

Eco'DEEE

ECOCONCEPTION DES PRODUITS ELECTRIQUES ET ELECTRONIQUES EN VUE DU RECYCLAGE

Rapport final

Chef de projet et auteur : Xavier Vital – *Responsable des études écoconception*
Responsable du suivi : Linda Lescuyer – *Directeur général*

CODDE

170 rue de Chatagnon

ZI Centr'Alp

38430 - MOIRANS

Téléphone : + 33 (0)4 76 07 36 46 (Standard)

Date de publication : 29/09/08 Confidentialité : Version publique

N° de la convention ADEME : 0602C0039

Date du contrat : 28/09/06 Durée du contrat : 26 mois

Responsable ADEME : Sarah MARTIN



Sommaire

1.	Résumés et mots clés	4
1.1.	Version Française	4
1.2.	Version Anglaise.....	5
2.	Introduction	6
3.	Etat des lieux des filières de traitement des DEEE	8
3.1.	GEM HF – traitement d'un lave-linge	8
3.2.	PAM – traitement des petits appareils en mélange.....	18
3.3.	Traitement d'un coffret électrique	22
3.4.	Tubes cathodiques	23
3.5.	Téléphone portable – exemple d'une filière de démantèlement	27
4.	Identification des leviers pertinents d'écoconception	35
4.1.	Rappel des objectifs de la tâche	35
4.2.	Méthode	35
4.3.	Analyse de la littérature et des pratiques industrielles de conception	37
4.4.	Proposition de structure de la base de recommandations.....	38
5.	Module de formation des équipes de conception	45
5.1.	Présentation du module de formation	45
5.2.	Test du module de formation auprès des équipes de CODDE	47
5.3.	Test du module de formation auprès des partenaires industriels	47
5.4.	Recherche de solutions d'amélioration	50
6.	Collecte de données sur les taux de recyclage et de valorisation des matières et composants issus des DEEE.....	51
6.1.	Rappel des objectifs de la sous-tâche	51
6.2.	Démarche adoptée	51
6.3.	Analyse de l'existant.....	53
6.4.	Hypothèses adoptées	55
6.5.	Liste des taux à prendre en considération lors du calcul.....	61
6.6.	Mise à jour des données à l'avenir.....	63
7.	Méthodologie de calcul des taux de recyclabilité des équipements électriques et électroniques	65
7.1.	Introduction.....	65
7.2.	Domaine d'application	66
7.3.	Référence normative	66
7.4.	Termes et définitions.....	66
7.5.	Les variables et leurs symboles	70
7.6.	Méthode de calcul	71
8.	Intégration de la méthode Eco'DEEE dans l'outil d'ACV EIME.....	76
8.1.	Calcul des taux de recyclabilité des équipements électriques et électroniques	76
8.2.	Fonctionnalités d'aide à l'écoconception.....	82
8.3.	Calcul des impacts environnementaux d'un scénario de traitement en fin de vie.....	84

Sources 87

Liste des Annexes _____ 89

9. Synthèse _____ 90

1. Résumés et mots clés

1.1. Version Française

Le projet ECO'DEEE vise à prévenir les déchets d'équipements électriques et électroniques par l'écoconception orientée fin de vie. Le présent rapport présente les résultats de ce projet de recherche et a pour vocation de partager le retour d'expérience et les choix méthodologiques qui y ont été définis.

Ce projet créé à l'initiative de CODDE et soutenu par l'ADEME, rassemble 5 partenaires industriels : Groupe Fagor-Brandt, Neopost Technologies, Sagem Communications, Groupe SEB, Schneider Electric. Trois opérateurs de traitement ont contribué aux réflexions : Derichebourg Environnement, Galloo, Triade Electronique.

Les livrables du projet sont :

- un état des lieux des procédés de traitement possibles pour les produits cibles des observations (vision Européenne) ;
- Un recueil d'information concernant les leviers d'optimisation des couples produits et procédés de traitement en fin de vie, un module d'information sur l'écoconception orientée fin de vie à destination des concepteurs des entreprises ;
- La mise en place d'une méthodologie de calcul des taux de recyclabilité des équipements électriques et électroniques ;
- L'intégration de cette méthodologie dans l'outil d'analyse du cycle de vie EIME.

La première étape de la démarche était de réaliser l'état des lieux des procédés de traitement des déchets électriques et électroniques, inclus ou non dans le champ d'application de la même directive. Des visites de sites ont été effectuées permettant d'identifier les filières de traitement les plus usuelles. Les observations et les échanges avec les opérateurs de traitement ont permis d'identifier les critères de conception des équipements présentant des freins au recyclage. Les limites des procédés de traitement ont pu être analysées.

La deuxième étape de la démarche consistait à identifier les leviers pertinents d'écoconception en vue du recyclage. L'existant et notamment les recommandations d'écoconception orientée fin de vie mises en œuvre au sein des entreprises partenaire a été analysé et mis en commun avec les observations terrain.

La troisième étape de la démarche a été le développement d'un module de formation à destination des concepteurs. Convaincus qu'il est nécessaire de comprendre pour mieux agir, ce module de formation s'est voulu pragmatique et inclus de nombreuses illustrations du devenir des équipements en fin de vie.

La quatrième étape a consisté à rassembler l'ensemble des expériences du projet autour d'une **méthodologie de calcul du taux de recyclabilité potentiel des équipements électriques et électroniques** dès leur conception. Ayant vocation à être partagée, cette méthodologie a été incluse dans le logiciel d'analyse du cycle de vie EIME, outil de référence pour le secteur électrique et électronique permettant ainsi de la partager avec un grand nombre d'entreprises. Ces développements ont en outre permis de développer le calcul des impacts environnementaux associés au traitement de DEEE en fin de vie dans une filière représentative des techniques actuelles.

Mots clés : Ecoconception - Fin de vie - Equipements électriques et électroniques – Formation - Concepteurs – Outil.

1.2. Version Anglaise

The Eco'DEEE aims in developing ecodesign tools in order to improve the end of life of electrical and electronic equipments. This report presents the results of this project and gives the opportunity to share the developed methods.

Eco'DEEE project was created by CODDE and is supported by the ADEME. 5 industrial partners where included in the consortium: Groupe Fagor-Brandt, Neopost Technologies, Sagem Communications, Groupe SEB, and Schneider Electric.

Three recyclers included the group as partners and have contributed to the developments: Derichebourg Environnement, Galloo, Triade Electronique.

The deliverables of the project are: a presentation of the different possible treatments for the four products selected as target of the observations (international vision), a collection of information showing the optimisation levers of the couples products / processes, a training module to inform designers about ecodesign for end of life, the updating of the software EIME, a tool that helps to ecodesign the products.

The first step of the method is to realise a presentation of the different possible treatments for WEEE (WEEE in the meaning of WEEE in the scope of the WEEE directive but also outside this scope). The four products target of the observations had been selected in agreement with the members of the project ECO'DEEE during the launching meeting, it consists of a washing machine, a vacuum cleaner, an enclosure (or cabinet) for electrical distribution (and its content), and a terminal capable of communication and printing (a kind of fax). Visits of WEEE treatment centers have been done beforehand.

The second step of the project consists in the identification of the optimisation levers, the end of life ecodesign recommendations already in place in the partner industries have been analysed. For other optimisation levers, this step is under achievement.

The third step of the project consists in the development of a training sessions dedicated to designers.

The forth step consists in regrouping all the experience of the project in order to build a methodology for the calculation of the recycling potential of electrical and electronic equipments. This calculation method has been implemented into the EIME LCA software.

Keywords : Ecodesign - End of Life – Electrical and electronic equipment – Training - designers – Tool.

2. Introduction

ECO'DEEE est un projet initié par CODDE qui vise à trouver les axes d'amélioration des produits électriques et électroniques afin de faciliter leur recyclage et leur dépollution. Ce projet devrait permettre à terme d'identifier les leviers d'optimisation de la filière DEEE et ainsi contribuer à réduire les coûts de traitement de ces déchets.

La société CODDE est le centre d'expertise international du groupe Bureau Veritas en matière d'évaluation des impacts environnementaux des produits et d'écoconception. Créée en janvier 2003, CODDE a développé un savoir faire spécifique dans le domaine des équipements électriques et électroniques.

CODDE accompagne également des entreprises de la plasturgie, de la mécanique ou du textile. CODDE cumule 25 années d'expérience en écoconception grâce à ses experts, en entreprise au sein des équipes projets. Par ailleurs, au travers de la méthodologie EIME, CODDE dispose d'une base de données sur les impacts des composants, matériaux ou procédés de transformation les plus courants, lui permettant d'analyser tout type de produits et d'apporter aux entreprises une quantification de leur progression.

Concrètement, le projet ECO'DEEE se décline en 4 étapes :

- Réalisation d'un état des lieux des traitements possibles pour les Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques ;
- Développement d'un module de sensibilisation et d'information sur les filières de traitement des DEEE adressé et dispensé aux concepteurs ;
- Recherche des évolutions de l'outil d'écoconception, nommé EIME, et formation des concepteurs à son usage ;
- Création d'un recueil d'informations concernant les leviers d'optimisation des produits et les gains potentiels escomptés sur le plan environnemental et sur le plan économique.

Le projet ECO'DEEE est soutenu et cofinancé par l'ADEME.

Les partenaires industriels déjà engagés dans le projet :

- Le groupe Fagor-Brandt ;
- Neopost Technologies ;
- Sagem Communications ;
- Groupe SEB ;
- Schneider Electric.

Ces partenaires se sont associés au projet, conscients de l'intérêt et de l'impact à long terme de ce sujet. L'écoconception étant avant tout l'affaire des concepteurs, l'ensemble des développements présentés dans ce rapport ont eu pour préoccupation de leur apporter les outils nécessaires pour :

- Comprendre les processus de traitement des Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques ;
- Identifier de façon précise les contraintes associées à ces processus ;
- Imaginer et mettre en œuvre des solutions d'amélioration sur les produits en développement, leurs permettant pour un même niveau de qualité une meilleure adéquation aux filières de retraitement.

Les industriels partenaires participent ainsi à une étude qui à terme permettra d'optimiser le traitement des DEEE et donc de réduire les coûts de recyclage.

Le projet implique également un partenaire académique, le laboratoire G-SCOP de Grenoble, en particulier en charge de l'identification, la collecte et l'homogénéisation des taux de recyclabilité des matériaux et composants cibles.

Le champ de l'étude couvert par le projet se limite au traitement des DEEE. L'étape de collecte et le taux de collecte des équipements ne sont de manière générale pas considérés dans ce rapport.

3. Etat des lieux des filières de traitement des DEEE

La première étape du projet Eco'DEEE consistait à réaliser l'état des lieux des procédés de traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) suite à la mise en place de la filière. Les DEEE sont considérés au sens large dans cette étude, incluant ainsi les équipements n'étant pas nécessairement dans le champ d'application de la directive. L'objectif principal était d'identifier un scénario de traitement représentatif des pratiques actuelles.

Quatre produits cible ont été identifiés par les partenaires du projet ECO'DEEE afin d'orienter les observations. Il s'agit des produits suivants :

- un lave-linge ;
- un aspirateur ;
- une armoire électrique (avec son contenu) ;
- un terminal d'impression communicant.

Trois principales chaînes potentielles de procédés de traitement des DEEE ont été identifiées. Il s'agit du démontage manuel intégral, du démontage manuel des polluants + broyage + tris automatisés, et du Déchiquetage des produits + dépollution manuelle des débris + broyage + tris automatisés.

Une série de visites de site ont été réalisées permettant d'identifier le devenir en fin de vie probable des différents produits cités. Les observations terrain ont en outre permis d'observer le traitement d'autres produits et d'élargir les observations par catégories d'équipements :

- GEM HF (Gros Electroménagers Hors Froid) ;
- GEM F (Gros Electroménagers Froid) ;
- PAM (Petit Appareils en Mélange) ;
- Ecrans ;
- Téléphonie.

Le chapitre suivant présente les filières de traitement observées.

3.1. GEM HF – traitement d'un lave-linge

Les gros électroménagers hors froid représentent environ 50 % en masse des DEEE collectés en France en 2006 selon l'ADEME. Les lave-linges font ainsi partie du flux principal de DEEE à traiter conformément aux exigences de la directive DEEE.

Les chapitres suivants décrivent la fin de vie des lave-linges, c'est-à-dire leur éventuelle réutilisation puis les différentes étapes de leur traitement en fin de vie.

Les informations contenues dans ce chapitre, notamment les illustrations, sont issues des observations faites sur les sites de GALLOO France d'Halluin, de REMONDIS Electrorecycling de Lünen et de Triade Electronique à Gonesse.

3.1.1. Composition moyenne d'un lave-linge

Le poids moyen des appareils de lavage (vaisselle, linge) est de l'ordre de 60 kg. Le lest en béton des lave-linge représente presque 30% du poids de l'appareil. La part des plastiques tend à s'accroître progressivement, de 12% en 2000 à plus de 17% en 2005.

Cette augmentation s'accompagne d'une réduction du nombre de pièces plastiques utilisées. A titre d'exemple, les socles de certains lave-linge qui étaient composés d'une trentaine de pièces différentes il y a 5 ans sont maintenant généralement monoblocs.

La principale matière plastique utilisée est le PP (Polypropylène) (~14% du poids total des appareils). On retrouve aussi de l'ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrène) ou du PS (Polystyrène) (~2,5%) et d'autres plastiques (~1%). On trouve des charges à base de carbonates et fibre de verre dans le PP en quantités significatives dans les appareils de lavage.

Ces données sont issues de fabricants de Gros Electroménagers.

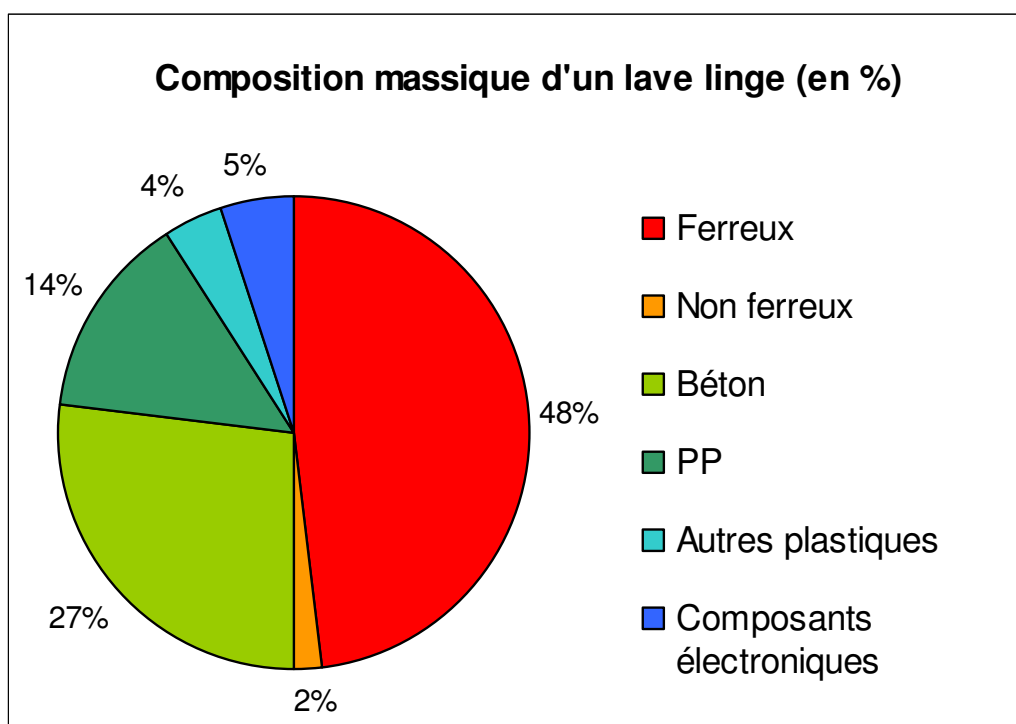


Figure 1 – composition massique moyenne d'un lave linge

Principaux composants d'un lave-linge

Afficheur digital



Pompes



Volant en aluminium



Tambour en inox



Lest (ici en fonte, le plus souvent en béton)



Câbles



Moteur



**Restes : Mousses
Liens...**



Plastiques



Carcasse en acier



3.1.2. Réutilisation

Selon le rapport de synthèse de l'ADEME sur la filière de traitement des DEEE en France en 2006, près de 9% des DEEE collectés ont fait l'objet d'un reconditionnement en vue d'une remise sur le marché. La totalité des équipements réemployés étaient des GEM.

Les acteurs de l'insertion étaient présents historiquement sur les activités de réemploi, de collecte et de traitement des DEEE avant le démarrage de la filière. Le réemploi est aujourd'hui de manière réglementaire la priorité de la filière mise en place. Plusieurs accords notamment nationaux avec des éco-organismes ont été signés, de façon à permettre l'accès aux gisements de DEEE collectés aux acteurs du réemploi. Ces acteurs (ENVIE,EMMAUS...) ont ainsi pu continuer leur activité à vocation sociale, en préservant leur accès au gisement et en acquérant la garantie que les DEEE issus de leur activité, et non reconditionnables, puissent réintégrer la filière de traitement des DEEE. Plus de cent points de collecte ont été recensés dans le domaine de l'économie sociale et solidaire.

