

Widmer et al., 2005. Global perspectives on e-scrap. *Environmental Impact Assessment Review*. Vol (25), pp: 436–458.

Yaw Amoyaw-Osei et al. 2011. *Ghana e-Waste Country Assessment*. SBC e-Waste Africa Project.

Zhang B., Kimura. F.2006. Network Based Evaluation Framework for EEE to Comply with Environment Regulations, Mechatronics and Automation. *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on, IEEE*, pp. 797–802

Zurbrügg, C. 2013. *Assessment methods for waste management decision-support in developing countries*. Thèse de doctorat. Université de Brescia.

3. Estimation des déchets électroniques générés en Algérie

Aizawa, H., Yoshida, H., Sakai, S., 2008. Current results and future perspectives for Japanese recycling of home electrical appliances. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol (52), pp: 1399–1410

Araújo M. G., Magrini A., Mahler C. F., Bilitewski B. 2012. A model for estimation of potential generation of waste electrical and electronic equipment in Brazil. *Waste Management*. Vol (32), pp: 335–342

Baldé, C.P., Wang, F., Kuehr, R., & Huisman, J. 2015. *The global e-waste monitor — 2014*. Bonn, Germany: United Nations University.

Bass, F. M. 1969. A new product growth model for consumer durables. *Management Science*, Vol 15(5), pp: 215–227.

Boretos G.P. 2007. The future of the mobile phone business. *Technological Forecasting and Social Change*. Vol 74 (3), pp: 331–40

Brunner, P.H., Rechberger, H., 2004. Practical Handbook of Material Flow Analysis. Lewis Publishers, Boca Raton.

Centre for Research in Applied Economics for Development (CREAD), 2015. <http://www.cread.dz/>(Consulté le: 25/05/2015).

Chancerel, P. 2010. Substance flow analysis of the recycling of small waste electrical and electronic equipment: An assessment of the recovery of gold and palladium. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Berlin.

Christodoulos, C., Michalakelis, C., Varoutas, D., 2010. Forecasting with limited data: combining ARIMA and diffusion models. Technological Forecasting and Social Change. Vol 77 (4), pp: 558-565.

Deepali Sinha, 2013. Diffusion, Obsolescence and Disposal of End-of-Life Consumer Durables: Models for Forecasting Waste Flows. Thèse de doctorat. University de St. Gallen.

EEA 2003. Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE) – Quantities, Dangerous Substances and Treatment Methods.

Frank L.D. An analysis of the effect of the economic situation on modelling and forecasting the diffusion of wireless communications in Finland 2004. Technological Forecasting and Social Change. Vol 71(4), pp: 391–403

Gompertz, B. 1825. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol (115), pp: 513–585.

Ikhlayel, M. 2016. Differences of methods to estimate generation of waste electrical and electronic equipment for developing countries: Jordan as a case study. Resources, Conservation and Recycling. Vol (108), pp: 134–139

International Telecommunication Union, 2006, Core ICT indicators. International Telecommunication Union (ITU), Geneva, Switzerland. <http://www.itu.int/ITU-D/ict/partnership/material/%20CoreICTIndicators.pdf> (Consulté le : 18/01/ 2015).

IPEMED, Institut De Prospective Economique Du Monde Méditerranéen. 2014. Les technologies de l'information au Maroc, en Algérie et en Tunisie. Vers une filière euromaghrébine des TIC ?

Kang H. and Schoenung J. 2006. Estimation of future outflows and infra- structure needed to recycle personal computer systems in California. Journal of Hazardous Materials. Vol (137), pp: 1165–1174.

Liu X, Tanaka M. and Matsui Y. 2006. Generation amount prediction and material flow analysis of electronic waste: a case study in Beijing, China. Waste Management and Research. Vol (24), pp: 434–445.

M. Dwivedy, R.K. Mittal 2010. Estimation of future outflows of e-waste in India. Waste Management. Vol (30), pp: 483–491

- Matthews, S., Francis C. McMichael, Chris T. Hendrickson & Hart, D.J. 1997. Disposition and End-of-Life Options for Personal Computers: Green Design Initiative Technical Report. Carnegie Mellon University.
- Michalakelis, C., Varoutas, D., Sphicopoulos, T., 2008. Diffusion models of mobile. Telecommunications Policy. Vol (32), pp: 234–245
- Murakami, S. et al., 2010. Lifespan of commodities, Part I. Journal of Industrial Ecology. Vol (14), pp: 598–612.
- Oguchi, Masahiro, Takashi Kameya, Suguru Yagi, and Kohei Urano. 2008. ‘Product Flow Analysis of Various Consumer Durables in Japan’. Resources, Conservation and Recycling. Vol 52 (3), pp :463–480.
- ONS, 2016. Office national des statistiques. <http://www.ons.dz/-Demographie-.html> consulté le 17/08/2016.
- Peralta GL, Fontanos PM. 2006. E-waste issues and measures in the Philippines. Journal of Material Cycles and Waste Management. Vol 8(1), pp: 34–9.
- Robinson, B.H. 2009. E-waste : An assessment of global production and environmental impacts. Science of the Total Environment, Vol (408), pp: 183–191
- Spatari, S., M. Bertram, R. B Gordon, K. Henderson, and T. E. Graedel. 2005. ‘Twentieth Century Copper Stocks and Flows in North America: A Dynamic Analysis’. Ecological Economics. Vol 54 (1), pp: 37–51.
- Steubing, B., Böni, H., Schlupe, M., Silva, U., Ludwig, C., 2010. Assessing computer waste generation in Chile using material flow analysis. Waste Management. Vol (30), pp : 473–482.
- UN comtrade data base : <http://comtrade.un.org/db/> consulté le 19/04/2014
- UNEP 2013. Reuter, M. A.; Hudson, C.; van Schaik, A.; Heiskanen, K.; Meskers, C.; Hagelüken, C. Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel.
- Usinenouvelle, 2015. <http://www.usinenouvelle.com/article/maroc-le-marche-des-services-it-va-bondir-de-29-d-ici-a-2017-selon-idc.N310244>, consulté le 10/03/2015.
- Walk W. 2009. Forecasting quantities of disused household CRT appliances – A regional case study approach and its application to Baden-Württemberg. Waste Management. Vol (29), pp: 945–951
- Wang F. 2014. E-waste: collect more, treat better: Tracking take-back system performance for eco-efficient electronics recycling. Thèse de doctorat. Université de technologie de Delft.
- World Bank, 2014. <http://www.worldbank.org/> (Consulté le: 12/01/2015).
- Yang Y., Williams E. 2009. Logistic model-based forecast of sales and generation of obsolete computers in the U.S. Technological Forecasting & Social Change. Vol (76), pp: 1105–1114.

Yang Y., Williams, E., 2008. Forecasting sales and generation of obsolete computers in the US. In: Proceedings of IEEE Symposium on Electronics and the Environment.

Yu JL, Williams E, Ju MT, et al. 2010. Forecasting global generation of obsolete personal computers. Environmental Science & Technology. Vol (44), pp: 3232–3237.

4. Evaluation de la faisabilité économique de traitement des déchets des micro-ordinateurs en Algérie

Aissaou, S. & Rochat, D. 2008. Technical report on the assessment of e-waste management in Morocco. Centre de production propre marocaine et Empa.

APMEX, 2017 <http://www.apmex.com/spotprices/platinum-price> (Consulté le : 08/04/2017)

Baldé, C., Wang, F., Kuehr, R., Huisman, J., 2015. The Global e-waste Monitore 2014.

Blaser, F. & Schluep, M. 2012. Economic Feasibility of e-Waste Treatment in Tanzania. Rapport final, Préparé pour l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI).

Blaser, F. ; Schluep, M.; .Spitzbart, M. 2014. E-Waste Treatment Facility in Uganda. Economic Feasibility Study. Rapport final, Préparé pour l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI)

Bohr Ph. 2007. The Economics of Electronics Recycling New Approaches to Extended Producer Responsibility. Thèse de doctorat. Université de Technologie de Berlin.

Böni H., Widmer R. 2011. Disposal of Flat Panel Display Monitors in Switzerland. Laboratoires fédéraux suisses pour la science et la technologie des matériaux.