En moyenne, avec 5 lave-linges en fin de vie, les travailleurs reconditionnent un lave-linge en état de fonctionner. 4 lave-linge sur 5 sont donc triés broyés et recyclés.

3.1.3. Filière Broyage

Les lave-linge qui ne sont pas réemployés sont retraités. Ils finissent donc pour la plupart dans une filière de traitement par broyage. Les étapes de traitement peuvent être présentées comme suit. La dépollution peut se faire manuellement avant broyage du produit ou peut se dérouler post désintégration (Broyage grossier) :

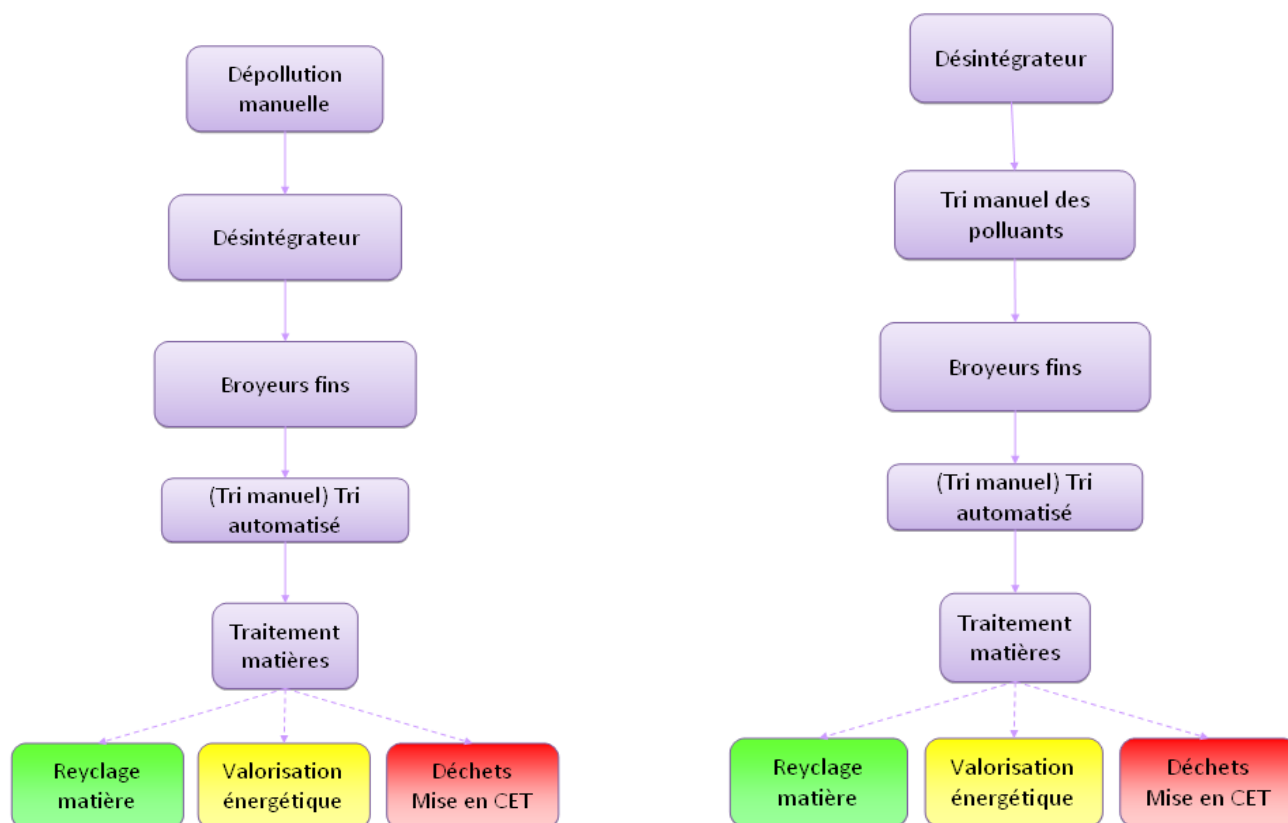


Figure 2 – Description des deux principaux scénarios de traitement des GEM HF

De manière générale, les lave-linges font partie d'un flux constitué d'autres gros électroménagers blancs hors froid (comme par exemple les gazinières et les lave-vaisselle), ils sont donc dépollués, déchiquetés, et broyés, ensembles.

3.1.4. Dépollution pré-désintégrateur

Les opérateurs retirent manuellement les câbles et condensateurs des lave-linges. Les lests en fonte de certains lave-linge peuvent casser les marteaux de broyeurs moyens, pour les broyeurs moyens, il faut donc au préalable retirer ce lest en fonte.

Lave-linges en attente de traitement



Condensateurs extraits manuellement



Câbles retirés manuellement



3.1.5. Désintégrateur

Lors de cette étape, les lave-linge sont le plus souvent traités avec d'autres équipements de la même famille dans le cadre de campagnes de traitement des gros électroménagers blancs hors froid.

Exemple de chaine utilisée dans un désintégrateur



3.1.6. Dépollution post-désintégrateur

Le flux de broyats post désintégration passe devant des opérateurs en charge du retrait manuel des polluants.

Passage du flux de broyats sur une table autorisant un tri sélectif manuel des polluants



Les polluants à retirer des lave-linge sont les condensateurs, et pour les lave-linge plus récents l'afficheur digital, et l'éventuelle carte électronique.

Peuvent aussi être retirés lors de cette étape :

- les mousses qui gênent le tri ultérieur des matières ;
- le moteur (qui contient une quantité de cuivre intéressante et qui peut être revendu à un ferrailleur en l'état) ;
- les câbles (qui sont retraités à part car ils contiennent une grande quantité de cuivre) ;
- les pièces en aluminium (exemple du volant en aluminium) ou en inox (exemple du tambour en inox) si elles sont assez massives pour être financièrement intéressantes.

3.1.7. Granulateur

Après la dépollution manuelle ou après le désintégrateur, les éléments sont broyés plus finement (en copeaux de 3 cm) afin que leur taille soit suffisamment petite pour convenir aux procédés aval.

Broyeur fin ou granulateur



Un trieur est installé à la sortie de ce broyeur permettant de retirer les laines de cuivre.

Trieur



3.1.8. Tri automatisé des différentes fractions

Le tri des différentes fractions de matières est totalement automatisé. Les étapes de séparation varient d'une installation à l'autre mais les principes mis en œuvre sont généralement assez proches.

La fraction légère est aspirée



La fraction lourde tombe



- A- La fraction légère contient principalement des films plastiques, des papiers et des cartons qui gênent le tri ultérieur de l'autre fraction. Elle tombe dans un cyclone puis dans un big bag, elle peut être ensuite incinérée.
- B- La fraction lourde contient le reste à savoir les ferreux les non ferreux (principalement de l'aluminium), les plastiques plus lourds, et quelques cartes électroniques qui auraient pu passer au travers de l'étape de dépollution.

La fraction lourde passe ensuite sous un aimant qui retire du flux tous les métaux ferreux.

Reste alors l'inox, quelques cartes électroniques, les plastiques et les non ferreux. De ce flux sont retirées les cartes électroniques.

Certaines installations mettent en œuvre des systèmes alliant une caméra numérique et un détecteur de métaux permettant ce tri. La caméra détecte le vert et le marron, tandis que le détecteur de métaux détecte la présence de métaux, s'il est détecté simultanément « vert ou marron » et « présence de métaux » alors le composant est éjecté du flux.

Le flux se compose alors principalement d'inox, d'aluminium, de quelques autres non ferreux, des plastiques et des gravas.

De ce flux sont retirés par courants de Foucault les métaux non ferreux. Restent dans le flux les plastiques ainsi que les gravas de béton et autres impuretés.

Tri par courant de Foucault



Enfin, il reste l'aluminium, l'inox et quelques impuretés de non ferreux comme du cuivre du laiton et de l'étain. Ces copeaux de métaux non magnétiques sont rebroyés plus finement. Ils sont ensuite triés par tri densimétrique, l'aluminium et l'inox d'un côté, les impuretés de l'autre.

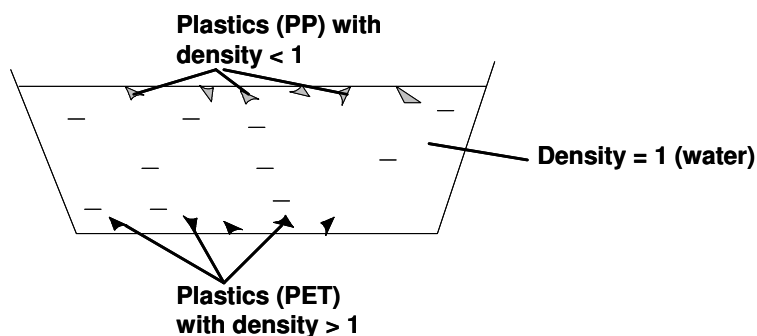
Tri densimétrique (tables vibrantes- voie sèche)



Les plastiques, et autres impuretés sont ensuite séparés des gravas par tri densimétrique. Les gravas sont pour la plupart finement broyés, ils sont revendus comme sable pour les chantiers de construction.

Certains plastiques issus des broyats de gros électroménagers blancs hors froid sont triés par des procédés de tri densimétrique afin d'être recyclés.

Tri densimétrique (voie humide)



3.2. PAM – traitement des petits appareils en mélange

Les PAM représentent 9% des DEEE en tonnage, selon l'ADEME. Tous les PAM (Petits appareils en mélange) sont traités ensemble qu'il s'agisse d'un aspirateur, d'un grille pain ou d'une cafetière.

Les chapitres suivants décrivent les différentes étapes de l'élimination des PAM. N'est décrite dans ce chapitre que la chaîne d'élimination par déchiquetage, broyage et tris automatisés qui semble être la filière la plus probable de fin de vie de ces appareils compte tenu des coûts élevés de main d'œuvre dans la zone observée (Europe). L'étape de collecte n'est pas incluse. Les informations concernant les différents procédés et les photos contenues dans cette fiche sont relatives au site de REMONDIS Electrorecycling.

3.2.1. Composition moyenne du flux des PAM

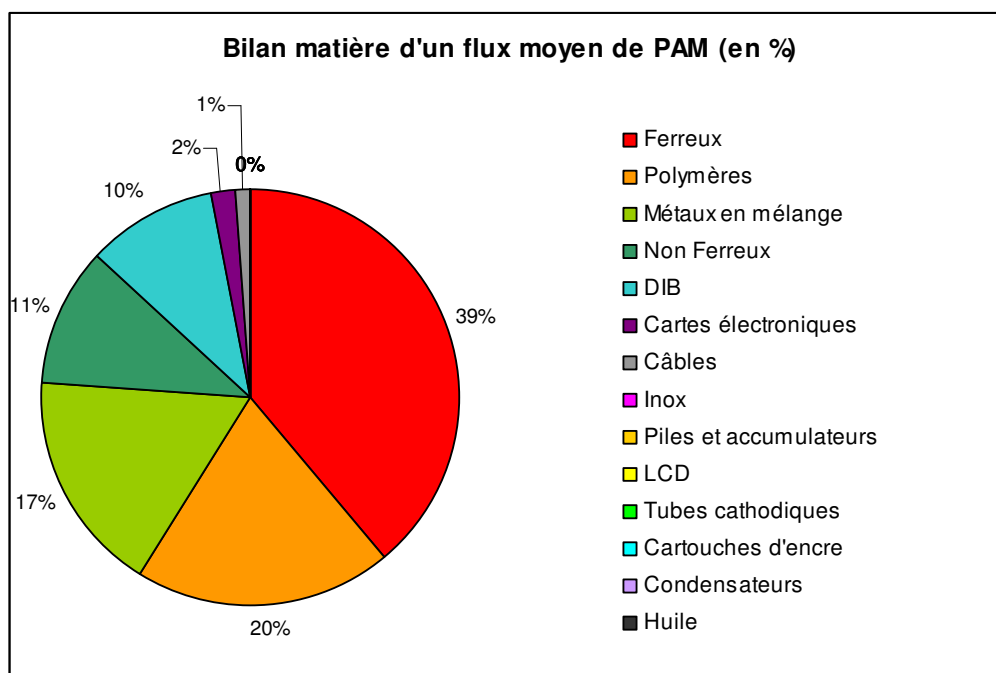


Figure 3 – composition massique moyenne d'un flux de PAM

Cette composition est issue de l'étude menée par SCRELEC et d'estimations de professionnels du recyclage.

3.2.2. Démolition

Les PAM sont broyés grossièrement dans un déchiqueteur. Cette étape permet de casser les liens entre les différents matériaux.

Petits Appareils en Mélange



Chargement des PAM dans un déchiqueteur



3.2.3. Dépollution

La dépollution s'effectue manuellement après le déchiqueteur comme on peut le voir sur la photo page suivante :

Retrait sélectif des polluants du flux de broyats



Les polluants, composants ou matières extraits sont listés ci-dessous :

- Le cuivre est retiré car il gêne le recyclage de l'aluminium et de l'acier en diminuant leur résistance à la corrosion (il reste toutefois un peu de cuivre même après ce tri manuel) ;
- Les condensateurs susceptibles de contenir des PCB (Polychlorobiphényles) sont retirés conformément à la législation ;
- Les piles et batteries sont retirées du flux conformément à la législation ;
- Les grandes cartes électroniques (surface supérieure à 10 cm²) sont retirées conformément à la législation (il en reste encore après le tri manuel) ;

Cette étape sert aussi à retirer du flux tout ce qui ne doit pas s'y trouver et qui ne sera donc pas trié par les procédés aval à savoir les écrans LCD, les DIB, les cartouches d'encre...

Cette étape est modulable, si le cuivre n'a plus une valeur financière assez intéressante, il ne sera plus récupéré ici. Si la production d'un composant ne suit pas la demande et que ce composant atteint une valeur intéressante à la revente alors il pourra éventuellement être récupéré à cette étape.

3.2.4. Broyage

Après la dépollution manuelle, un broyeur broie plus finement (en copeaux de 3 cm) les éléments pré broyés afin que leur taille soit suffisamment petite pour convenir aux procédés aval.

3.2.5. Tri des différentes fractions

Le tri des différentes fractions de matières est totalement automatisé. Le traitement est similaire à celui décrit pour la séparation des matières issues du traitement des GEM (cf chapitre 3.1.8).

3.2.6. Filières avals et recyclage

Selon ce qui a été observé sur le terrain, les modes de traitement pour les différentes fractions sont les suivants :

Catégorie	Elimination spécifique	Valorisation matière	Valorisation énergétique	Traitement sans valorisation
Plastiques fraction légère			x	x
Plastiques fraction lourde + restes			x	x
Cartes électroniques (légères et lourdes)	x			
Batteries	x			
Ferreux	x			
Condensateurs				x
Aluminium / Inox		x		
Cuivre		x		
Cuivre Laiton Etain...		x		
Câbles	x			
Piles	x			

Tableau 1 – Modes de traitement des différentes fractions de PAM

Selon l'étude SCRELEC Initiative Recyclage publiée en septembre 2004, le taux de recyclage et de valorisation niveau 2 pour les PAM sont respectivement de 82.9% et de 83.9%. Selon cette même source, les taux de recyclage et de valorisation niveau 3 pour les PAM sont respectivement de 73.2% et de 76.1%.

3.3. Traitement d'un coffret électrique

Ce chapitre présente les observations de traitement de la fin de vie du disjoncteur qui est l'un des éléments essentiels d'une armoire électrique.

Ce chapitre décrit les différentes étapes de valorisation des disjoncteurs en fin de vie. Ne sont décrites dans cette fiche que la réutilisation des disjoncteurs et la valorisation qui sont deux pratiques courantes pour ce genre d'équipement. L'étape de collecte n'est pas incluse.

Les informations contenues dans ce chapitre, notamment les photos, les pourcentages de valorisation matière et énergétique, et certains coûts sont relatifs au site REMONDIS Electrorecycling de Lünen et au site Triade Electronique de Gonesse.

3.3.1. Composition moyenne d'un disjoncteur

La composition des disjoncteurs récents est représentée dans le graphique ci-dessous :

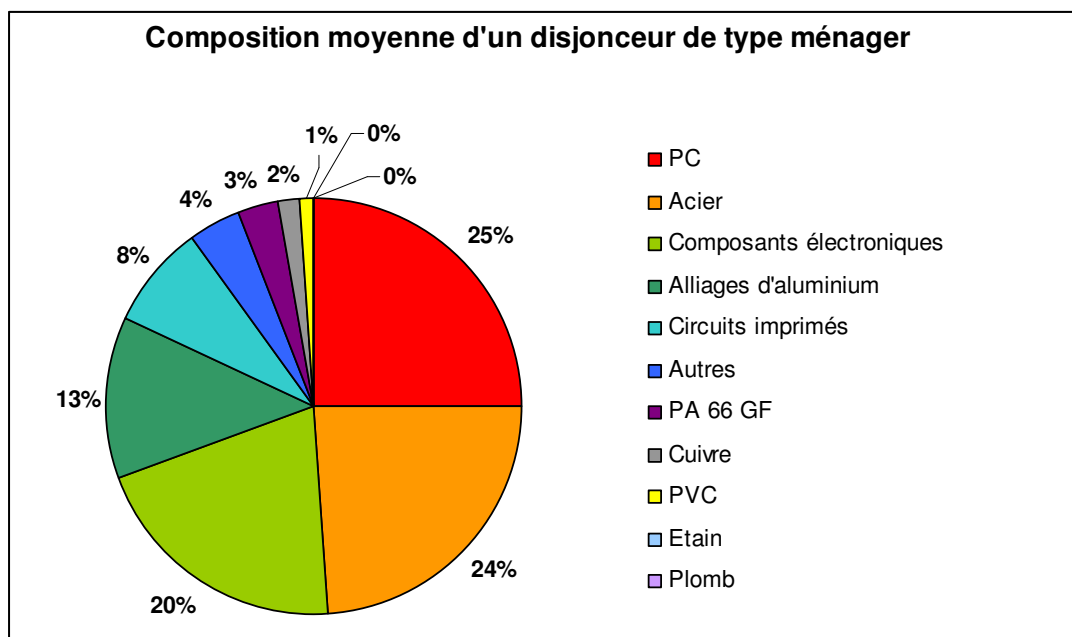


Figure 4 – composition massique moyenne d'un disjoncteur

Cette composition est issue de fabricants de disjoncteurs.

3.3.2. Réutilisation

Les petits disjoncteurs, bien qu'utilisés par des ménages sont des DEEE professionnels, en effet, les petits disjoncteurs sont loués par EDF (Electricité De France) aux particuliers. Lorsqu'ils sont hors d'usage ou lorsque le bâtiment dans lequel ils sont installés est détruit, EDF récupère les disjoncteurs. EDF passe donc des contrats avec des opérateurs de traitement pour le retraitement de ses appareils.

Une partie de ces appareils (les plus récents) sont triés afin d'être réutilisés. Le tri consiste à séparer les équipements en état de fonctionnement (un test rapide est effectué), de ceux qui sont abîmés ou ne fonctionnent pas.

Les disjoncteurs mis au rebus sont ensuite traités comme des PAM (déchiquetage, tri manuel, broyage puis tri automatisé).

Les autres disjoncteurs sont envoyés chez un réparateur qui reconditionne 1 disjoncteur opérationnel à partir de 2 disjoncteurs en fin de vie.

3.3.3. Procédés de traitement en fin de vie

Les disjoncteurs en fin de vie sont inclus dans le flux des PAM (Petits Appareils en Mélange). La succession des procédés mis en œuvre est détaillée dans le chapitre relatif au traitement des PAM.

Les étapes de traitement à considérer sont donc les suivantes :

- Dépollution (post désintégration) ;
- Broyage fin ;
- Séparation automatisée des matières ;
- Envoi des différentes fractions dans un centre de traitement adapté.

Les détails des procédés mis en œuvre pour le traitement de ce type d'équipements est présenté dans le chapitre 3.2.

3.4. Tubes cathodiques

Les télévisions et moniteurs représentent 14 % des DEEE selon l'ADEME. Ce chapitre a pour objet de décrire les différentes étapes de valorisation d'une télévision à tube cathodique. N'est décrite dans cette fiche que la filière de valorisation commune des télévisions à tubes cathodique à savoir la dépollution avec le traitement spécial du tube cathodique, et le broyage de la coque plastique. L'étape de collecte n'est pas incluse dans les observations. Les informations contenues dans cette fiche, notamment les photos et les procédés, sont relatives au site GALLOO France d'Halluin, au site Regain Eco-plast de Fourchambault, au site REMONDIS Electrorecycling de Lünen et au site Triade Electronique de Gonesse.

3.4.1. Composition moyenne d'une télévision

Le poids moyen des télévisions à tubes cathodiques est en nette augmentation. Il atteint couramment 30 à 50 kg. La proportion de plastiques est d'environ 20%. Les plastiques sont constitués à 90% d'HIPS non ignifugé [2].

Un nombre important de télévisions qui arrivent chez les recycleurs sont encore en bois, mais dans la suite de cette étude, nous travaillerons sur un modèle de 40 kg environ avec une coque en plastique.

Câbles

Bobinages



Coques plastiques



Tube cathodique



Cartes électroniques



Haut parleur



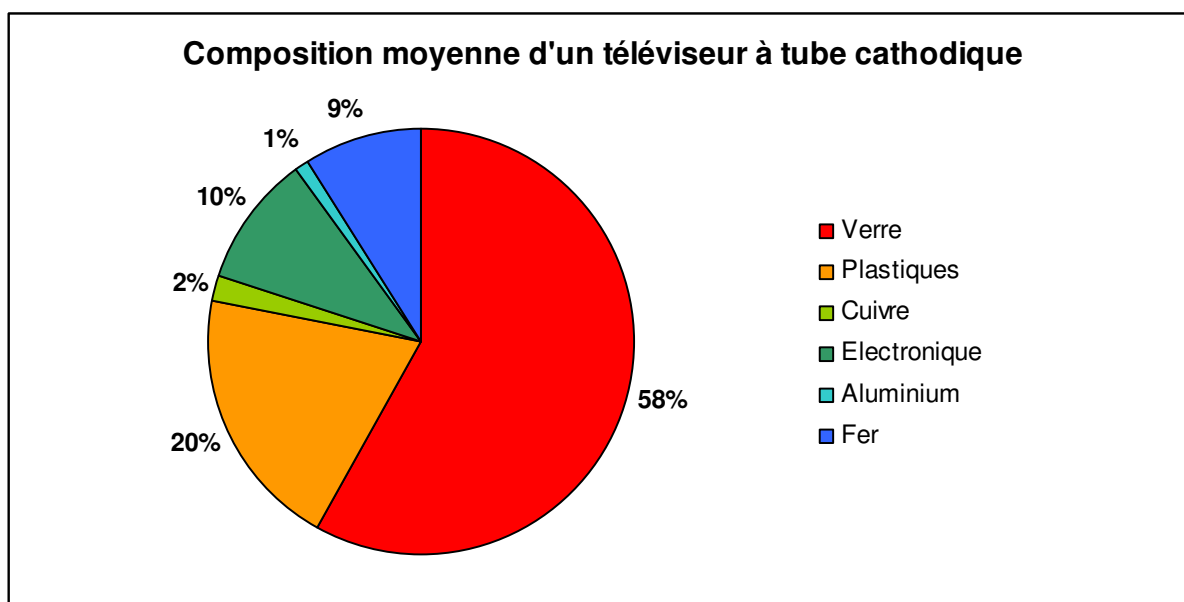


Figure 5 – composition massique moyenne d'un téléviseur à tube cathodique

La composition moyenne du téléviseur est issue de données de fabricants et de professionnels de la fin de vie.

3.4.2. Dépollution

3.4.2.1. Etapes de dépollution

Une part importante des composants constituant l'écran doivent être retirés :

- Le tube cathodique ;
- Les câbles ;
- La carte électronique ;
- La coque plastique si elle contient des retardateurs de flamme bromés.

Les éléments non polluants mais déjà séparés à la dépollution sont :

- La coque en plastique si elle ne contient pas de retardateur de flamme bromés ;
- Le déviateur ;
- Le canon à électrons.

3.4.2.2. Quelques informations sur le traitement du tube cathodique

Le procédé Vicor (séparation des verres de dalle et de cône puis aspirations des luminophores) permet d'obtenir une bonne qualité de verre. Ce procédé existe au stade industriel, il est décrit et illustré ci-après.

- Le broyage du tube cathodique avec lavage du verre et récupération des luminophores par voie humide ne permet pas de différencier le verre de dalle moins concentré en plomb du verre de cône plus concentré en plomb, il permet toutefois de récupérer correctement les luminophores, ce procédé est au stade industriel ;

- L'incinération de ces verres en hauts fourneaux permettrait une réutilisation de la silice, toutefois ce procédé est encore à l'étude, il n'est toujours pas autorisé par la législation Européenne.

Enfin, le procédé Pathé est en passe d'obtenir les autorisations pour être industrialisé, actuellement il est toléré par la commission européenne. Il consiste à broyer le tube, à récupérer les luminophores par voie humide enfin un laser permet de différencier et de trier le verre de dalle et le verre de cône.

PROCEDE VICOR

1- Séparation du verre du cône



2- Aspiration des particules



La dépollution des particules peut être manuelle ou automatisée.

3- Obtention de poudre de verre



4- Refabrication d'un tube cathodique



Tubes cathodiques refabriqués



Images tirées du Film commercial d'El Retur éco organisme Norvégien.

3.4.2.3. Outils utilisés

Les principales contraintes observées étaient liées à la diversité des liens utilisés par les différents constructeurs. Le démontage manuel nécessite une grande variété d'outils afin qui freinent les temps de séparation des composants et matières.

Les outils utilisés sont généralement les suivants :

- Tournevis pneumatiques et embouts interchangeables ;
- Tournevis plat ;
- Perceuses et disqueuses ;
- Sécateurs ;
- Marteau.

Diversité des embouts



Le retour d'expérience des observations effectuées sur les sites ont permis l'identification de bonnes pratiques d'écoconception destinées à faciliter le démontage des sous ensembles en vue de la dépollution.

3.5. Téléphone portable – exemple d'une filière de démantèlement

Les avancés technologiques sont la cause de l'obsolescence de plus en plus rapide des téléphones portables (durée de vie de 1 à 4 ans). Pour cette raison, ils sont en forte augmentation dans les DEEE. La grande diversité des matériaux qu'ils contiennent est un obstacle à leur revalorisation. Il est donc intéressant de se pencher sur les points à améliorer.

Ce chapitre a pour objet de décrire les différentes étapes de valorisation du téléphone portable. N'est décrite dans cette fiche que le scénario de démantèlement des téléphones portables. L'étape de collecte n'est pas incluse.

Les informations contenues dans ce chapitre, notamment les photos, les durées de démontage, sont tirées des observations menées sur le site de Regain Eco-plast.

3.5.1. Démantèlement

3.5.1.1. Bilan matière

Accumulateur



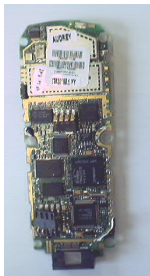
Afficheur LCD



Antenne



Carte électronique



Coque plastique



Clavier et pièce plastique avec insert métallique



Les téléphones actuellement en fin de vie ont été mis sur le marché en l'an 2000 environ.

Le tableau suivant fait ressortir la composition d'un téléphone moyen, modèle virtuel de 5 constructeurs (Alcatel, Motorola, Nokia, Sagem, et Trium) produit en 2001. Pour ce téléphone moyen les poids des différentes fractions obtenues sont :

Sous-ensembles obtenus	Masse (g)
Coque plastique	54
Carte électronique	44
Ecran LCD	5
Batterie	44
Antenne	5
Ecouteur	4
Déchets dont : Touches caoutchouc Mousses Inserts métalliques dans coque...	27
Téléphone entier avec batterie	183

Tableau 2 – Répartition des différents composants

Ces chiffres sont issus de l' « Etude sur la valorisation des téléphones portables », étude réalisée par Regain Eco-plast et Screlec en novembre 2001. Le téléphone portable étudié dans cette étude est un téléphone virtuel (Alcatel, Motorola, Nokia, Sagem et Trium) moyen. Cette étude a été réalisée par Eco-Plast et Screlec en Novembre 2001 (Elle donne un portable de 174 grammes sans antenne et sans écouteur).

Deux données obtenues sur le site de Regain Eco-Plast à savoir « une antenne pèse 5 grammes » et « un écouteur pèse 4 grammes ».

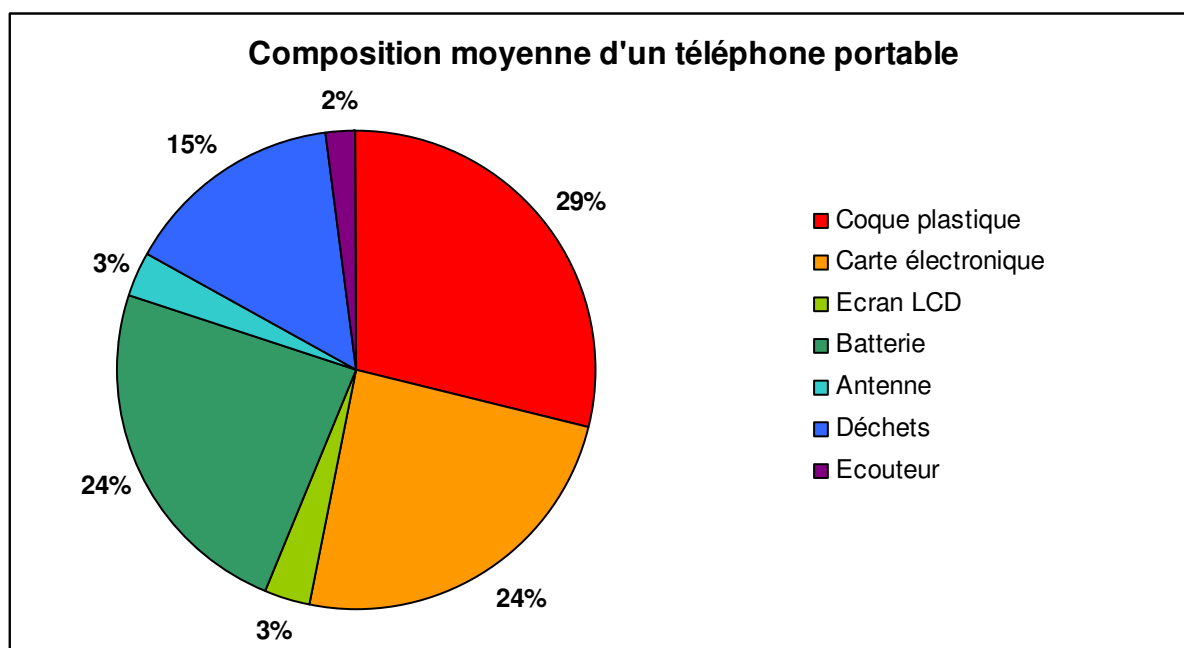


Figure 6 – composition massique moyenne d'un téléphone portable

3.5.1.2. Etapes de démantèlement

Le démantèlement d'un téléphone portable dure en moyenne 1 minute 45 secondes. Le principal obstacle à la réduction de cette durée est la grande diversité des portables qui empêche le démontage en série.

Les étapes de démantèlement d'un téléphone portable varient d'un modèle à l'autre. Les principales différences entre les modèles sont notamment la présence ou l'absence d'une antenne, la présence ou l'absence de mousses (de protection de l'écran LCD), les coques vissées ou clipsées, les liens entre les éléments (l'écouteur et l'écran LCD peuvent être accrochés à la coque ou à la carte électronique, etc...).

Malgré cette diversité, les différentes étapes de démantèlement se déroulent globalement ainsi :

1- Batterie retirée et triée



2- Séparation face avant et face arrière

Séparation face avant et face arrière vissées



Séparation face avant et face arrière clipsées



3-Touches triées et jetées



4- Carte électronique retirée et triée

Carte électronique posée



Carte électronique vissée



Les cartes électroniques sont envoyées dans une filière spécialisée.

Les éléments contenant du Béryllium sont retirés car le Béryllium, et les composés et alliages de béryllium provoquent une maladie appelée la Béryllose. Cette maladie existe sous deux formes forme aiguë et forme chronique, dans tous les cas elle est mortelle. Certains recycleurs de cartes ayant des contrats avec les opérateurs de traitement n'acceptent donc pas de cartes contenant du Béryllium.

5- Antenne retirée et triée,

Selon la conception du téléphone, l'antenne peut être dévissée à la main, au tournevis pneumatique ou cassée à l'aide d'un marteau comme sur cette photo :



6- Ecran LCD retiré et trié

Ecran LCD sur carte électronique



Ecran LCD sur coque



Pour plus d'informations sur la composition et le recyclage d'un écran LCD, le document [2] référencé dans la bibliographie est disponible.

7- Mousses retirées et jetées



8- Autres composants séparés et jetés (interface plastique, écran plastique, connecteurs de touches, étiquettes...),

Ecran plastique cassé puis jeté



Connecteurs touches cassés et jetés



9- Identification du plastique de la face avant triée,

L'identification des plastique demande un certain temps, les opérateurs se fient pour l'instant encore au marquage des plastiques instauré par les normes ISO 1043 ET ISO 11 469. Ce marquage doit être bien visible.

10- Ecouteur retiré et trié,

Ecouteur sur carte électronique



Ecouteur sur coque



11- Inserts métalliques retirés et jetés,



Comme on peut le voir sur la photo ci-dessus à gauche, retirer les inserts métalliques induit la production de déchets plastiques.

12- Identification du plastique de la face arrière, triée.

A noter que certaines étapes ne sont réalisées que pour certains modèles.