Hagelüken, C. 2006. Improving metal returns and eco-efficiency in electronics recycling. Article publié dans: Proceedings of the 2006 IEEE Int. Symposium on Electronics and the Environment, pp. 218-223.

Jeune indépendant, 2017. <http://www.jeune-independant.net/80-des-recuperations-des-dechets-s.html> (Consulté le : 30/04/2017)

LME ,2017. London Metal Exchange : Données sur les prix des métaux. (Consulté le : 08/04/2017)

LME, 2016. London Metal Exchange : Current Primary and Scrap Metal Prices. <https://www.metalprices.com/> (Consulté le : 11/06/2016)

Meskers, C. ; Hagelüken, C.; Salhofer, S.; Spitzbart, M. 2009. Impact of pre-processing routes on precious metal recovery from PCs. European Metallurgical Conference, Innsbruck, Autriche.

Salhofer, S.; Spitzbart, M.; Maurer, K.2012. Recycling of flat screens as a new challenge. Waste and Resource Management. Vol 165 (1); pp: 37-43.

Schluep, M., Hagelueken, C., Kuehr, R., Magalini, F., Maurer, C., Meskers, C., et al., 2009. Recycling – from e-waste to resources. Sustainable innovation & technology transfer industrial sector studies. Rapport final. Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), StEP - Résolution du problème des déchets électroniques.

Spitzbart M., Schluep M. 2014. E-Waste Treatment Facility in Uganda Business Plan. Préparé pour l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI).

Swico, 2009. Tätigkeitsbericht 2008, Zürich, Switzerland: Swico Recycling.

TemaNord, 2007. Nordic Guideline for Cost-benefit analysis in waste management. Nordic Council of Ministers, Copenhagen 2007.

Wang F. 2014. E-waste: collect more, treat better Tracking take-back system performance for eco-efficient electronics recycling. Thèse de doctorat. Université de Technologie de Delft.

Wang F., Huisman J., Meskers C., Schluep M., Stevels A., Hagelüken C. 2012. The Best-of-2-Worlds philosophy: developing local dismantling and global infrastructure network for sustainable e-waste treatment in emerging economies. Waste Management. Vol 32 (11), pp :2134-2146.

5. Système d'information et d'aide à la décision pour gérer les déchets des micro-ordinateurs en Algérie

Achillas, Ch.; Vlachokostas, Ch.; Moussiopoulos, N.; and Banias, G. 2010. Decision support system for the optimal location of electrical and electronic waste treatment plants: A case study in Greece. Waste Management. Vol (30), pp: 870–879.

Antonino Fiannaca, Massimo La Rosa, Alfonso Urso, Riccardo Rizzo, Salvatore Gaglio. 2013. A knowledge-based decision support system in bioinformatics: an application to protein complex extraction BMC Bioinformatics. 14 (Suppl 1): S5.

Belton, V.; Steward, T. 2002. Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach; Springer US: New York, USA.

Chung-Hsing Yeh. 2012. Evaluating Recycling Sustainability Performance of E-waste Products. The Business and Economics Research Journal. Vol 5 (2), pp: 207-223.

Dodgson, J.S.; Spackman, M.; Pearman, A.; Phillips, L.D. Multi-Criteria Analysis: A Manual, 2009. LSE Research Online. Valable en ligne : <http://eprints.lse.ac.uk/12761/> (Consulte le 25 Mai 2017).

Garvey, P.R., 2008. Analytical Methods for Risk Management: A System Engineering Perspective. CRC Press, Boca Raton, pp.243-250.

Herath, G.; Prato, T. 2006. Role of multi-criteria decision making in natural resource management. In Using Multi-Criteria Decision Analysis in Natural Resource Management. Publishing Ltd.: London, UK.

Hwang, C.L. and Yoon, K., 1981. Multiple attribute decision making: Methods and applications. New York: Springer-Verlag.

Jarupathirun, S., Zahedi, F. 2007. Exploring the influence of perceptual factors in the success of web-based spatial DSS. Decision Support Systems, Vol 43(3), pp: 933-951.

- Kai Jin, B.S. 2002. Multiple objective decision-making models for materials management of end-of-life electronic product. Thèse de doctorat. L'université de Technologie de Texas (USA).
- Keefer, D., and S. Kahkonan. 2004. Perspective on decision analysis applications. *Decision Analysis* 1, Vol (1), pp: 5-24.
- Konidari, P., and Mavraklis, D. 2007. A multi-criteria evaluation method for climate change mitigation policy instruments. *Energy Policy*, Vol 35(12), pp: 6235-6257.
- Kusumadewi S., S. Hartati, A. Harjoko, dan R. Wardoyo, 2006. Fuzzy Multi-Attribute Decision Making (FUZZY MADM)", Yogyakarta: Penerbit Graha Ilmu.
- Loken, E. 2007. Use of multi-criteria decision analysis methods for energy planning problems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 11(7), pp:1584-1595.
- Malczewski, J., 1999. GIS and Multicriteria Decision Analysis. John Wiley and Sons, New York
- Marcia Oliveira, Dalila B. M. M. Fontes and Teresa Pereira. 2015. Evaluating vehicle painting plans in an automobile assembly plant using an integrated AHP-PROMETHEE approach. *International Transactions in Operational Research*, 1–24.
- Micky A. Babalola. 2015. Laboratory A Multi-Criteria Decision Analysis of Waste Treatment Options for Food and Biodegradable Waste Management in Japan. *Environments*. Vol (2), pp:471-488.
- Payne, J., Bettman, J. & Eric, J., 1993. *The adaptive decision maker*, Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Power DJ. *Decision Support Systems: Concepts and Resources for Managers*. Westport, CT: Greenwood/Quorum; 2002.
- Power, D.J. 2007. —Decision Support Systems Web Tour.” World Wide Web, <http://tinyurl.com/ydmuvzg> (Consulté le 12 janvier 2017)
- Roy B. 1991. The Outranking Approach and the Foundation of ELECTRE Methods, *Theory and Decision*, 31.
- Saaty, T. L. 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill.
- Saaty, T. L. 1990. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, Vol 48 (1), pp:9-26.
- Saaty, T.L. 2001. Decision Making with Dependence and Feedback, *The Analytical Network Process*,” Université de Pittsburgh.
- Shenoy, A., et Sossou, U. 2014. *Learning Bootstrap*. Packt Publishing Ltd.
- Shih, H.S., Shyur, H.J. and Lee, E.S., 2007. An extension of TOPSIS for group decision-making, *Mathematical and Computer Modelling* Vol (45), pp:801-813.
- Sugumaran, V.; Sugumaran, R. 2005. Web-based Spatial Decision Support Systems (Web-SDSS): Evolution, Architecture, and Challenges. *Proceedings of Third Annual SIGDSS Pre-ICIS*

Workshop, Designing Complex Decision Support: Discovery and Presentation of Information and Knowledge, Las Vegas, Nevada, USA

Triantaphyllou, E., 2000. Multi-criteria Decision-Making Methods: A Comparative Study. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Yongchang Li. 2004. An Intelligent, Knowledge-based Multiple Criteria Decision-Making Advisor for Systems Design. Thèse de doctorat. Institut de technologie de la Géorgie

Annexes

Annexe 1 : Catégorisation des déchets électroniques dans la législation algérienne et ordinateurs en cours d'utilisation.