3.5.1.3. Durée des étapes

Les étapes de démantèlement d'un téléphone portable varient d'un modèle à l'autre. Les principales différences entre les modèles sont notamment la présence ou l'absence d'une antenne, la présence ou l'absence de mousses (de protection de l'écran LCD), les coques vissées ou clipsées, les liens entre les éléments (l'écouteur et l'écran LCD peuvent être accrochés à la coque ou à la carte électronique, etc...).

Afin d'identifier les freins au démontage, les étapes les plus longues du démantèlement sont décrites ci-dessous.

Dévisser les deux coques pour les séparer est particulièrement long (10 secondes), tandis que des coques clipsées sont séparées en 2 secondes.

Préférer les clips aux vis évite aussi d'avoir à retirer des inserts métalliques, ce qui permet une économie de temps et de matière.

Parfois la carte électronique est vissée (à la coque ou à une interface plastique), l'étape de séparation de la carte électronique prend alors plus de temps que si celle-ci était simplement positionnée.

L'écouteur est plus facile à démonter lorsqu'il est fixé sur la carte électronique plutôt que sur la face avant.

A l'inverse, l'écran, LCD est plus facile à retirer lorsqu'il est fixé sur la face avant plutôt que sur la carte électronique.

Retirer les mousses de protection de l'écran LCD est particulièrement long, elles sont donc à éviter.

Une autre étape de 15 secondes environ, qui consiste à retirer les éléments contenant du Béryllium pourrait être évitée en choisissant des cartes sans Béryllium.

4. Identification des leviers pertinents d'écoconception

4.1. Rappel des objectifs de la tâche

La présente tâche visait initialement à réviser, remettre à jour et éventuellement compléter les bases de recommandations orientées fin de vie existantes. Cette remise à jour devait intégrer les travaux récents en écoconception, les évolutions des performances des filières de valorisation, et autant que possible certains développements technologiques actuels de filières de valorisation.

A ces objectifs initiaux, se rajoutent les spécifications des partenaires industriels qui souhaitent pouvoir utiliser la base de recommandations dans les équipes de conception. On peut résumer les exigences exprimées par les industriels comme suit :

La base de recommandations doit :

- parler le langage de la conception, c'est-à-dire s'intéresser aux matériaux, aux liens, à l'architecture plutôt qu'aux procédés de valorisation ;
- Rester simple, c'est-à-dire mettre à la disposition des concepteurs un nombre limité de règles ;
- Etre à la fois générale (pour que les concepteurs comprennent le contexte général de la valorisation et aient suffisamment de latitude pour identifier des sources d'amélioration et d'innovation) et précise (pour que les concepteurs sachent concrètement ce qu'ils peuvent faire) ;
- Etre fonction des différents types de produits identifiés dans le projet ;
- Etre révisable régulièrement en fonction des progrès technologiques de la valorisation, c'est-à-dire qu'elle fait apparaître les sources d'information utilisées.

4.2. Méthode

La méthodologie de travail suivie est résumée dans la figure suivante. Elle a consisté essentiellement en :

- une analyse de l'existant (analyse de la littérature, des pratiques des partenaires industrielles mais également des pratiques des recycleurs) ;
- la proposition d'un nombre fini de recommandations ;
- l'identification de 10 critères pertinents de classification des recommandations concrétisées par la proposition d'une structure de la base de recommandation ;
- un remplissage de la base de recommandations et en sa documentation.

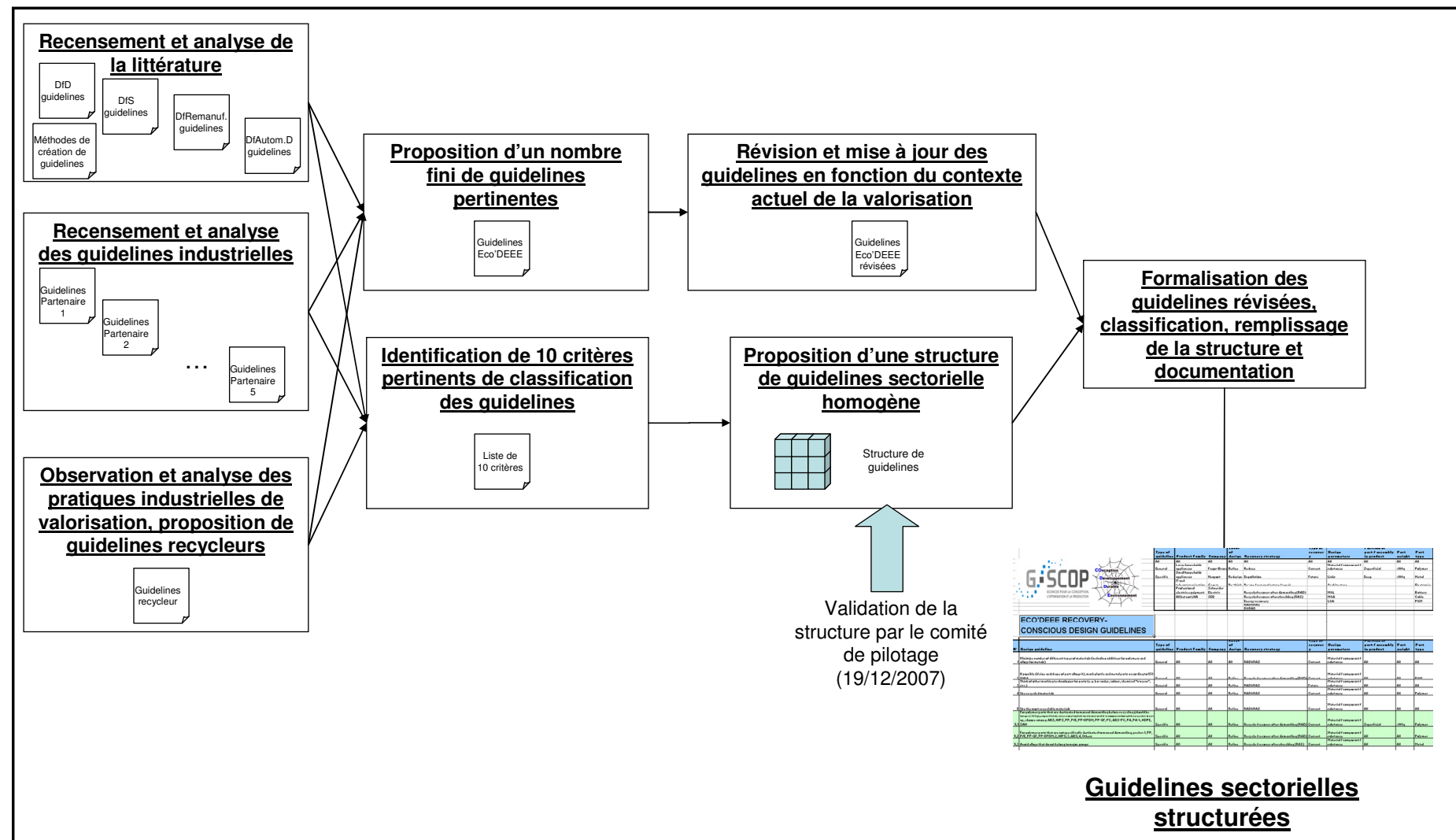


Figure 7 – Schématisation de la démarche adoptée pour l'élaboration de la base de recommandations d'écoconception orientées fin de vie.

4.3. Analyse de la littérature et des pratiques industrielles de conception

La littérature scientifique (journaux scientifiques, thèses, conférences internationales) est très abondante en ce qui concerne les recommandations de conception orientée fin de vie. On citera en particulier les références bibliographiques [1-24]. Il a été en particulier possible d'identifier des recommandations dites « traditionnelles » datant pour la plupart des années 90 et simplifiant la valorisation en fin de vie au seul démontage manuel, comme par exemple [5, 11, 13], très orientées désassemblage. De nouvelles recommandations de conception apparues plus récemment peuvent être qualifiées d'innovantes puisqu'elles traduisent pour le concepteur les progrès actuels ou futurs des technologies de valorisation, par exemple : le désassemblage automatique de produits grâce aux matériaux à reconnaissance de forme [2] ou encore les systèmes de désassemblage centralisé [6].

Il a également été démontré par la littérature que toutes les guidelines proposées étaient généralement structurées en quelques catégories. Ainsi, T. Dowie classe ses recommandations en trois catégories : matériau, liens, structure [5] ; de la même façon, G. Johansson classe les recommandations dans les catégories : facilité d'identification / accessibilité / facilité de séparation / facilité de manipulation.

M. Janin présente les recommandations comme des outils très efficaces d'amélioration des produits [25]. Il souligne cependant le risque que des recommandations trop nombreuses se perdent dans la multitude de documents utilisés par les concepteurs. Il souligne ainsi la nécessité de disposer d'un nombre limité de recommandations.

En plus de cette analyse de la littérature, une analyse des pratiques industrielles a été menée. Les partenaires industriels ont ainsi transmis les guides internes orientés valorisation en fin de vie qui sont aujourd'hui utilisés par les équipes de conception. L'analyse des documents a été complétée par des interviews quand cela était nécessaire. Les industriels ont ainsi pu formaliser leurs spécifications pour la base de recommandations dont ils souhaitent promouvoir l'utilisation au sein des équipes de conception.

Ces analyses de la littérature et des pratiques industrielles ont mené aux spécifications suivantes : la base de recommandations doit :

- parler le langage de la conception, c'est-à-dire s'intéresser aux matériaux, aux liens, à l'architecture plutôt qu'aux procédés de valorisation ;
- rester simple, c'est-à-dire mettre à la disposition des concepteurs un nombre limité de règles ;
- être à la fois générale (pour que les concepteurs comprennent le contexte général de la valorisation et aient suffisamment de latitude pour identifier des sources d'amélioration et d'innovation) et précise (pour que les concepteurs sachent concrètement ce qu'ils peuvent faire) ;
- être fonction des différents types de produits identifiés dans le projet ;
- être révisable régulièrement en fonction des progrès technologiques de la valorisation, c'est-à-dire qu'elle fait apparaître les sources d'information utilisées.

4.4. Proposition de structure de la base de recommandations

4.4.1. Les 10 critères de classification retenus

Type de recommandation : ce critère vise à définir s'il agit d'une recommandation générale ou d'une recommandation spécifique, c'est-à-dire propre à une entreprise par exemple suite à l'exploitation d'une table de séparabilité; les deux niveaux de ce critère sont :

- général ;
- spécifique.

Famille de produit : les recommandations d'écoconception orientée fin de vie peuvent être spécifiques à certaines familles de produits. Six niveaux de ce critère ont été définis :

- toutes les familles de produit ;
- gros électroménager ;
- petit électroménager ;
- équipements de télécommunication ;
- équipements électriques professionnels ;
- toutes les familles sauf le gros électroménager.

L'entreprise : des recommandations peuvent être élaborées en interne des entreprises dans le cadre d'une politique environnementale produit ; les six niveaux de ce critère intégrés dans la guideline sont :

- toutes les entreprises ;
- Fagor-Brandt ;
- Neopost ;
- Sagem ;
- Schneider Electric ;
- SEB.

Non détaillé ici, seulement pour montrer que la base de recommandations peut être adaptée à chaque entreprise.

Le niveau d'écoconception orientée fin de vie : H. Brezet et C. Van Hemel proposent en 1997 de classer les initiatives d'écoconception en quatre niveaux en fonction de la profondeur / de la radicalité de la conception par rapport aux générations précédentes, et du potentiel d'amélioration de l'éco efficacité (cf. Figure 1) [25]; ces quatre niveaux d'écoconception peuvent à fortiori s'appliquer à une conception respectueuse de la valorisation en fin de vie ; ils permettent aux entreprises de choisir parmi les recommandations en fonction de l'ambition du projet en cours, ou encore de la difficulté de la mise en œuvre des recommandations ; les quatre niveaux retenus pour ce critère sont les 4 niveaux de Brezet, autrement dit :

- Niveau 1 : Affiner : améliorations de conception mineures voire incrémentales, améliorations de l'éco-efficacité mineures ;
- Niveau 2 : Re-concevoir : re-conception de produit ;
- Niveau 3 : Repenser le produit : nouvelle définition de concept pour le produit ;

- Niveau 4 : Repenser le système de production : nouvelle organisation de société et donc nouveaux produits associés, améliorations de l'éco efficacité majeures.

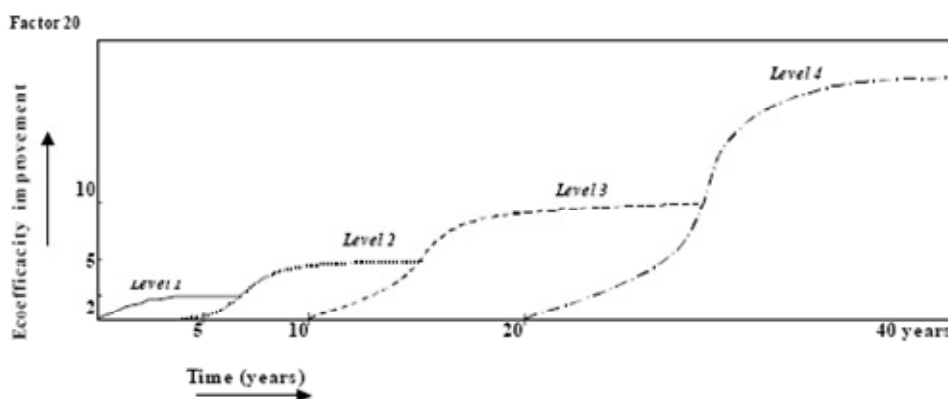


Figure 8 –. Quatre niveaux d'écoconception tels que définis par H. Brezet [25].

La stratégie de valorisation envisagée pour le produit : plusieurs stratégies de valorisation peuvent être appliquées à un produit lorsqu'il atteint sa fin de vie, par exemple la réduction à la source, la remise à niveau / la réutilisation / la refabrication, le démontage poussé en vue du recyclage ou encore le broyage en vue du recyclage ; la valorisation est ainsi une suite de procédés élémentaires de valorisation (démontage, dépollution, broyage, tri, recyclage, valorisation énergétique, etc.) (cf. Figure 2) [16] ; il convient de bien définir la stratégie de valorisation destinée à un produit pour en faire une conception respectueuse de la valorisation en fin de vie [20] ; les recommandations de conception envisageables sont différentes selon la stratégie de valorisation ; une recommandation peut cependant être valable pour plusieurs stratégies ; les 9 niveaux de ce critère sont les suivants :

- toutes les stratégies ;
- réduction à la source ;
- dépollution ;
- réutilisation / refabrication / réparation ;
- valorisation après démontage manuel poussé ;
- valorisation après broyage ;
- valorisation énergétique ;
- valorisation après démontage manuel poussé *et* Valorisation après broyage ;
- dépollution *et* valorisation après démontage manuel poussé.

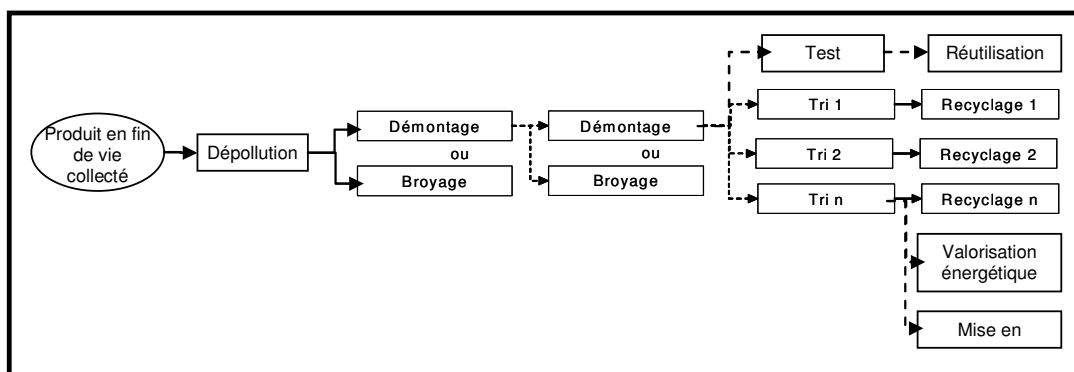


Figure 9 –. La valorisation comme une suite de procédés de valorisation, fonction de la stratégie de valorisation choisie (d'après [16]).

Le type de système / de technologie de valorisation : les systèmes et technologies de valorisation des DEEE sont aujourd'hui marqués par des progrès technologiques et organisationnels très forts et il convient de ne pas négliger les évolutions possibles du système de valorisation pendant la vie d'un produit à durée de vie longue [16]. On distingue donc deux niveaux pour ce critère :

- Système actuel, caractérisé par les technologies disponibles aujourd'hui en Europe ;
- Système futur, caractérisé par des technologies qui pourraient être disponibles d'ici 10 à 20 ans en Europe.

Les paramètres de conception concernés : des travaux de recherche passés ont montré que trois grands types de paramètres de conception maîtrisés par les équipes de conception influencent grandement l'aptitude d'un produit à être valorisé en fin de vie [16, 17] : les matériaux / substances / composants contenus dans le produit, les liens entre les pièces, l'architecture générale du produit. Ces recommandations peuvent être classées selon ces trois paramètres ou combinaisons de paramètres car ces paramètres ne sont pas tous manipulés au même moment et par les mêmes membres de l'équipe de conception ; les 7 niveaux associés à ces critères sont :

- tous les paramètres ;
- matériaux / composants / substances ;
- liens ;
- architecture ;
- matériaux / composants / substances *et* Liens ;
- matériaux / composants / substances *et* Architecture ;
- liens *et* Architecture.

La position de la pièce / de l'assemblage concerné dans le produit : un certain nombre de recommandation ne s'applique qu'à des pièces situées très haut dans l'architecture du produit (autrement dit superficielles) ou encore à des pièces situées très bas dans l'architecture du produit (autrement dit profondes) ; les trois niveaux de ce critères sont :

- toutes pièces ;
- pièces superficielles ;
- pièces profondes.

La masse de la pièce / de l'assemblage concerné dans le produit : un certain nombre de recommandation ne s'applique qu'à des pièces de masse suffisantes, la masse « suffisante » ayant été fixée arbitrairement à 100g après étude des pratiques des recycleurs ; les deux niveaux de ce critère sont :

- les pièces de toute masse ;
- les pièces de masse supérieure à 100g.

Le type de pièces : des recommandations concernent uniquement les pièces plastiques, d'autres uniquement les pièces métalliques, d'autres uniquement l'électronique ; il convient donc de classer les recommandations selon ces catégories ; une telle classification est d'autant plus logique que l'étude des pratiques de conception des partenaires industriels a montré que la conception s'organise le plus souvent en métiers que sont : la mécanique (plastique / métallique), l'électronique (carte / alimentation électrique) ; les 5 niveaux de ce critère sont :

- tous les types de pièces ;

- pièces polymères ;
- pièces métalliques ;
- électronique ;
- pièces polymères *et* Pièces métalliques.

4.4.2. Autres éléments de la structure

En plus des critères de classification des recommandations, trois autres rubriques permettent d'apporter aux équipes de conception des informations complémentaires sur les recommandations.

Une rubrique : « Justification de la recommandation » :

Les recommandations devant rester suffisamment simples, elles sont rédigées de façon synthétique sur 1 à 3 lignes. Cependant, afin de donner un maximum d'information aux concepteurs, un court paragraphe d'explication de la recommandation lui est associé.

Une rubrique « Références bibliographiques » :

Les sources bibliographiques de chaque recommandation sont données afin de permettre aux concepteurs d'aller plus loin, ou encore de permettre à l'avenir une remise à jour plus aisée de cette base de recommandations.

Une rubrique « Pour aller plus loin » :

Des liens internet et des images / des tableaux (de compatibilité, de séparabilité, etc.) issus d'outils de conception sont intégrés à la base de recommandations afin de permettre aux concepteurs de mieux comprendre les recommandations ou de mieux les interpréter (cf. Figure 3a et 3b). Ces illustrations et outils sont soit intégrés directement dans le fichier Excel de la base, soit les documents sont associés au fichier Excel par lien hypertexte.

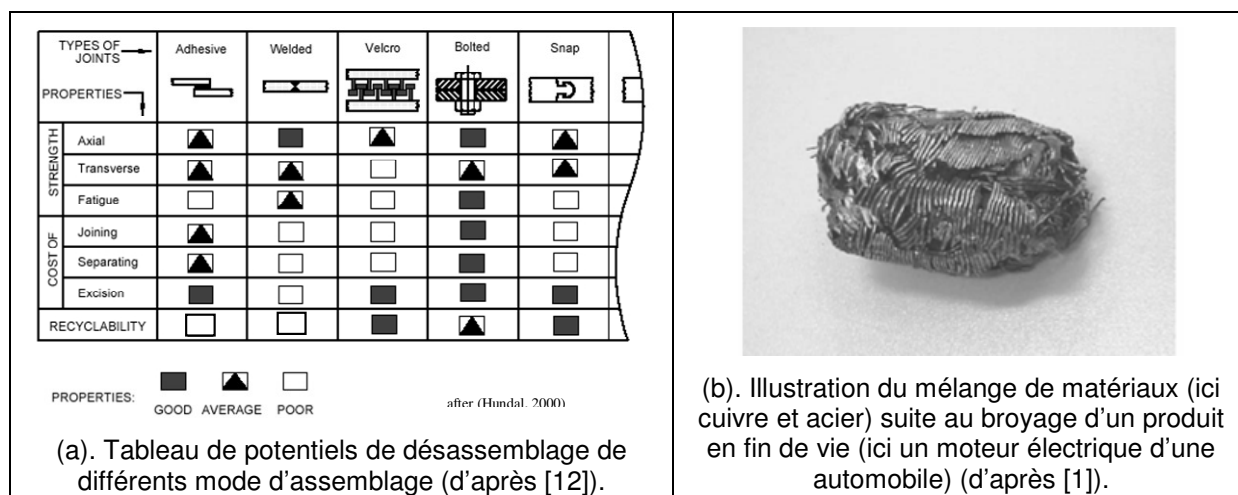


Figure 10 –.. Exemples d'illustrations associées à la base de recommandations dans la rubrique « Pour aller plus loin » de l'outil.

Page 42 sur 91



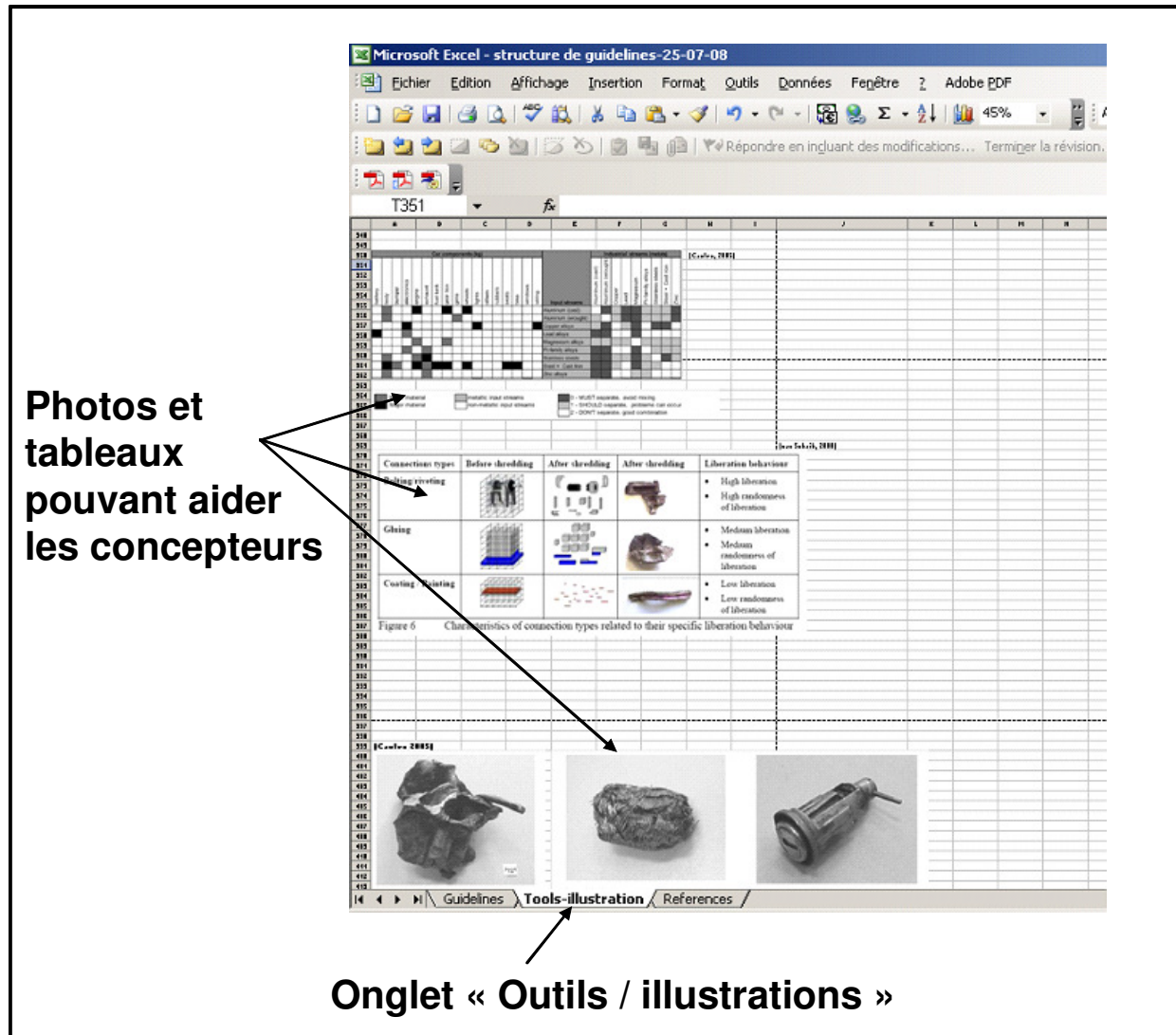


Figure 12 – Vue globale de l'onglet «Outils / illustrations» de l'outil.

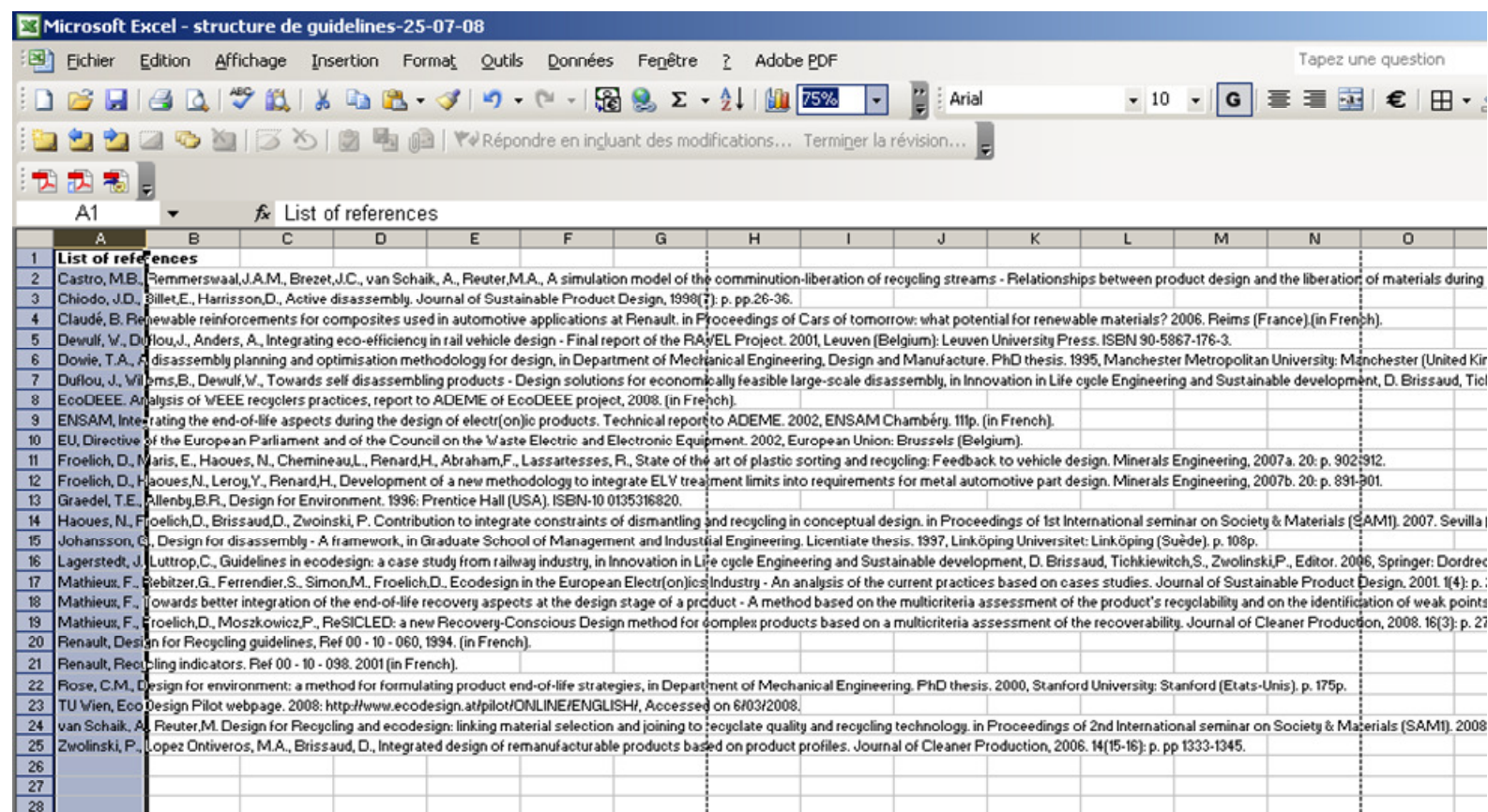


Figure 13 – Vue globale de l'onglet «Références bibliographiques ».

5. Module de formation des équipes de conception

L'objectif de cette tâche était de développer un module de formation à destination des équipes techniques de conception puis de le tester auprès d'une équipe projet au sein des industriels partenaires.

Le module de formation a été construit par CODDE, organisme de formation réalisant en moyenne 3 à 4 formations par mois pour des entreprises souhaitant déployer une démarche d'écoconception.

La formation a ensuite été déployée auprès de 4 équipes d'une dizaine de personnes chez les partenaires du projet afin d'affiner l'organisation de cette journée et d'apporter les corrections nécessaires.

Les chapitres suivants présentent le module de formation ainsi que son déploiement chez les partenaires du projet.

5.1. Présentation du module de formation

La formations écoconception orientée fin de vie Eco'DEEE se déroule sur une journée et peut être intra ou inter entreprise.

Elle est principalement destinée aux membres d'une équipe projet d'entreprise représentant différents métiers (formation intra) ou aux membres de plusieurs équipes projet de diverses entreprises (formation inter).

5.1.1. Objectifs de la formation et organisation

Elle permet aux participants de :

- découvrir les différents procédés de traitement des EEE en fin de vie ;
- comprendre les problématiques industrielles associées aux procédés de traitement en fin de vie ;
- appréhender l'écoconception orientée amélioration de la recyclabilité ;
- calculer des taux de recyclabilité et de valorisation ;
- être conscient des règles essentielles d'écoconception ;
- assimiler les exigences de la directive Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques (DEEE).

Dans le cadre d'une formation intra entreprise le programme de la formation est adaptable aux besoins de l'entreprise, son mode de fonctionnement, son processus de création d'offre de produits et de services, son ou ses types de produits, son ou ses marchés...

La formation vise donc particulièrement les concepteurs parmi lesquels :

- les méthodes ;
- les chefs de projet ;
- les responsables métiers (mécanique, électronique, logiciel, méthode,...).

Dans l'idéal, un groupe composé de 6 à 12 personnes est préconisé.

5.1.2. Programme de la formation

Le programme de la formation est détaillé ci-après :

9h00 – 12h 30

- Pourquoi concevoir son produit en vue du recyclage ?
- Définition de l'écoconception
- Les enjeux pour les entreprises
- Les filières de fin de vie des DEEE
- Présentation de l'organisation des filières
- Zoom explicatif sur chaque procédé de traitement
- Illustration par des images et vidéos tournées sur site
- Mise en avant des recommandations d'adaptation des produits à chaque procédé.

Pause déjeuner

13h30 – 17h00

- Les outils d'aide à l'écoconception orientée fin de vie
- Présentation de différents outils d'aide à l'écoconception orientée fin de vie (Guides, check-lists, benchmarking, logiciels, listes de substances ; indicateurs de recyclabilité...)

Exercice pratique

- Démontage d'un produit électrique et électronique
- Analyse de ce produit sous l'angle fin de vie (à l'aide d'une grille d'analyse)
- Identification des principaux points faibles et points forts de ce produit
- Calcul de son potentiel de recyclabilité (méthode Eco'DEEE)

NB : L'exercice pratique peut être réalisé à partir des produits de l'entreprise (recommandé pour faciliter l'appropriation de la démarche).

Synthèse des acquis de la formation - Questions

La matinée est donc consacrée à la présentation des filières de fin de vie des DEEE. **Les successions de procédés de traitement mis en œuvre sont expliquées et illustrées aux moyens de photographies et/ou de vidéos tournées sur les sites durant le projet.**

Comme l'évoque ce programme, la formation donne une place importante à la **mise en application des principes de l'écoconception orientée fin de vie au cours d'un exercice pratique**.

Cet exercice a été conçu pour permettre au formateur de travailler sur un produit de l'entreprise, sans qu'il ne le connaisse nécessairement au préalable, afin de faciliter l'appropriation des principes par les équipes. Des réflexions sur les voies d'amélioration du produit sont menées et des axes privilégiés de travail sont déterminés.

5.2. Test du module de formation auprès des équipes de CODDE

La première version finalisée du programme de formation a été déployée en interne chez CODDE afin de valider l'organisation du programme et le timing général.

Cette journée test s'est déroulée en septembre 2007 et a donné lieu à quelques ajustements dans le programme. L'étape suivante consistait à tester ce module de formation auprès de l'auditoire cible composé d'équipes techniques.