Tableau 1.1. Catégorisation des déchets électroniques dans la législation algérienne

Code du déchet	Désignation des déchets	Critère de dangerosité
16.2	Déchets provenant d'équipements électriques ou électroniques	
16.2.1	Transformateurs et accumulateurs contenant des PCB	Irritante toxique cancérigène dangereuse pour l'environnement
16.2.2	Equipements mis au rebut contenant des PCB ou contaminés par de telles substances autres que ceux visés à la rubrique	Irritante toxique cancérigène dangereuse pour l'environnement
16.2.3	Equipements mis au rebut contenant des chlorofluorocarbones, des HCFC ou des HFC	Dangereuse pour l'environnement
16.2.4	Equipements mis au rebut contenant de l'amiante libre	Toxique cancérigène
16.2.5	Equipements mis au rebut contenant des composants dangereux (1) autres que ceux visés aux rubriques 16.2.1 à 16.2.4 (1) Par composants dangereux provenant d'équipements électriques et électroniques, on entend notamment des piles et accumulateurs visés à la section 16.6 et considérés comme dangereux, des aiguilles de mercure, du verre provenant de tubes cathodiques et autres verres activés, etc.	Dangereuse pour l'environnement
16.2.6	Equipements mis au rebut autres que ceux visés aux rubriques 16.2.1 à 16.2.5	
16.2.7	Composants dangereux retirés des équipements mis au rebut	Dangereuse pour l'environnement
16.2.8	Composants retirés des équipements mis au rebut autres que ceux visés à la rubrique 16.2.7	
16.2.9	Déchets non spécifiés	

Source : Seitz 2014

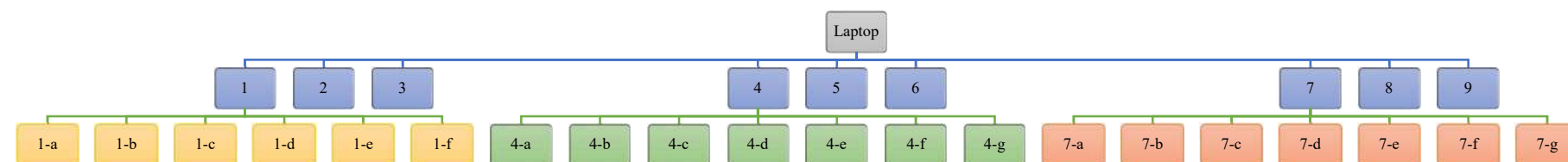
Tableau 1.2. Ordinateurs en cours d'utilisation par wilaya pour l'an 2016.

Alternative location	Forecasted Population	Area km2	Computer in-use (Units) for the year 2016		
			Logistic growth	Bass model	Gompertz
Alger	3,542,490	1,190	446,350	467,148	458472.601
Sétif	1,766,392	6,504	222,564	232,934	228608.233
Oran	1,723,831	2,121	217,201	227,322	223099.924
Tizi Ouzou	1,336,795	3,568	168,435	176,283	173009.313
Batna	1,327,529	12,192	167,267	175,061	171810.1
Djelfa	1,294,800	66,415	163,144	170,745	167574.344
Blida	1,188,997	1,575	149,812	156,793	153881.132
Chlef	1,187,990	4,795	149,686	156,660	153750.869
M'Sila	1,174,360	18,718	147,968	154,863	151986.879
Tlemcen	1,125,214	9,061	141,776	148,382	145626.264
Constantine	1,112,576	2,187	140,183	146,715	143990.695
Béjaïa	1,081,874	3,268	136,315	142,667	140017.151
Skikda	1,065,398	4,026	134,239	140,494	137884.928
Tiaret	1,003,921	20,673	126,493	132,387	129928.482
Médéa	972,041	8,866	122,476	128,183	125802.582
Boumerdès	950,881	1,356	119,810	125,393	123064.001
Mascara	929,530	5,941	117,120	122,577	120300.718
Mila	909,155	9,373	114,553	119,890	117663.707
Aïn Defla	908,120	4,891	114,422	119,754	117529.763
Mostaganem	873,864	2,175	110,106	115,236	113096.388
Relizane	860,897	4,870	108,472	113,527	111418.165
Biskra	855,178	20,986	107,752	112,772	110678.016
Bouira	824,624	4,439	103,902	108,743	106723.652
Tébessa	769,047	14,227	96,899	101,414	99530.8299
El Oued	767,678	54,573	96,727	101,234	99353.6177
Jijel	755,111	2,577	95,143	99,577	97727.2543
Bordj Bou Arreridj	745,066	4,115	93,878	98,252	96427.2376
Oum El Bouaghi	736,930	6,783	92,852	97,179	95374.244
Annaba	722,570	1,439	91,043	95,285	93515.7403
Sidi Bel Abbès	716,933	9,096	90,333	94,542	92786.1783
Tipaza	700,651	1,605	88,281	92,395	90678.9637
Ouargla	662,179	211,980	83,434	87,322	85699.8369
Guelma	571,928	4,101	72,062	75,420	74019.4793
Laghouat	540,123	25,057	68,055	71,226	69903.2457
Souk Ahras	519,406	4,541	65,445	68,494	67222.0476
El Tarf	484,181	3,339	61,006	63,849	62,663
Adrar	473,867	439,700	59,707	62,489	61328.3215

Khenchela	458,418	9,811	57,760	60,452	59328.9686
Aïn Témouchent	440,109	2,379	55,453	58,037	56959.3878
Ghardaïa	431,051	86,105	54,312	56,843	55787.0253
Saïda	391,980	6,764	49,389	51,690	50730.4161
Tissemsilt	349,106	3,152	43,987	46,037	45181.6019
Béchar	320,161	162,200	40,340	42,220	41435.596
Bayadh	271,037	78,870	34,150	35,742	35077.8961
Naâma	228,675	29,950	28,813	30,155	29595.3638
Tamanrasset	209,406	556,185	26,385	27,614	27101.5044
Illizi	62,042	285,000	7,817	8,181	8029.4787
Tindouf	58,267	159,000	7,342	7,684	7540.95597
Total	40,402,379	2,381,739	5,090,659	5,327,862	5,228,916

Annexe 2 : Profondeur de démantèlement des micro-ordinateurs (Cas de micro-portables)

Tous les résultats de démantèlement présentés dans cette partie des différents micro-portables. Cette opération a eu lieu au niveau du laboratoire du département de l'économie circulaire et technologie de recyclage à l'université technique de Berlin.



1-Lecteur DVD, 2-Batterie, 3-Haut-parleur, 4-Disque dur, 5-Ventilateur et dissipateur thermique, 6-Carte mère et PCBs, 7-Ecran LCD, 8-Clavier, 9-Autres.

1-a-Cadre (Châssis), 1-b- Plastique, 1-c-PCB (Cartes électroniques), 1-d-Bloc optique, 1-e-Cable plat, 1-f-Vis.

4-a- Couverture, 4-b- Cadre (Châssis), 4-c- Axe Moteur, 4-d- PCB, 4-e- Plateaux, 4-f- Actuateur (Aimant), 4-g- Interface IDE et vis.

7-a- Cadre en métal, 7-b- Tubes CCFL, 7-c- Feuilles réfléchissantes, 7-d- Verre LCD, 7-e- PCB, 7-f- Diffuseurs de Lumière, en Feuille, 7-g- Couches supérieures.

Fig. 2.1. Profondeur du démontage manuel d'un laptop.

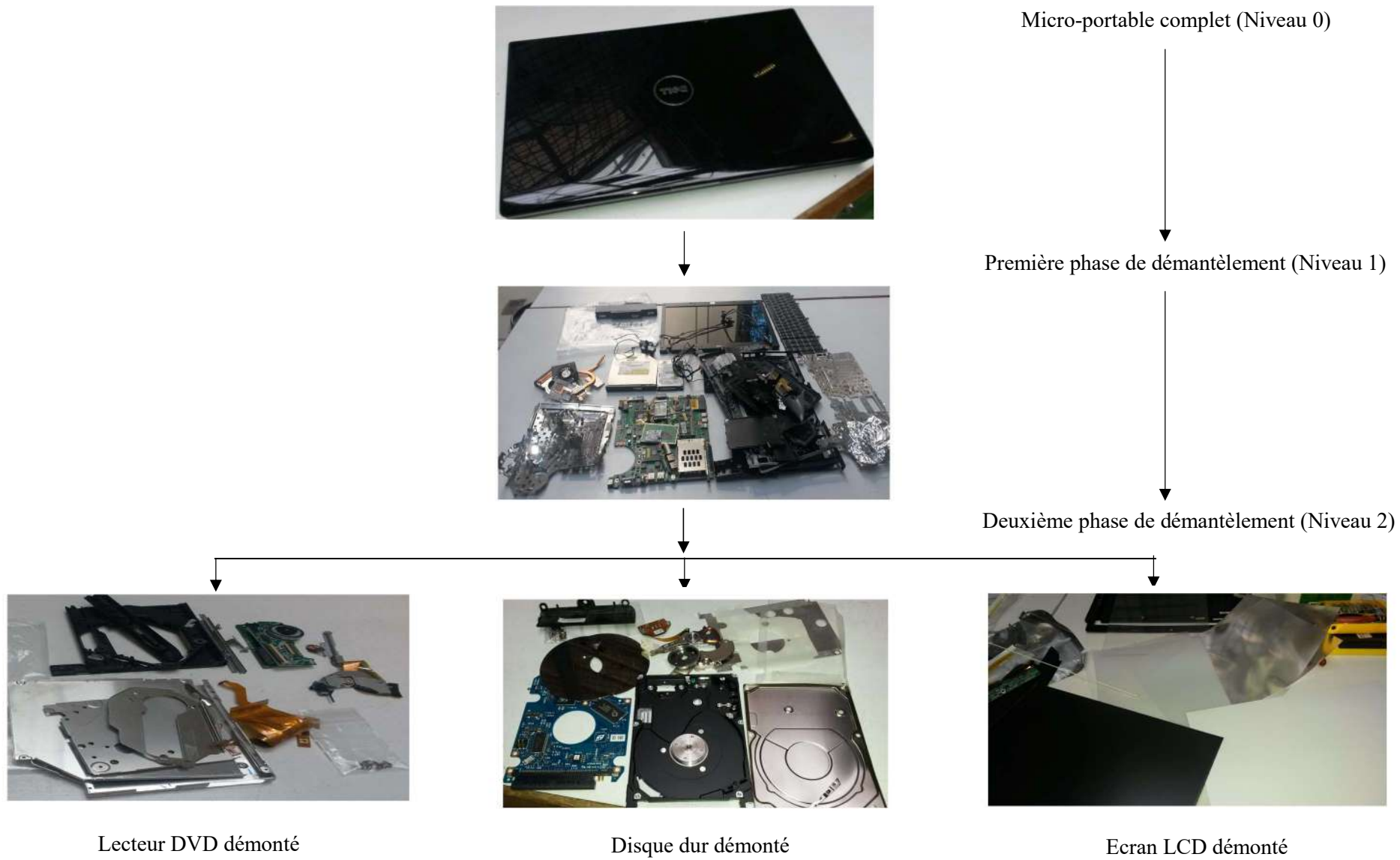


Fig. 2.2. Différents niveaux du démantèlement manuel d'un laptop.

Tableau 4.2. Les résultats de la première phase de démantèlement (Niveau 1) (en grams)

	HP	Samsung NP-M60	Toshiba	MSI	Dell	Samsung NP-x420
Poids total (g)	2986,8	2958	3008,9	2579	2795,2	1759,9
Lecteur DVD	178,9	184,1	213,1	174,2	179	/
Disque dur	106,6	113,3	110,8	103,2	108	126
Ecran LCD	929,4	1109,8	1010	872,5	782,4	611,6
Batterie	616,2	318,9	412,7	323,3	487,2	326,1
Haut-parleur		50,7	32,36	19,6	42,1	13,3
Ventilateurs et dissipateur thermique	109,8	139,4	86,22	104,1	128,8	41
Carte mère et PCBs	290,1	320,4	384	341,7	271,9	141,1
Châssis	626,4	512,8	528,7	373,9	648,2	413,9
Clavier	94,7	94,6	111,2	114,8	99,3	91,4
Autres		114		151,7	26,9	4,5

Annexe 3 : Processus de traitement des écrans de type CRT et LCD.

1-Processus de traitement des écrans LCD

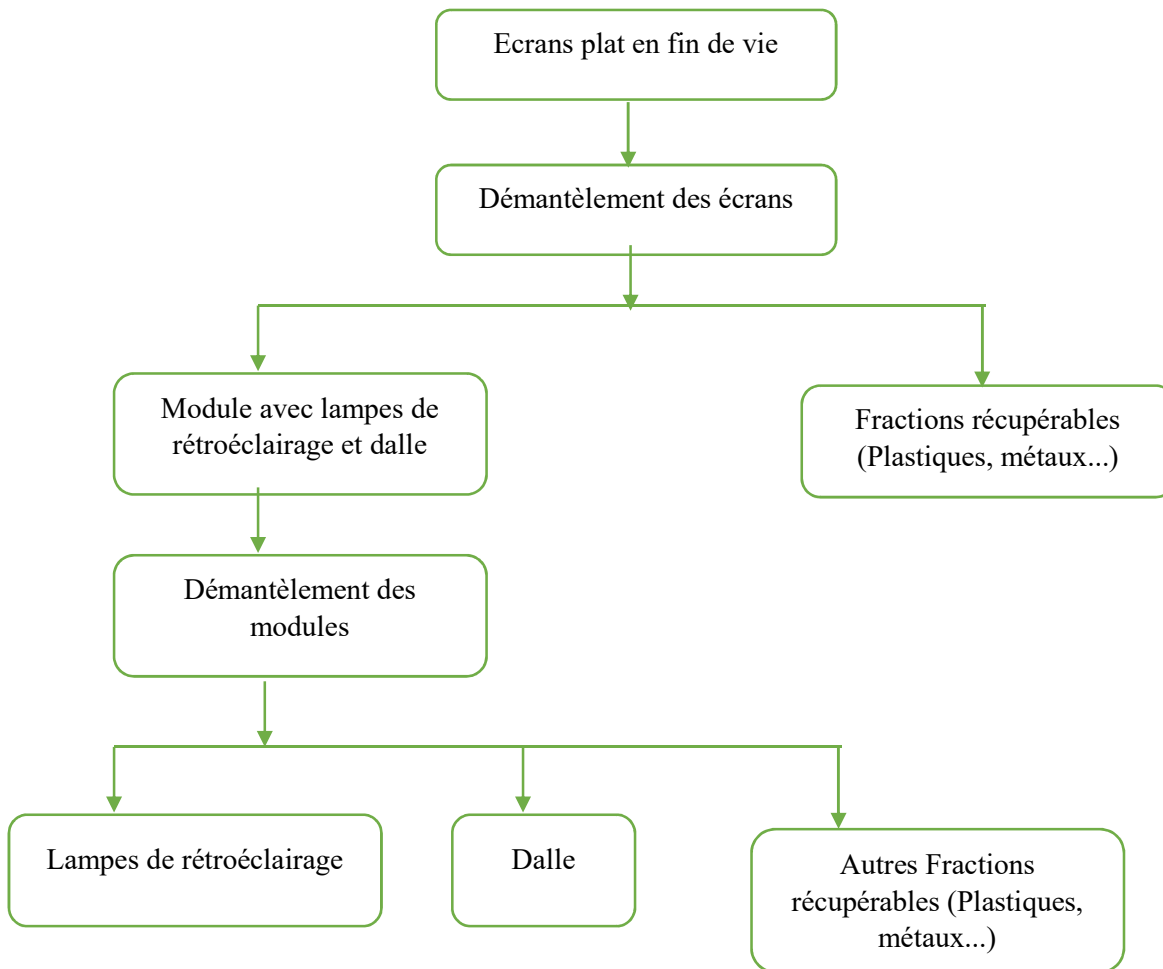


Fig.3.1. Processus de traitement des écrans plat (LCD) en fin de vie.