Cette étape de test s'est déroulée chez les partenaires industriels du projet et est détaillée dans le chapitre suivant.

5.3. Test du module de formation auprès des partenaires industriels

La première version finalisée du programme de formation a été déployée chez les partenaires du projet entre les **mois de janvier et février 2008**.

Quatre sessions de formation ont été organisées regroupant entre 6 et 10 personnes :

- Formation du **groupe SEB** le **17 janvier 2008** dans les locaux de Saint-priest en région Rhône Alpes.



Participants en action lors de l'exercice pratique de la formation Eco'DEEE chez SEB

- Formation de **Schneider Electric** le **22 janvier 2008** dans les locaux de Sofia Antipolis en région Provence Alpes Cote d'Azur.



Participants en action lors de l'exercice pratique de la formation Eco'DEEE chez Schneider Electric

- Formation de **Sagem télécommunication** le **25 janvier 2008** en région parisienne



Participants en action lors de l'exercice pratique de la formation Eco'DEEE chez SAGEM

- Formation de **Neopost technologies** le **11 février 2008** en région parisienne.



Participants en action lors de l'exercice pratique de la formation Eco'DEEE chez NEOPOST

L'ensemble des observations formulées par les participants des sessions de formation a été pris en compte pour finaliser le support de formation.

Le retour est de manière général très positif et déjà deux des partenaires envisagent de déployer la formation plus largement auprès de leurs équipes projet.

- Les points positifs évoqués sont à l'unanimité les illustrations des procédés de traitement mis en œuvre chez les opérateurs et plus particulièrement les vidéos qui montrent le caractère industriel des filières mises en place.
- Le point négatif généralement relevé touchait les aspects réglementaires perçus par certains participants comme trop détaillés. S'adressant à des équipes techniques, ce point a été rectifié pour faire une place plus large aux mises en situation pratiques.

Le calcul manuel d'un taux de recyclabilité potentiel a été fort apprécié. Une demande générale de création d'une méthodologie commune au secteur électrique et électronique pour ce calcul a été relevée. Ce point a été pris en considération et a conduit au développement d'une méthodologie de calcul des taux de recyclabilité des équipements électriques et électroniques au sein du projet Eco'DEEE (Voir chapitre 7).

Une offre est dorénavant disponible permettant de déployer largement cette formation au sein des entreprises du secteur électrique et électronique. La première session de formation inter-entreprise sera proposée par CODDE avant la fin de l'année 2008.

5.4. Recherche de solutions d'amélioration

Lors des sessions de formation, l'exercice pratique a été réalisé sur différents produits de chacune des entreprises.

Il s'agissait de replacer le produit dans les filières de traitement présentées, d'identifier des freins potentiel au recyclage puis de rechercher des solutions techniques de substitution permettant d'améliorer le taux de recyclabilité potentiel.

Le recueil des recommandations d'écoconception n'a volontairement pas été mis à disposition des participants afin de leur laisser la liberté d'imaginer toute sorte de solutions.

La quasi-totalité des solutions d'améliorations proposées figuraient dans le recueil des recommandations développé dans le cadre du projet. Aucune innovation n'a spontanément été proposée.

Cela renforce l'idée que d'aider les concepteurs à comprendre le devenir de leurs produits en fin de vie et notamment de mieux connaître les procédés mis en œuvre par les opérateurs de traitement permet d'engager des choix de conception pertinents.

6. Collecte de données sur les taux de recyclage et de valorisation des matières et composants issus des DEEE

6.1. Rappel des objectifs de la sous-tâche

Cette sous-tâche a consisté à proposer une méthode de collecte de données concernant les taux de valorisabilité de matériaux et composants, et à remplir des tableaux de valeurs pour une quarantaine de matériaux et composants jugés les plus utilisés dans le secteur électronique. Cette sous-tâche a été menée en parallèle de la construction des indicateurs de valorisabilité de produits puisque les données ont vocation à alimenter la méthode de calcul. Le cahier des charges des indicateurs a largement influencé la collecte de données ; inversement, les limites sur la disponibilité et la qualité des données ont influencé la construction des indicateurs.

6.2. Démarche adoptée

La démarche adoptée lors de la collecte de données est résumée dans la figure ci-dessous.

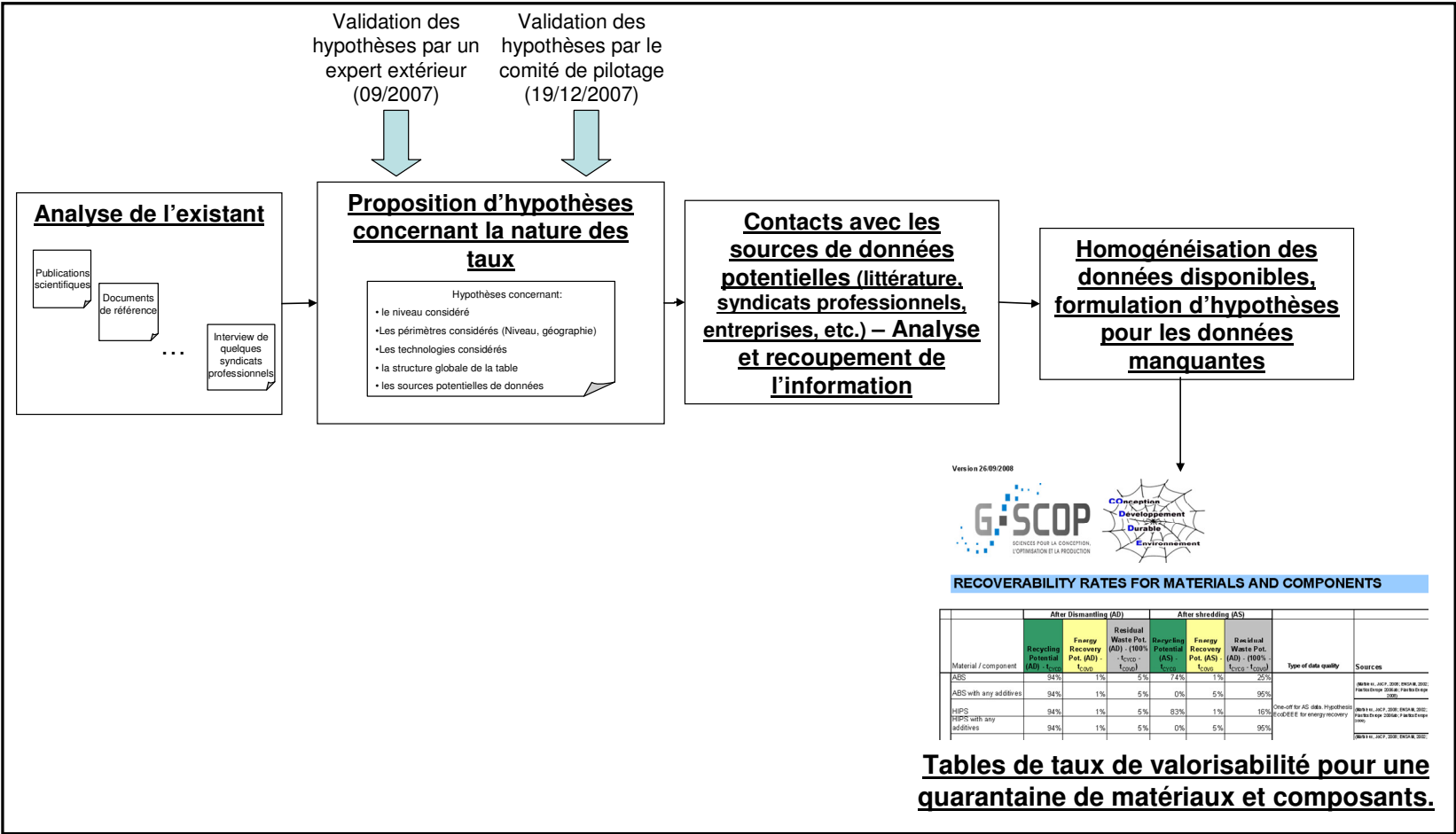


Figure 14 - Schématisation de la démarche adoptée dans la sous-tâche.

6.3. Analyse de l'existant

6.3.1. Définitions sur la hiérarchie de traitement de déchets

Bien que les différents niveaux de la hiérarchie de traitement de déchets (réutilisation, recyclage, valorisation énergétique, stockage sécurisé) soient aujourd'hui bien définis (cf. Glossaire), il est apparu que de nombreux doutes subsistent sur le classement de flux de déchets au sein de cette même hiérarchie. On peut citer les doutes suivants :

- Comment considérer les flux de matériaux se retrouvant dans d'autres flux de matériaux recyclés (par exemple résidus de cuivre dans l'acier recyclé) ?
- Comment classer les technologies dites de « recyclage chimique » de polymères : s'agit-il de recyclage matière ou de valorisation énergétique ?
- Comment classer l'utilisation de polymères comme réducteurs dans les fours d'acieristes : s'agit-il de recyclage matière ou de valorisation énergétique ?
- Comment classer l'utilisation de scories issues du recyclage de batteries en soubassement routier ?

Nous n'avons pu établir de réponses à ces questions et nous avons donc construit la méthode de collecte de données en négligeant ces nuances.

6.3.2. Définitions sur les taux de valorisabilité

Lors de l'analyse de l'existant, nous avons pu montrer qu'aucune définition sur les taux de recyclabilité de produits et matériaux / composants n'étaient communément admises. Nous avons pu identifier un certains nombres de définitions et d'interprétations (pas toujours cohérentes) de ces termes, par exemple :

- les Directives Européennes mentionnent des objectifs de valorisation pour des produits et matériaux, mais également des objectifs de collecte ;
- des producteurs ou syndicats professionnels de matériaux promeuvent des taux de recyclabilité de matériaux (pouvant aller jusqu'à 100% !) mais également des taux de collecte de matériaux usagés ;
- des producteurs d'équipements promeuvent (par exemple dans des déclaration environnementales de produit) des taux de recyclabilité de leurs équipements.

Nous avons heureusement pu identifier deux documents de référence récents qui visent à définir un langage commun, en tout cas pour les producteurs de matériaux. Ces deux documents sont :

- « Déclaration de l'industrie des métaux sur les principes du recyclage », Industries de: Acier, aluminium, Non-ferreux, Chrome, Manganèse, Molybdène, Zinc, Tungsten, Plomb, Nickel, 30/11/2006 ;
- « Recycling rates for metals », Eurométaux, 2006.

Les termes suivant sont ainsi définis dans le document publié par Eurométaux:

1. Taux de recyclage à l'entrée (%)

$$= \frac{\text{Métaux_recyclés}(\text{Ferrailles_neuves_et_usagées})}{\text{Métaux_produits}}$$

2. Taux de recyclage global (%)

$$= \frac{\text{Métaux_recyclés}(\text{Ferrailles_neuves_et_usagées})}{\text{Métaux_disponibles_pour_le_recyclage}(\text{Ferrailles_neuves_et_usagées})}$$

3. Taux d'efficacité du recyclage en fin de vie (%)

$$= \frac{\text{Métaux_Re cyclés}(\text{Ferrailles_usagées})}{\text{Métaux_disponibles_pour_le_Re cyclage}(\text{ferrailles_usagées})}$$

4. Taux de collecte en fin de vie (%)

$$= \frac{\text{Métaux_Collectés}(\text{Ferrailles_usagées})}{\text{Métaux_disponibles_pour_le_Re cyclage}(\text{Ferrailles_usagées})}$$

5. Taux d'efficacité du recyclage en fin de vie (%)

$$= \frac{\text{Métaux_recyclés}(\text{Ferrailles_usagées})}{\text{Métaux_collectés}(\text{Ferrailles_usagées})}$$

Il apparaît que la définition n°5 correspond aux attentes du projet Eco'DEEE, et doit ainsi être privilégiée dans les collectes de données.

Malgré ces définitions adoptées par le syndicat des métaux, il apparaît qu'un flou est toujours entretenu par les producteurs puisque les performances précitées ne sont pas affichées clairement.

6.3.3. Hypothèses sur le périmètre technique

De la même façon que pour les définitions concernant les taux de recyclabilité, il semble que les différents acteurs de la valorisation (producteurs de matériaux, recycleurs, etc.) ne considèrent pas les mêmes niveaux de périmètres. De plus, les niveaux de périmètres sont rarement affichés clairement par les acteurs. La figure 3 résume ainsi les niveaux de périmètre qui sont choisis ou prônés par différents acteurs de la valorisation des EEE usagés (l'IISI pour l'acier, l'EAA pour l'aluminium, l'Observatoire des Piles et Accumulateurs – ADEME pour les batteries usagées, l'EBRA pour les batteries usagées) ou des produits proches (l'ISO22628 pour les automobiles). Une telle diversité de périmètres ne favorise bien entendu pas une collecte de données homogènes.

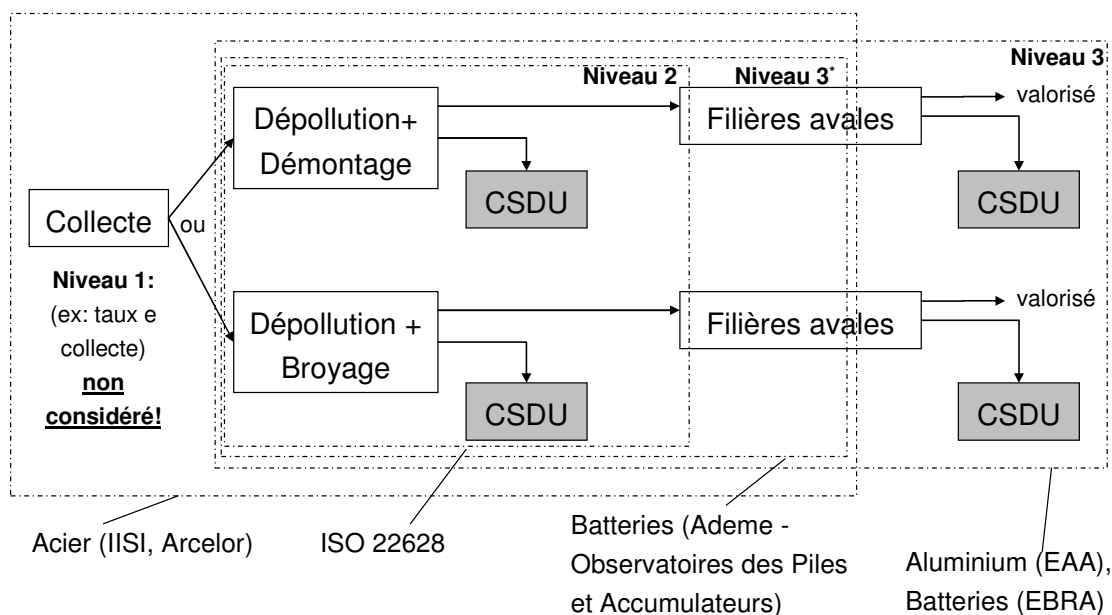


Figure 15 - Périmètres techniques considérés par plusieurs acteurs de la valorisation des EEE usagés.

6.4. Hypothèses adoptées

Les taux de recyclabilité des produits, composants et matériaux sont depuis quelques années au cœur des communications environnementales des entreprises sans que ces termes aient été soigneusement définis. Il n'existe d'ailleurs aucune définition de référence dans le domaine, mais plutôt plusieurs définitions avancées par différents types d'organisation (syndicats professionnels, entreprises, etc.). Il a donc été nécessaire de définir un certain nombre d'hypothèses pour la détermination de ces taux.

6.4.1. Structure des tables de taux de recyclabilité et de valorisabilité

Selon les divers retours d'expérience obtenus du terrain (cf. [10,20,21]), il apparaît que les performances techniques, économiques et environnementales de la valorisation d'EEE usagés varient sensiblement si le traitement initial d'un produit ou d'un sous-ensemble est un démontage ou un broyage. Les déchets résiduels sont en général moindres après démontage (les fractions obtenues sont plus pures) mais la viabilité économique n'est pas toujours assurée. Il convient donc de différencier des performances de valorisabilité potentielle des matières et composants après démontage et après broyage.

Chaque matière dispose d'informations sur 6 paramètres : recyclage, valorisation énergétique et déchets résiduels après démontage et après broyage (cf. Table 4).

Structure de la table de taux de valorisation des matériaux et composants.

	Après démontage			Après Broyage		
	% recyclage	% valorisation énergétique	% déchets	% recyclage	% valorisation énergétique	% déchets
Acier						
Aluminium						
Polymères						
...						

Tableau 4 – Présentation des informations de recyclabilité associées aux matières et composants

Il est à noter que ces tables de taux de valorisabilité n'intègrent aujourd'hui aucune donnée concernant la réutilisation de pièces ou sous-ensembles : il n'a en effet pas été possible d'identifier des expériences de réutilisation d'échelle suffisamment importantes pour être considérées comme représentatives de la valorisation en Europe. Si de telles expériences se développaient, la table de taux pourrait être amenée à évoluer.

Les composants qui doivent être extraits des produits selon la Directive DEEE (notamment son Article 6 et son Annexe 2 : par exemple LCD, batteries, cartes, etc.) ne présentent qu'un taux de valorisation après démontage. Leur taux après broyage est par convention fixée à « NR », car ils doivent être extraits avant broyage.