2-Processus de traitement des écrans CRT

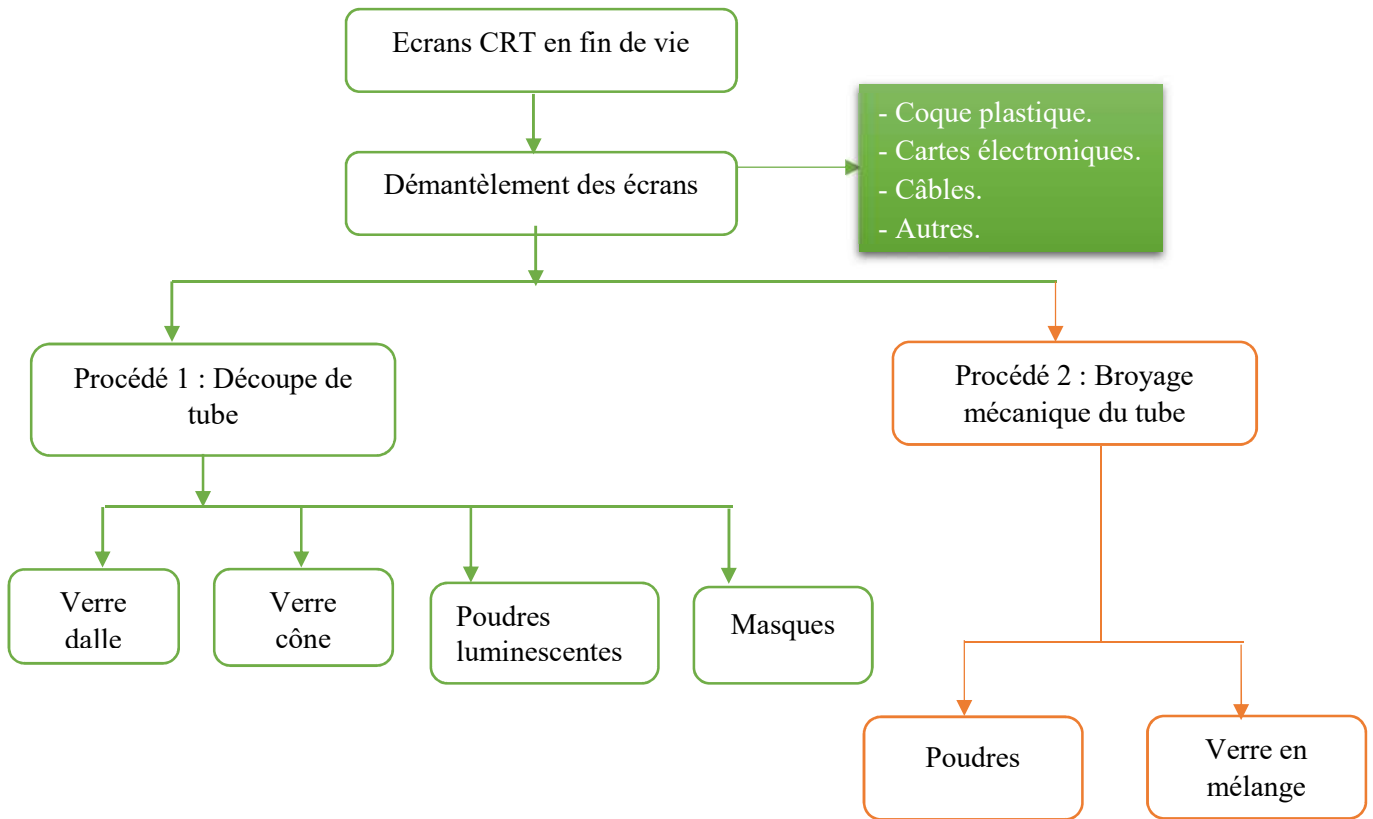


Fig.3.2. Processus de traitement des écrans (CRT) en fin de vie (modifié d'ADEME, 2008).

La séparation ou bien le broyage manuel des tubes cathodiques sont déconseillé en raison de la présence des substances dangereuses (Plomb, Cadmium et la poussière).

Annexe 4 : Différentes présentation des résultats de démantèlement des micro-ordinateurs.

4.1. Selon la littérature

1-Barbara V. Kasulaitis et al. *Evolving materials, attributes, and functionality in consumer electronics: Case study of laptop computers. Resources, Conservation and Recycling 100 (2015) 1-10*

L'objectif de cette étude était d'évaluer le degré de changement dans les attributs et l'évolution des matériaux, des attributs et des fonctionnalités des EEE. Au total, 11 ordinateurs portables ont été démantelés et identifiés en fonction de la composante fonctionnelle et des matériaux.

Année	Marque	Taille d'écran	Disque dur	Châssis
1999- 2008	Dell	14,1	700MB- 250 GB	Plastique, Al/Plastique ou Magnésium

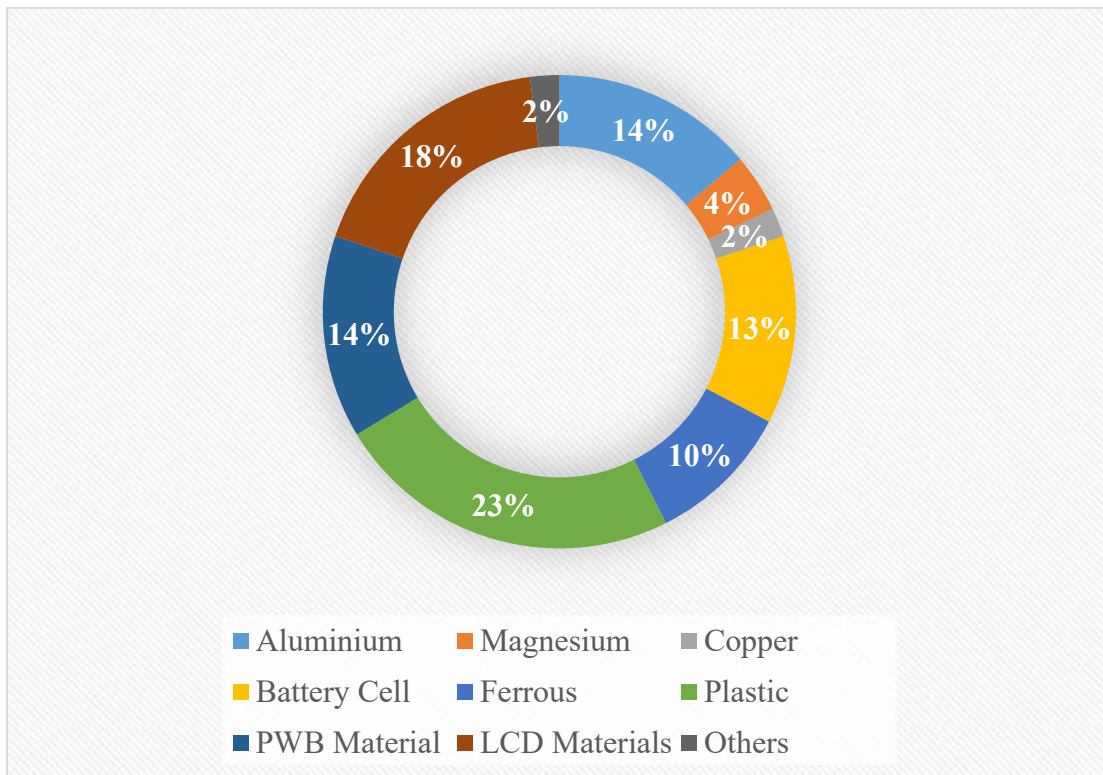


Fig.4.1. Composition matérielle moyenne pour Dell (Taille d'écran 14,1 pouces)

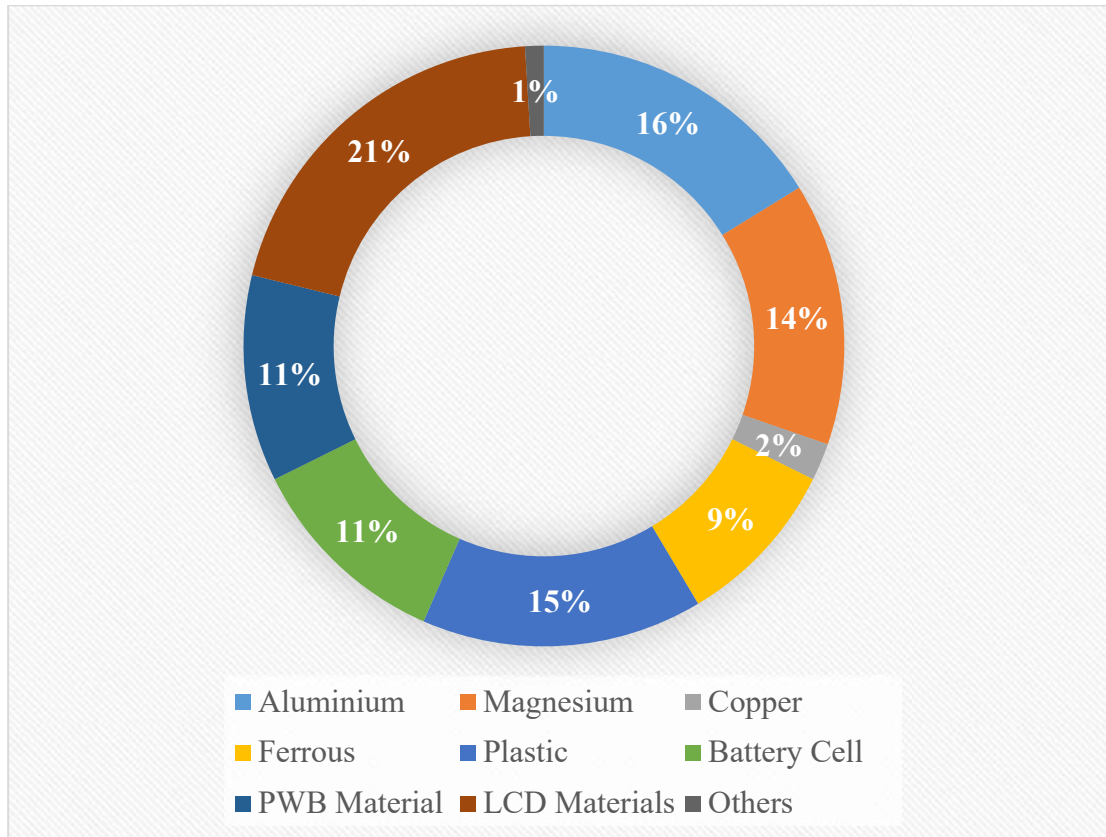


Fig. 4.2. Composition matérielle moyenne pour HP (Taille d'écran 17)

2-Ramzy Kahhat, Soumya Poduri, Eric William. *Bill of Attributes (BOA) in Life Cycle Modeling of Laptop Computers: Results and Trends from Disassembly Studies. Sustainability Consortium, 2011.*

L'objectif principal de cette étude était de contribuer à développer les données (BOA) pour les ordinateurs portables.

Tableau 4.1. Résumé des résultats de l'étude mentionnée ci-dessus.

Poids total (g)	3397	2687	1742	2407	3453
Aluminium	447	227	219	425	580
Cuivre	84	24	39	35	74
Plastique	963	1,128	398	603	782
PCB	413	268	229	268	406
Fer et acier	835	516	266	265	396
Magnésium	-	-	214	326	494
Autres	451	249	101	207	346

3- M. Oguchi et al. A preliminary categorization of end-of-life electrical and electronic equipment as secondary metal resources. Waste Management 31 (2011) 2150-2160.

L'objectif principal de cette étude était d'examiner les caractéristiques de équipements électroniques en fin de vie (21 types en 5 groupes) en tant que ressources métalliques secondaires pour envisager des systèmes efficaces de collecte et de récupération des métaux selon les métaux spécifiques et les types des équipements électroniques.

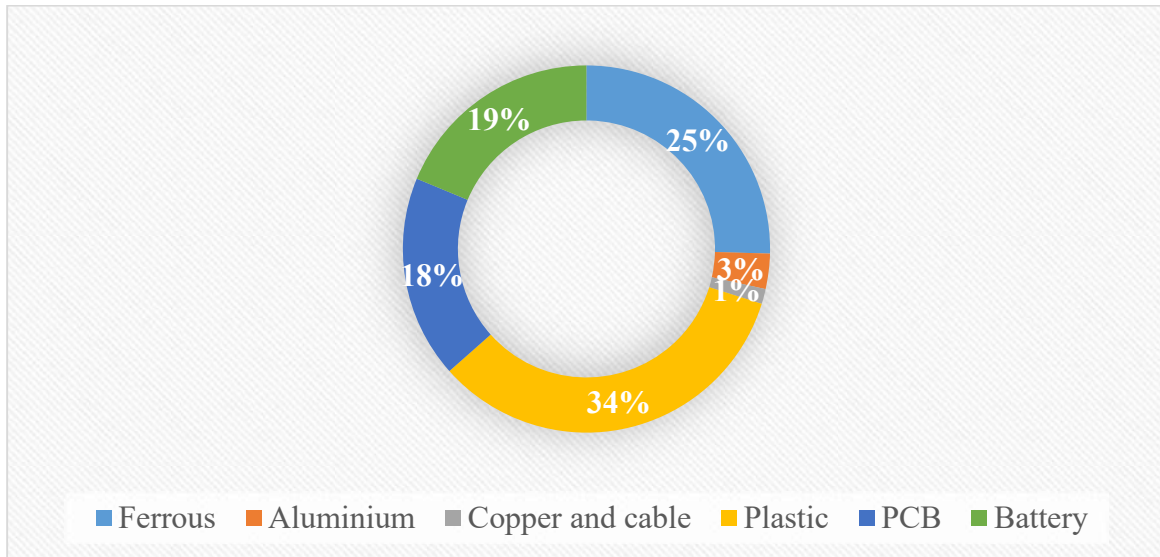


Fig. 4.3. Composition des matériaux pour ordinateur portable

Tableau 4.2. Contenu en métal de PCB d'un ordinateur portable (mg / kg)

<i>Métaux communs</i>						<i>Métaux précieux</i>			<i>Métaux moins communs</i>					
Al	Cu	Fe	Pb	Sn	Zn	Ag	Au	Pd	Ba	Bi	Co	Ga	Sr	Ta
18000	190000	37000	9800	16000	16000	1100	630	200	5600	120	80	10	380	5800

4-Matthias Buchert, Andreas Manhart, Daniel Bleher, Detlef Pinge. Recycling critical raw materials from waste electronic equipment, 2012.

L'objectif global du rapport était de développer des options de recyclage pour les déchets d'équipement pour récupérer les matières premières critiques et produire un inventaire du cycle de vie de l'apparition des matières premières critiques dans quatre groupes choisis d'appareils électroniques : écrans plats, lumières LED, cahiers et Les smartphones.

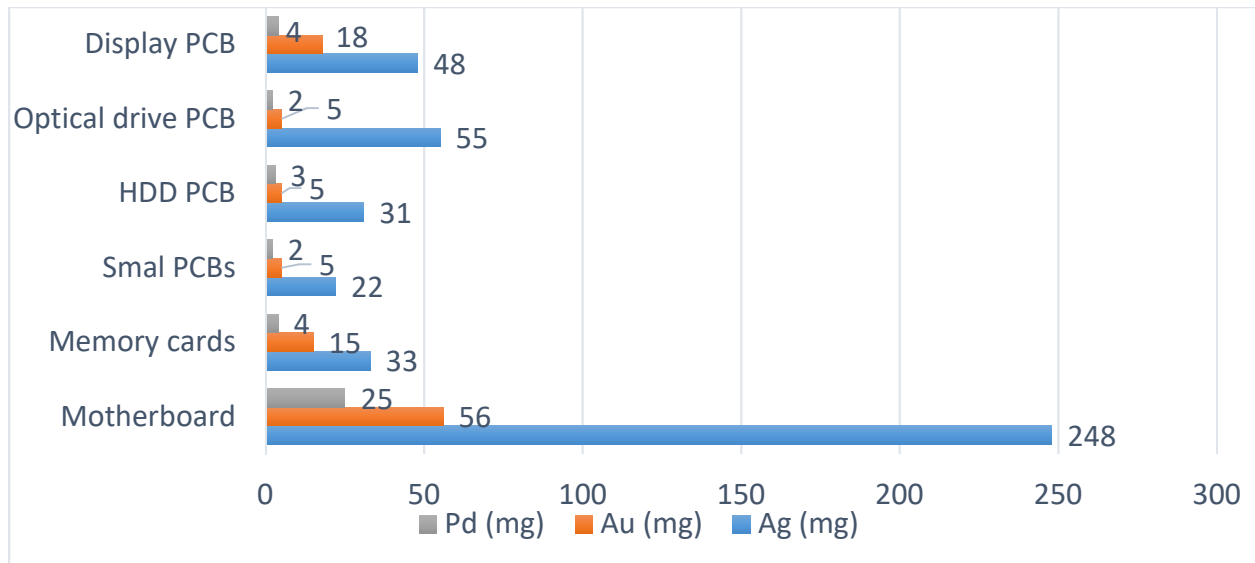


Fig. 4.5. Poids et concentration des métaux précieux dans les PCB dans les micro-portables.