6.4.2. Périmètre géographique

Il a été décidé de centrer l'étude sur le seul continent européen en collectant des données moyennes européennes sur les meilleures pratiques de valorisation de DEEE. Des tables de taux de valorisabilité similaires peuvent bien sûr être développées pour d'autres périmètres géographiques.

6.4.3. Périmètre technique

Il existe un grand débat dans le milieu de la valorisation pour déterminer quel périmètre technique doit être considéré dans le calcul des taux de valorisabilité des équipements et matériaux : en particulier doivent-ils prendre en compte les performances :

- de la collecte (Niveau 1¹) ?
- des unités de démontage ou de broyage de EEE usagés (Niveau 2) ?
- des filières aval de la valorisation (jusqu'aux lingots de matériaux recyclés), soit partiellement (Niveau 3*) soit complètement (Niveau 3) ?

¹ Notation adaptée de [22]

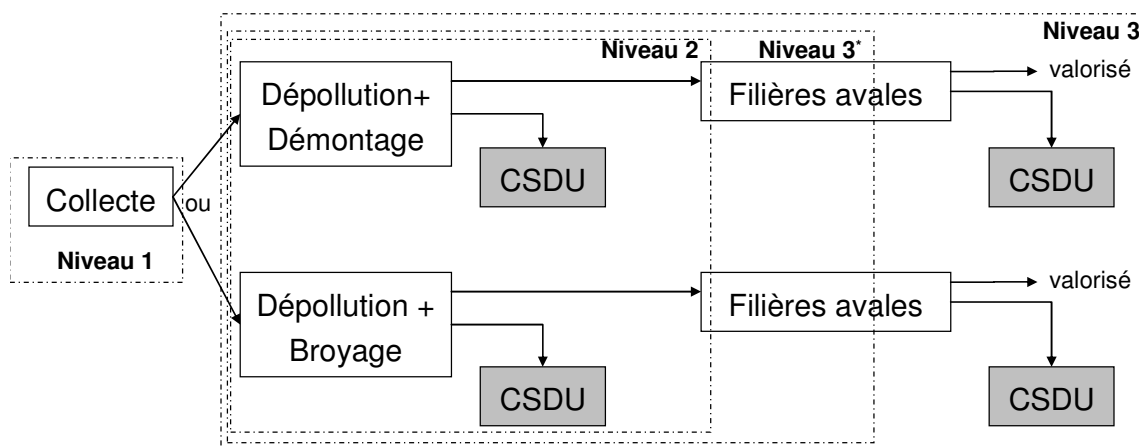


Figure 16 - Différents périmètres techniques considérés lors de l'évaluation des taux de valorisabilité des composants et matériaux.

Il a été décidé pour le projet Eco'DEEE de viser le Niveau 3, autrement dit « jusqu'aux lingots ». Cette décision a été prise pour trois raisons essentielles :

- ce niveau est conforme à l'esprit de la réglementation européenne sur les déchets puisqu'il vise à minimiser l'enfouissement en CSDU et le gaspillage de ressources naturelles ;
- ce niveau convient à l'activité des acteurs de la valorisation qui visent à extraire un maximum de ressources des déchets ;
- ce niveau n'alloue pas de bonus aux éléments polluants devant être extraits (au contraire de l'ISO 22628 qui alloue 100% de valorisation aux polluants extraits).

Les données utilisées proviennent de sources différentes qui considèrent parfois des niveaux différents, niveaux d'ailleurs pas toujours explicités. Un travail d'analyse et d'harmonisation de ces données pour atteindre ce Niveau 3 a donc été nécessaire. On peut citer par exemple l'application d'un coefficient de perte de 5% aux données fournies par l'aluminium car ces données concernaient les ferrailles et non la matière recyclée.

6.4.4. Filières et technologies considérées

Il existe une grande variété de technologies appliquées aux DEEE en Europe et leur distribution dans l'espace européen n'est pas homogène. Il est de plus probable que la valorisation des produits, composants et matériaux évoluera fortement dans les prochaines années grâce aux futures évolutions technologiques des filières de valorisation et aux économies d'échelle.

Il a donc été décidé de considérer les filières / technologies qui :

- représentent les meilleures pratiques actuelles de traitement, c'est-à-dire qui minimisent les quantités de déchets résiduels provenant des EEE usagés ;
- sont viables économiquement en 2008, c'est-à-dire qu'elles existent au moins en deux exemplaires en Europe (ainsi, les technologies actuellement en cours de validation en laboratoire ne sont pas considérées) ;
- sont représentatives du traitement des EEE usagés en Europe.

On distingue cependant deux approches distinctes pour la représentativité des filières :

- une approche « élitiste » : les performances considérées sont celles des meilleures pratiques actuelles applicables au produit ;
- une approche « moyenne » : les performances considérées sont celles de la moyenne des pratiques actuelles appliquées au produit en Europe.

Ainsi :

- les données concernant le recyclage des métaux classiques (acier, aluminium, cuivre, alliages) sont représentatives des pratiques de tout le continent puisque la valorisation de ces matériaux est bien développée et stabilisée (approche « moyenne »);
- les données concernant le recyclage des métaux contenus dans les cartes dans les fours pyrométallurgiques sont représentatives d'un acteur de la valorisation considéré comme performant (Boliden en Suède) (approche « élitiste ») ;
- les données concernant le recyclage des batteries sont représentatives des pratiques du continent (approche « moyenne ») car le secteur est considéré comme stable et homogène ;
- les données concernant le recyclage des polymères sont représentatives de quelques unités de recyclage en Europe, les plus performantes, puisque la valorisation de ces matériaux est en développement et a toutes les chances de se développer (approche « élitiste »); ainsi :
 - après broyage, le procédé de tri par gravimétrie est choisi (ce procédé existe aujourd'hui chez Galloo en France et chez MBA en Autriche);
 - après démontage, il est considéré (après observation d'installation de démontage) que tous les matériaux ayant un marché sur le recyclé (c'est-à-dire étant coté sur www.euro.recycle.net) peuvent tout a fait être visés par des recycleurs ; ceci est considéré vrai pour ces mêmes matériaux s'ils sont chargés ;
- les données concernant la valorisation énergétique des polymères sont traitées à part : considérant que l'acceptabilité et la viabilité économique de cette filière est limitée en Europe (la filière existe en Allemagne ou en Hollande, elle n'existe pratiquement pas en France par exemple), il apparaît que de bien plus grandes quantités de polymères finissent aujourd'hui en CSDU plutôt qu'en incinérateur ; il n'est de plus pas sûr que la filière se développe à l'avenir ; il a donc été décidé d'adopter une approche « moyenne » et de mentionner l'existence de cette filière en allouant entre 1% et 5% de taux de valorisation énergétique aux polymères; si à l'avenir de plus en plus de polymères provenant de EEE usagés sont déroutés de la mise en décharge vers la valorisation énergétique, ces chiffres devront être révisés ; les valeurs choisies sont les suivantes :
 - pour des polymères ayant des taux de recyclage non nuls et des taux de déchets résiduels de 10 à 25%, le taux de valorisation énergétique est fixé à 1% et est retranché aux taux de déchets résiduels ;
 - pour des polymères ayant des taux de recyclage non nuls et des taux de déchets résiduels d'environ 5%, le taux de valorisation énergétique est fixé à 1% et est retranché aux taux recyclé ;
 - pour des polymères ayant des taux de recyclage nuls, le taux de valorisation énergétique est fixé à 5%.
- les données concernant le recyclage des matériaux d'emballages sont basées sur une approche « moyenne » : les emballages des EEE intègrent en effet les filières de traitement des emballages qui sont bien stabilisés, et il apparaît pertinent de communiquer aux concepteurs des informations sur les taux moyens de valorisation atteints en Europe.

6.4.5. Sources de données

Le projet a visé à identifier et homogénéiser des données déjà disponibles et non à collecter des données auprès de recycleurs. Les syndicats professionnels (de matériaux : l'IISI pour l'acier, l'EAA pour l'aluminium, le Deutsches Kupferinstitut Berufsverband pour le cuivre, ou Plastics Europe pour les polymères ; de recycleurs : l'EBRA pour les recycleurs de batteries) ont ainsi été contactés et leurs publications exploitées. Des recherches dans les publications scientifiques ont

également été effectuées. Enfin, des experts (notamment Daniel Froelich de l'ENSAM) ont été consultés. Ces données ont été ensuite homogénéisées pour être représentatives du Niveau 3.

Malgré le grand nombre de contacts pris, de nombreuses données étaient encore manquantes. Plutôt que de risquer une exploitabilité limitée des indicateurs en raison d'un trop grand nombre d'inconnues, il a été décidé d'extrapoler certaines données à partir d'hypothèses explicites. On peut citer les extrapolations suivantes :

- les données sur le Polypropylène (PP) obtenues de recycleurs ont été recoupées avec des publications scientifiques pour en tirer les données relatives au PP-GF et au PP-EPDM ;
- puisqu'aucune donnée relative au Niveau 3 pour les batteries n'a pu être collectée, il a été décidé, après consultation de l'EBRA, d'allouer à ces composants des taux de recyclabilité équivalents aux objectifs de la nouvelle Directive Batteries et Accumulateurs pour 2010 [EU 2006], et auxquels sont retranchés 5% ;
- de plus, des données ont été allouées à des matériaux avec justification. Par exemple aucune donnée concernant les alliages à base d'acier, aluminium et cuivre n'étaient disponibles ; même si les procédés de tri automatiques sont rarement disponibles pour ces matériaux, il faut considérer que les alliages métalliques sont en général de valeur économique importante et constituent des flux ciblés par les recycleurs ; ainsi, des taux de recyclabilité importants (quoique inférieurs aux taux des métaux de base) leur sont alloués.

6.4.6. Précision des hypothèses pour les différents types de matériaux et composants

Ce paragraphe vise à préciser les hypothèses adoptées pour la détermination des taux de valorisabilité des différents types de matériaux et composants :

- Matériaux polymères : on distingue 4 groupes de polymères :
 - Groupe P1 (ABS, HIPS, PP, P/E, PP-EPDM, PP-GF) : matériaux pouvant à la fois être extraits pour le recyclage après démontage et extraits par le tri automatique après broyage ; les performances de tri après broyage pour ABS, HIPS et PP ont été communiquées en 2002 par une unité de recyclage [Mathieux et al., 2008] ;
 - Groupe P2 (ABS + additifs, HIPS + additifs, PP + autres additives, [PC, ABS-PC, PA, PA-6, HDPE, SAN] avec ou sans additifs) : matériaux pouvant être extraits pour le recyclage seulement après démontage ;
 - Groupe P3 (polymères utilisés dans les cartes électroniques, par ex. FR4) : polymères pouvant être valorisés énergétiquement lors du recyclage des cartes extraites lors du démontage ;
 - Groupe P4 (tous les autres polymères) : matériaux dont une infime fraction (5%) est valorisé énergétiquement ;
- Métaux : on distingue 3 groupes de métaux :
 - Groupe M1 (acier, aluminium, cuivre, alliages métalliques basés sur les trois métaux précédents) : ces métaux peuvent être extraits soit après démontage soit après broyage, avec des performances différentes ;
 - Groupe M2 (Au, Ag, Cu, et Pd contenus dans les cartes électroniques) : ces métaux sont extraits pour le recyclage par des procédés pyro-métallurgiques lors du traitement des cartes ;
 - Groupe M3 (les autres métaux contenus dans les cartes électroniques) : ils finissent entièrement en CSDU ;

- Matériaux d'emballage (carton, PE-Film, PS-E): les taux moyens de valorisation des cartons et polymères de l'emballage leur sont alloués ;
- Composants : on en distingue 5 groupes de composants:
 - Groupe C1 (câbles, batteries, tube cathodique) : ces composants subissent une valorisation après extraction manuelle ;
 - Groupe C2 (capacités, connecteurs, diode, etc.) : ces composants fixés aux cartes électroniques sont valorisés lors du traitement des cartes et leurs éléments constitutifs connaissent les mêmes taux de valorisation que les métaux et polymères valorisés en four pyro-métallurgiques (cf. valeurs indiquées ci-dessus) ;
 - Groupe C3 (radiateurs en aluminium fixés sur les cartes électroniques) : éléments extraits manuellement ou non des cartes et connaissant les mêmes taux que l'aluminium (soit en recyclage après démontage, soit en four pyro-métallurgique sans démontage) ;
 - Groupe C4 (écran LCD) : ces composants n'ont pas aujourd'hui de filières de valorisation connues ;
 - Groupe C5 (cables optiques, bulbs) : aucune information n'est disponible et leurs taux de déchets résiduels est fixé à 100%.

6.4.7. Présentation des données dans le tableau

En plus des valeurs de valorisabilité, et afin de donner des informations sur la qualité des données et de faciliter d'éventuelles révisions de ces taux à l'avenir, les informations suivantes sont communiquées pour chaque valeur :

- les sources bibliographiques servant de base à l'évaluation des taux ;
- une information sur la qualité des données : les données peuvent ainsi être :
 - « Statistiques » : les données sont des valeurs moyennes sur le continent, par exemple communiquées par des syndicats de matériaux ;
 - « Ponctuelles » : les données sont communiquées par un (ou plusieurs) recycleur représentatif de la filière ;
 - « Extrapolées » : les taux d'un matériau ou composant sont extrapolés à partir d'un autre matériau ou composant après avoir vérifié (à partir d'une publication ou d'un recycleur par exemple) que c'était possible ;
 - « Hypothèse Eco'DEEE » : les taux d'un matériau ou d'un composant important ont été déterminés par convention en raison de l'absence de données disponibles.

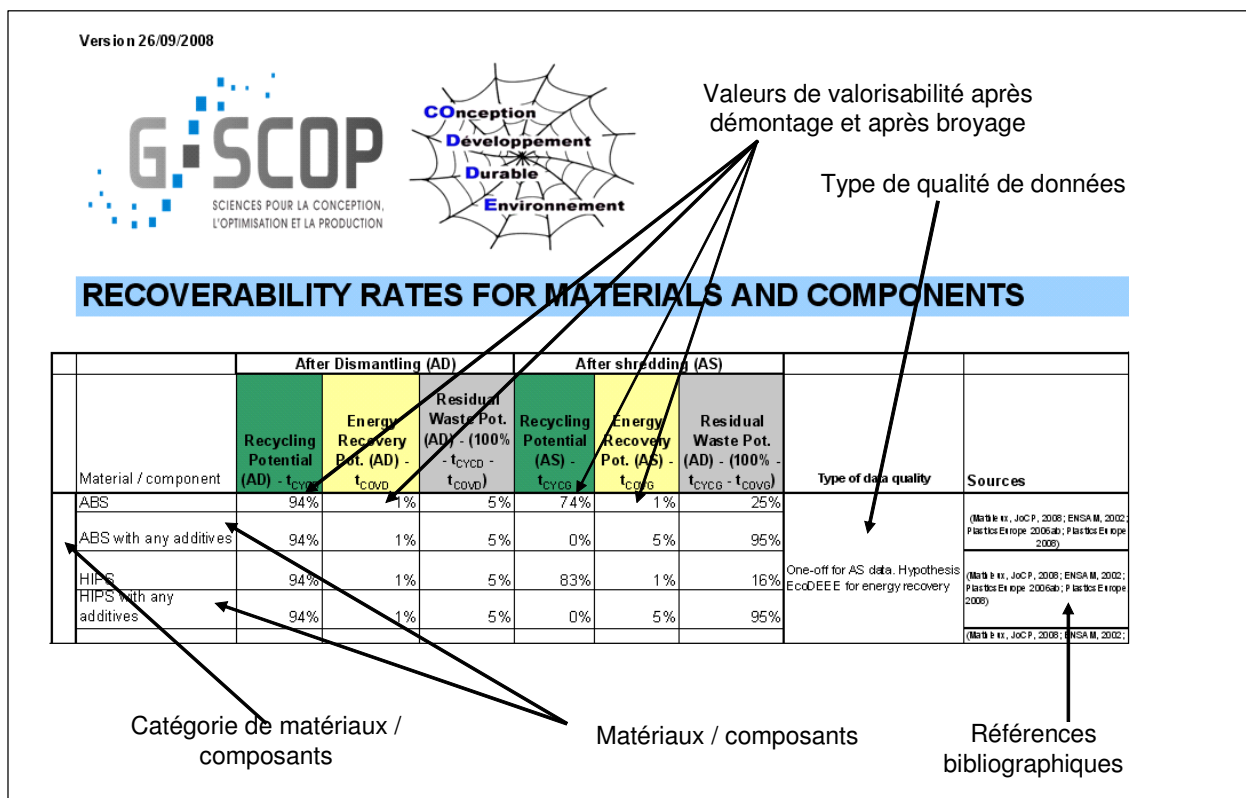


Figure 17 -. Informations disponibles dans le tableau de valeurs des taux de valorisabilité.