4.2. Les résultats d'une série de démantèlement des micro-ordinateurs au niveau du laboratoire de la gestion des déchets à l'université technique de Berlin.

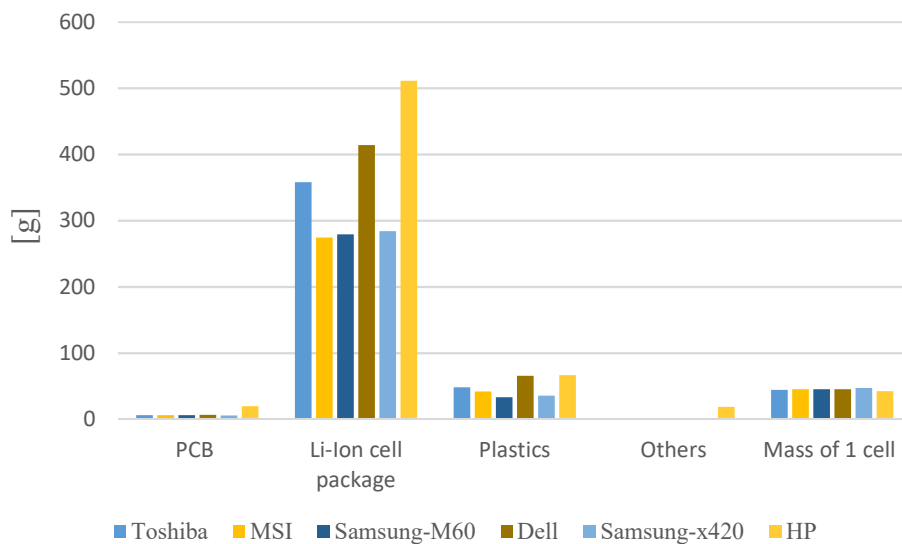


Fig. 4.6. Composition des batteries de différents ordinateurs portables.

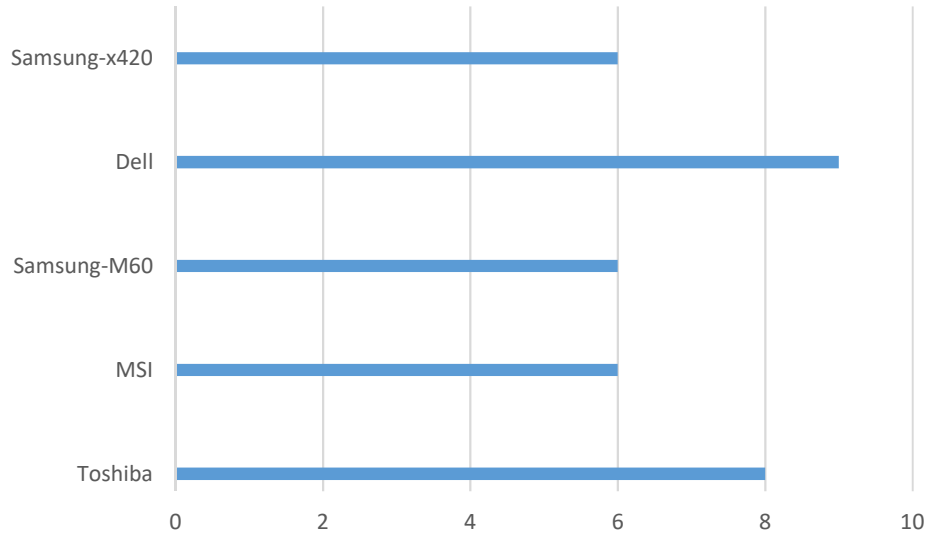


Fig. 4.7. Nombre de cellules par batterie

Tableau 4.3. Résumé des résultats de démantèlement des micro-portables en fin de vie.

Manufacturer	Toshiba		MSI		Samsung		Dell		Samsung		HP	
Model	Satellite M30x-102		MS-16362		NP-M60		PP39L		NP-x420		dv5-1203eg	
Year Manufactured							20-07-10		NA		23-02-09	
Battery type	Li-ion		Li-ion		Li-ion		Li-ion		Li-ion		Li-ion	
Equipement incomplete/ Total weight before disassembly [g]	w/o charger cable 3002.9		No 2580		No 2958		No 2720		DVD player 1775.9		No 2990	
	[g]	[%] by product weight	[g]	[%] by product weight	[g]	[%] by product weight	[g]	[%] by product weight	[g]	[%] by product weight	[g]	[%] by product weight
steel and steel alloys	149.05	4.96%	123.42	4.79%	174.11	5.94%	108.77	4.13%	93.24	5.27%	93.09	3.12%
Al and Al alloys	279.47	9.31%	295.86	11.47%	286.55	9.78%	223.92	8.50%	127.65	7.21%	230.16	7.71%
Mg and Mg alloys	39.57	1.32%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	126	4.22%
Cu and Cu alloys	34.09	1.14%	56	2.17%	48.68	1.66%	34.17	1.30%	14.14	0.80%	39.89	1.34%
Magnet alloys NdFeB	26.09	0.87%	21.11	0.82%	36.87	1.26%	26.95	1.02%	17.2	0.97%	14.87	0.50%
Rubber and plastics [g]	1196.36	39.85%	984.25	38.16%	1257.55	42.92%	1090.15	41.38%	761.43	43.04%	1181.22	39.57%
copper steel composites (including motors)	19.71	0.66%	12.1	0.47%	6.06	0.21%	28.69	1.09%	0	0.00%	20.01	0.67%
plastic-copper (including wires and cables)	21.17	0.71%	26.14	1.01%	1.3	0.04%	17.96	0.68%	14.1	0.80%	12.52	0.42%
Fe/Cu/Plastic	71.67	2.39%	89.41	3.47%	64.35	2.20%	111.87	4.25%	42.55	2.40%	52.06	1.74%
Al/Cu/Plastic	7.66	0.26%	0	0.00%	3.73	0.13%	0	0.00%	0	0.00%	3.59	0.12%
rubber and plastics composites	9.21	0.31%	15	0.58%	30.07	1.03%	19.52	0.74%	10.79	0.61%	8.2	0.27%
Fe/Al	52.72	1.76%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%
Al/Cu/Fe	0.00	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	3.47	0.13%	0	0.00%	11.82	0.40%
Al/Cu	0.00	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	21.41	0.81%	3.43	0.19%	0	0.00%
Al/Plastic	0.00	0.00%	0	0.00%	17.71	0.60%	0	0.00%	29.26	1.65%	0	0.00%
Cu/Fe/Pcb	3.43	0.11%	3.84	0.15%	7.71	0.26%	5.62	0.21%	2.42	0.14%	4.77	0.16%
Plastic/Fe/Magnet	4.13	0.14%	7.88	0.31%	9.34	0.32%	6.41	0.24%	3.13	0.18%	5.64	0.19%
not specified	5.06	0.17%	30.63	1.19%	14.88	0.51%	6.16	0.23%	19.83	1.12%	25.54	0.86%
PCB after Ta cap removal	442.46	14.74%	388.286	15.06%	362.797	12.38%	306.106	11.62%	164.906	9.32%	330.322	11.07%
Ta capacitors	0.69	0.02%	0.82	0.03%	1.363	0.05%	1.96	0.07%	0.314	0.02%	0.45	0.02%
PCB w/o Ta cap removal	5.85	0.19%	5.95	0.23%	6.22	0.21%	6.36	0.24%	5.51	0.31%	19.65	0.66%
LCD panel	275.00	9.16%	242.6	9.41%	320.2	10.93%	200	7.59%	174.1	9.84%	292.5	9.80%
CCFL Tube	1.00	0.03%	1.17	0.05%	1.2	0.04%	0	0.00%	0	0.00%	1.3	0.04%
LED package	0.00	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0.55	0.02%	1.5	0.08%	0	0.00%
Li-ion cell package	358.00	11.92%	274.56	10.65%	279.26	9.53%	414.23	15.72%	283.79	16.04%	511.45	17.13%

Annexe 5 : Différentes données économiques

Tableau 5.1. Équipements de travail requis (Source : Spitzbart, 2014)

	Coûts (USD / unité)	Coûts (DA / unité)
Équipements administratif (PC, table, chaise)	500	46.265
Une table de démontage (table, chaise)	200	18.506
Unité de traitement des écrans CRT	15 000	1.387.950
Camionnette	10 000	925.300
Outils de travail	150	13.879,5
HSE (chaussures, barre, gants, etc.)	50	4.626,5
Ventilateur	10	925,3
Collection box	50	4.626,5
Palette	5	462,65
Balance	250	23.132,5
Transpalette (transport interne)	500	46.265

1 USD= 0,92094 EUR (le 31/12/2015) et 1 USD= 92,5300 DZD (le 31/12/2015) (www.boursorama.com)

Tableau 5.2. Traitement de fin des écrans CRT (source : GRIAG, Aissaoui et al. 2008)

	Détails
Tube avec ferraille métallique à l'intérieur	60 € / t (5.525,64 DA/t) Pour <100 t / mois (GRIAG)
Déchets de verre sans déchets de métaux, sans lavage.	75 € / t (6.907,05 DA/t) Pour <100 t / mois (GRIAG)
CRT écrans	250 € / t (23.023,5 DA/t) (Recilec)

1 USD= 0,92094 EUR (le 31/12/2015) et 1 USD= 92,5300 DZD (le 31/12/2015) (www.boursorama.com)

Tableau 5.3. Différents scénarios des flux (en tonnes) entrant l'unité de traitement.

		Laptop	Desktop	Ecran FDP	Ecran CRT
Scenario 1	Année 1	5	17.5	7.5	20
	Année 2	8	32	10	30
	Année 3	10	35	15	40
	Année 4	12	43	20	45
	Année 5	15	75	25	35
Scenario 2	Année 1	5	17.5	7.5	20
	Année 2	8	42	10	40
	Année 3	10	50	25	65
	Année 4	15	80	30	75
	Année 5	25	100	35	60
Scenario 3	Année 1	5	17.5	7.5	20
	Année 2	10	50	10	50
	Année 3	15	70	20	65
	Année 4	20	100	25	75
	Année 5	25	140	35	80
Scenario 4	Année 1	5	17.5	7.5	20
	Année 2	10	55	15	55
	Année 3	20	65	25	75
	Année 4	25	120	30	75
	Année 5	30	165	35	90
Scenario de référence	Année 1	5	17.5	7.5	20
	Année 2	8	67	10	65
	Année 3	10	95	15	8
	Année 4	25	195	30	50
	Année 5	35	250	35	30

Annexe 6 : Différentes pages du SIAD

Computer lifespan-Normal distribution

In this study, the term 'in-use stock' refers to the number of computers that households and business possess.

The study revealed that the amount of stock-in-use in 2010 is approximately 3,118,508 PCs, this results is close to the

Following figures show the forecast computer per capita rates. The evolution of the acquisition of computer per capita there would be a maximum value of approximately 0.128 PC per capita using the logistic model and 0.137 PC per capita

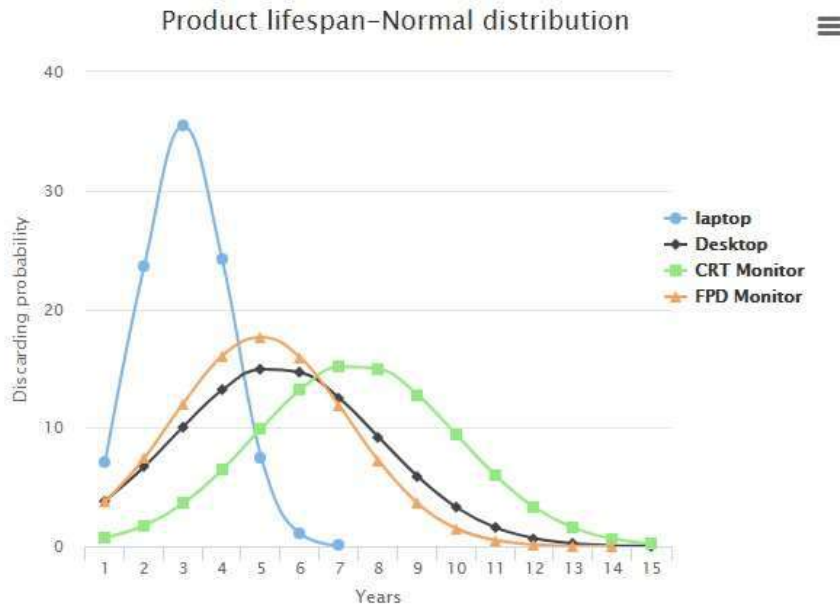


Fig. 6.1. La durée de vie des ordinateurs et écrans (Distribution normal)

DSS for the optimal location for WEEE treatment | Home | Computer waste | Input Data | Data analysis | Administrator

Data criteria

Show 10 entries | Search:

ID criteria	Name criteria	Weight criteria	Action
C1	Local population	0.39184783749393	
C2	The capacity to collect e-waste	0.1272755647172946	
C3	Distance from existing treatment centers	0.12159288888731314	
C4	Financial status of the wilaya	0.055581782363778746	
C5	Distance from the nearest port	0.018067640823394912	
C6	Unemployed population	0.14285714285714285	
C7	Land value	0.14285714285714285	
ID criteria	Name criteria	Weight criteria	Action

Showing 1 to 7 of 7 entries | Previous 1 Next

Fig. 6.2. Différents critères et leurs poids relatifs (Pour une évaluation aléatoire.)

DSS for the optimal location for WEEE treatment | Home | Computer waste | Input Data | Data analysis | Administrator

Data Alternative

Show 10 entries | Search:

ID Alternative	Alternative Name	Final result	Action
A1	Alger		
A2	Setif		
A3	Oran		
A4	Tizi Ouzou		
A5	Batna		
ID Alternative	Alternative name	Final result	Action

Showing 1 to 5 of 5 entries | Previous 1 Next | © 2017

Fig. 6.3. Différentes alternatives et leurs poids relatifs.

DSS for the optimal location for WEEE treatment | Home | Computer waste | Input Data | Data analysis | Administrator

Alternative Analysis

Select Criteria: Local population

First Criterion: Local population

- The capacity to collect e-waste
- Distance from existing treatment centers
- Financial status of the wilaya
- Distance from the nearest port
- Unemployed population
- Land value

Alger	9 - Extremely strong	Oran
Alger	9 - Extremely strong	Tizi Ouzou
Alger	9 - Extremely strong	Batna
Setif	9 - Extremely strong	Oran
Setif	9 - Extremely strong	Tizi Ouzou
Setif	9 - Extremely strong	Batna
Oran	9 - Extremely strong	Tizi Ouzou
Oran	9 - Extremely strong	Batna

Fig. 6.4. Comparaison par paires entre les différentes alternatives pour chaque critère.

Production scientifique

1. Publication dans des revues internationales

K. Hamouda, R. Adjroudi, 2017. 'WEEE generation and management in Middle East and North Africa (MENA) region: Algeria as a case study'. *Environmental Quality Management*. Vol 26 (4) pp: 5-16. DOI: 10.1002/tqem.21500

K. Hamouda, R. Adjroudi, V. S. Rotter, F. Wang. 2017. 'Methodology for WEEE assessment in Algeria', *International Journal of Environmental Studies*. Vol 74 (4) pp: 568-585. DOI: 10.1080/00207233.2017.1319621

2. Publications dans des actes ou proceedings édités

K. Hamouda; V. S. Rotter; N. Korf. 2016. 'Methodological approach to improving WEEE assessment in emerging economies'. In: *Proceedings of Electronics Goes Green 2016+*. Berlin. DOI: 10.1109/EGG.2016.7829844

3. Publications dans des conférences internationales

K. Hamouda, 2016. 'Handling e-waste in emerging economies: An economic evaluation of e-waste streams'. In: *Proceedings of Wissenschaftliche Konferenz "Abfall- und Ressourcenmanagement."* Berlin 2016.

K. Hamouda, R. Adjroudi. 2014. "Gestion des déchets électroniques dans le monde et en Algerie". *in Proceedings of the 2014 ICIEM* (The Third International Conference on Industrial Engineering and Manufacturing), Batna (Algeria), May 2014.