6.4.8. Incertitudes sur les données

Il est à noter que les incertitudes sur les taux de valorisabilité des matériaux et composants sont aujourd'hui importantes. Les résultats doivent être considérés comme un potentiel de recyclabilité avec un degré de précision limité estimé à plus ou moins 5%. Il a été décidé d'adopter une démarche « conservative », en adoptant par exemple les hypothèses basses communiquées par les syndicats professionnels.

6.5. Liste des taux à prendre en considération lors du calcul

Les données relatives aux taux de recyclabilité et de valorisabilité après démantèlement et après broyage des principaux composants et matières sont reportées dans le tableau suivant.

Material / component	After Dismantling (AD)			After shredding (AS)			Type of data quality	Sources
	Recycling Potential (AD) - t_{cvco}	Energy Recovery Pot. (AD) - t_{covo}	Residual Waste Pot. (AD) - (100% - t_{cvco} - t_{covo})	Recycling Potential (AS) - t_{cvco}	Energy Recovery Pot. (AS) - t_{covo}	Residual Waste Pot. (AD) - (100% - t_{cvco} - t_{covo})		
ABS							One-off for AS data. Hypothesis EcoDEEE for energy recovery	(Mathieux, JoCP, 2008; ENSAM, 2002; PlasticsEurope 2006ab; PlasticsEurope, 2008)
ABS with any additives								(Mathieux, JoCP, 2008; ENSAM, 2002; PlasticsEurope 2006ab; PlasticsEurope, 2008)
HIPS								(Mathieux, JoCP, 2008; ENSAM, 2002; PlasticsEurope 2006ab; PlasticsEurope, 2008)
HIPS with any additives							Extrapolated from "PP" for AS data. Hypothesis EcoDEEE for energy recovery	(Mathieux, JoCP, 2008; ENSAM, 2002; PlasticsEurope 2006ab; PlasticsEurope, 2008)
PP								(Mathieux, JoCP, 2008; ENSAM, 2002; PlasticsEurope 2006ab; PlasticsEurope, 2008)
PP+EPDM							Extrapolated from "PP" for AS data. Hypothesis EcoDEEE for energy recovery	(Mathieux, JoCP, 2008; ENSAM, 2002; PlasticsEurope 2006ab; PlasticsEurope, 2008; Froelich, 2007)
PP-GF							Extrapolated from "PP" for AS data. Hypothesis EcoDEEE for energy recovery	(Mathieux, JoCP, 2008; ENSAM, 2002; PlasticsEurope 2006ab; PlasticsEurope, 2008; Froelich, 2007)
PP with any other additives							One-off for AS data. Hypothesis EcoDEEE for energy recovery	(Mathieux, JoCP, 2008; ENSAM, 2002; PlasticsEurope 2006ab; PlasticsEurope, 2008; Froelich, 2007)
P/E							Extrapolated from "PP" for AS data. Hypothesis EcoDEEE for energy recovery	(Mathieux, JoCP, 2008; ENSAM, 2002; PlasticsEurope, 2006ab; PlasticsEurope, 2008; Froelich, 2007)
PC, ABS-PC, PA, PA-6, HDPE, SAN with, or without additive							Extrapolated from ABS for AD data	(ENSAM, 2002 ; PlasticsEurope, 2006a; PlasticsEurope, 2008)
Other Polymer							One-off data	(ENSAM, 2002)
Polymers in PWB							One-off data	(Mathieux, JoCP, 2008)

Material / component	After Dismantling (AD)			After shredding (AS)			Type of data quality	Sources
	Recycling Potential (AD) - t_{cvco}	Energy Recovery Pot. (AD) - t_{covo}	Residual Waste Pot. (AD) - (100% - t_{cvco} - t_{covo})	Recycling Potential (AS) - t_{cvco}	Energy Recovery Pot. (AS) - t_{covo}	Residual Waste Pot. (AD) - (100% - t_{cvco} - t_{covo})		
Steel							Hypothesis EcoDEEE	(ISI, 2006; Russo, 1999)
Aluminium							Statistics	(Boin & Bertram, 2005)
Copper							Statistics	(ICSG, 2005)
Metal alloys							Hypothesis EcoDEEE	
Cardboard (packaging)							Statistics	(EC, 2001)
PE-Film, PS-E (packaging)							Statistics	(EC, 2001)
LCD							One-off data	(ENSAM, 2002)
Cable (high current)							Extrapolated from Cu data	(Mathieux, JoCP, 2008)
Cable (low current)							Extrapolated from Cu data	(Mathieux, JoCP, 2008)
Battery (Lead-acid)							Extrapolated from Directive	(EU Directive, 2006)
Battery (Ni-Cd) (2 type: portable (<1kg); non-portable (>1kg))							Extrapolated from Directive	(EU Directive, 2006)
Other battery							Extrapolated from Directive	(EU Directive, 2006)
Electronic board (Power)							Extrapolated from EcoDEEE	
Electronic board (Communication)							Extrapolated from EcoDEEE	
Other battery							Extrapolated from PWB data	
CPT							Hypothesis EcoDEEE	Mathieux, JoCP, 2008
Heatsink							Extrapolated from Al (AD) and PWB data (AS)	
Cable (optical)							Hypothesis EcoDEEE - No data	
Bulb							Hypothesis EcoDEEE - No data	

Tableau 5 – Données de recyclabilité des matières et composants collectées au cours du projet Eco'DEEE selon la méthode présentée

Les références utilisées dans le tableau de valeurs sont les suivantes :

- Boin, U.M.J., Bertram,M., Melting standardized aluminium scrap: a mass balance model for Europe. Journal of Metallurgy, 2005: p. pp.26-33.
- EC, Report on the Results of packaging recycling and recovery in the Member States and in the EU, European Commission report, 2001
- ENSAM Chambéry. « Prise en compte de la fin de vie des produits électriques et électroniques dans leur conception » Rapport final à l'ADEME, Juin 2002.
- EU, Directive 2006/66/CE du 6 septembre 2006 relative aux piles et accumulateurs ainsi qu'aux déchets de piles et d'accumulateurs, 2006
- Froelich, D., Maris, E., Haoues, N., Chemineau,L., Renard,H., Abraham,F., Lassartesses, R., State of the art of plastic sorting and recycling: Feedback to vehicle design. Minerals Engineering, 2007. 20: p. 902-912.
- ICSG, International Copper Study Group's Copper flow model - Determining Recycling Rates for Western Europe, Report, 2005.
- IISI, IISI Recycling Methodology, International Institute for Steel and Iron Report, 2006
- Mathieux, F., Froelich,D., Moszkowicz,P., ReSICLED: a new Recovery-Conscious Design method for complex products based on a multicriteria assessment of the recoverability. Journal of Cleaner Production, 2008. 16(3): p. 277-298.
- PlasticsEurope, Large scale demonstrator of the treatment of electrical and electronic shredder residue by co-incineration in the Würzburg Municipal Solid Waste Incinerator. Report. 2006a.
- Plastics Europe, The characteristics of plastics-rich waste streams from end-of-life electrical and electronic equipment, Report, 2006b.
- PlasticsEurope, The Compelling Facts About Plastics - Ananalysis of plastics production, demand and recovery for 2006 in Europe, Report, 2008
- Russo,P. et al., Scrap quality upgrading by shredding improvement, 4th International Conference on the Recycling of Metals, Vienna (Austria), 1999.

Mise à jour des données à l'avenir

Ce projet a permis de proposer des taux de valorisabilité pour des matériaux et composants issus d'EEE usagés. Les données ont été extraites soit de la littérature scientifique, soit de rapports faisant état de collectes directes auprès de recycleurs, soit de publications émises par des syndicats de producteurs de matériaux. Le remplissage de la base de donnée pour une quarantaine de matériaux et composants a pu être réalisé par la mise en place d'hypothèses d'extrapolation et des valeurs choisies par convention (mais justifiées).

Avec le développement de la valorisation des EEE usagés, les pratiques (et donc les performances) des filières seront amenées à évoluer et la pertinence de la méthode Eco'DEEE ne pourra être assurée que si les valeurs sont régulièrement remises à jour. Au cours du projet, il a été possible d'identifier plusieurs sources potentielles d'information qui permettront à l'avenir la remise à jour régulière de la base de données. Elles sont présentées ici :

- les rapports réguliers à la Commission Européenne des états membres sur la mise en place de la Directive DEEE devraient permettre à l'avenir d'obtenir des informations sur les performances des filières de valorisation de certains pays, voire de la moyenne des pays européens ;
- les éco-organismes devraient être à terme des fournisseurs intéressants d'informations. Une rencontre avec l'éco-organisme Eco-Systèmes en Décembre 2007 a permis de montrer que :

- Le périmètre de niveau 3 choisi par Eco'DEEE semble cohérent avec le choix de l'éco-organisme, voire l'association WEEE Forum (via l'outil RepTool) ;
- L'information devrait être à terme disponible chez Eco-Systèmes sous forme *agrégée*, c'est-à-dire jamais pour un acteur donné, mais plutôt pour des pratiques moyennes ou une suite de procédés ; des aspects de confidentialité devront bien entendu être discutés ;
- Il pourrait être nécessaire d'effectuer des campagnes de mesure chez certains recycleurs afin de collecter des informations sur certains composants/matériaux et filières.

7. Méthodologie de calcul des taux de recyclabilité des équipements électriques et électroniques

Le chapitre suivant présente la méthodologie de calcul des taux de recyclabilité potentiels des équipements électriques et électroniques développée dans le cadre du projet Eco'DEEE.

Cette méthodologie constitue un document autonome pouvant évoluer en fonction de l'avancement des réflexions et de l'accès à de nouvelles données en provenance des recycleurs. La dernière version est disponible gratuitement sur simple demande à l'adresse codde@codde.fr. Le document final sera à terme disponible sur le site www.codde.fr rubrique nos projets / Eco'DEEE.

Ce présent chapitre détail la méthodologie partagée de calcul du taux de recyclabilité et de valorisabilité des équipements électriques et électroniques.

7.1. Introduction

Les équipements électriques et électroniques en fin de vie représentent un volume conséquent de déchets à traiter. Les procédés industriels de traitement mis en œuvre dans les filières de traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) sont plus ou moins bien adaptés aux équipements arrivés en fin de vie en fonction de leurs caractéristiques de conception.

Il est par conséquent essentiel que la fin de vie des équipements électriques et électroniques soit prise en compte dès la conception de ces équipements afin d'assurer un traitement respectueux de l'environnement.

Aujourd'hui le recyclage est pris en compte lors de la conception, au même titre que la sécurité électrique ou la consommation énergétique. En conséquence, un indicateur est nécessaire à l'évaluation du potentiel d'un nouvel équipement à être recyclé ou valorisé.

La méthode de calcul des taux de recyclabilité et de valorisabilité spécifiée dans la présente méthode est basée sur quatre étapes essentielles inspirées du traitement des équipements électriques et électroniques en fin de vie. Les taux de recyclabilité et de valorisabilité dépendent des propriétés des matériaux et de la conception des nouveaux équipements, et des considérations sur les technologies industrielles existantes de traitement.

Dans ce contexte, on entend par technologies industrielles existantes, des technologies disponibles à l'échelle industrielle dans au moins un pays de l'union Européenne permettant de traiter de manière viable économiquement d'importants volumes de déchets.

Tenant compte de cette définition, la méthodologie proposée pour le calcul du taux de recyclabilité et de valorisabilité des équipements électriques et électroniques se veut plus précise que la norme définissant la méthode de calcul du taux de recyclabilité et de valorisabilité des véhicules en fin de vie (ISO 22628 :2002).

Etant donnée l'évolution continue des procédés de traitement, la méthode de calcul décrite dans ce document, appliquée aux nouveaux équipements, ne reflétera pas de manière exacte les procédés mis en œuvre pour traiter des équipements produits aujourd'hui lorsqu'ils arriveront en fin de vie.

7.2. Domaine d'application

Est spécifié ici la méthode de calcul des taux de recyclabilité et de valorisabilité d'un équipement électrique et électronique (DEEE), exprimé comme un pourcentage de la masse (fraction massique, en %) de cet équipement qui peut potentiellement être :

- réutilisée ;
- recyclée ;
- valorisée ;

Le calcul est effectué par le constructeur de l'équipement ou par un organisme mandaté par ce même constructeur lorsqu'un équipement est mis sur le marché.

La présente méthodologie est à destination de l'ensemble des équipements électriques et électroniques, inclus ou non dans le champ d'application de la directive DEEE.

7.3. Référence normative

Cette méthode s'appuie sur la norme internationale ISO 22628 :2002 relative au calcul du taux de recyclabilité et de valorisabilité des véhicules routiers. Les réflexions menées dans le cadre du projet Eco'DEEE ont conduites à des choix méthodologiques différents de ceux présentés dans la norme précitée.

7.4. Termes et définitions

Pour les besoins de la présente méthode, les termes et définitions suivants s'appliquent.

7.4.1. Masse de l'équipement, m_E

m_E

Masse de l'équipement complet en ordre de marche, augmentée par la masse des fluides et consommables éventuellement contenus lors de la mise au rebut de l'équipement (cartouches d'encre, huiles de frites, fluides frigorigènes,...).

7.4.2. Réutilisation

Toute opération par laquelle des composants d'un équipement en fin de vie sont utilisés pour le même usage que celui pour lequel ils ont été conçus.

7.4.3. Recyclage

Toute opération par laquelle les matériaux issus des équipements en fin de vie sont utilisés dans un procédé de fabrication pour le même usage initial ou pour d'autres, à l'exclusion de l'utilisation comme moyen de production d'énergie.

7.4.4. Valorisation

Toute opération par laquelle les matériaux issus des équipements en fin de vie sont utilisés dans un procédé de fabrication pour le même usage initial ou pour d'autres, y compris l'utilisation comme moyen de production d'énergie (valorisation énergétique).

7.4.5. Démontage

Séparation manuelle non destructive d'un sous-ensemble permettant de conserver ses aptitudes fonctionnelles. Le démontage d'un sous-ensemble permet la réutilisation de ce sous-ensemble dans une autre application.

7.4.6. Démantèlement

Séparation manuelle d'un sous-ensemble sans conservation de ses aptitudes fonctionnelles.

7.4.7. Démontabilité

Aptitude des composants à être démontés de l'équipement.

7.4.8. Réutilisabilité

Aptitude des composants à être réutilisés après avoir été retirés du flux de fin de vie

7.4.9. Recyclabilité

Aptitude des composants, des matériaux ou des deux à être recyclés après avoir été retirés du flux de fin de vie.

7.4.10. Taux de recyclabilité, R_{cyc}

R_{cyc}

Pourcentage de la masse (fraction massique, en %) d'un nouvel équipement qui peut être potentiellement recyclé et ou réutilisé.

Un taux de recyclabilité potentiel est affecté à chaque matière et composant après broyage et après démantèlement. Il tient compte de l'existence de filières de recyclage à l'échelle industrielle (au moins deux unités de recyclage présentant des volumes conséquents dans au moins un pays

de l'union Européenne). Les taux définis dans le cadre du projet Eco'DEEE, à prendre en considération dans cette méthode de calcul sont présentés en annexe.

Ainsi, si les thermoplastiques sont potentiellement 100% recyclables, il n'existe réellement qu'une filière de recyclage que pour certains d'entre eux.

7.4.11. Valorisation

Aptitude des composants à être valorisés après avoir été retirés du flux de fin de vie

7.4.12. Taux de valorisabilité, R_{cov}

R_{cov}

Pourcentage de la masse (fraction massique, en %) d'un nouvel équipement qui peut être potentiellement recyclé, valorisé ou les deux

Un taux de valorisabilité potentiel est affecté à chaque matière et composant après broyage et après démantèlement. Les taux définis dans le cadre du projet Eco'DEEE, à prendre en considération dans cette méthode de calcul sont présentés en annexe.

7.4.13. Liens réversibles – Liens irréversibles

Défini le caractère de réversibilité des liens physiques entre les différentes pièces, autorisant ainsi ou non leur séparation par un procédé manuel de démantèlement.

	Valorisation		Résidus non définis
Composants Réutilisation	Matériaux Recyclage	Matériaux Valorisation énergétique	Matériaux Pas de valorisation (déchets ultimes)
Taux de réutilisabilité			
Taux de recyclabilité (%)			
Taux de valorisabilité (%)			
Masse de l'équipement			

Figure 18 -: Vocabulaire général, vue d'ensemble

7.4.14. Filière générique du traitement en fin de vie d'un DEEE

Les processus de traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques sont variés et dépendent notamment des paramètres suivants :

- procédés mis en œuvre par l'opérateur de traitement ;
- localisation géographique (Etat membre, Région,...) ;
- type d'équipement traité (GEM froid, GEM Hors froid, PAM, Téléviseur,...).

L'étude menée au cours du projet Eco'DEEE a toutefois permis de définir un scénario standard avec des précisions suffisantes pour le rendre universel en vue d'un calcul standardisé du potentiel de recyclabilité de l'ensemble des équipements électriques et électroniques.

Ce processus est fondé sur les exigences de la directive 2002/96/CE relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques ainsi que sur l'observation des procédés de traitement mis en œuvre par 8 opérateurs de traitement de DEEE.

Les étapes du traitement de référence retenues sont les suivantes :

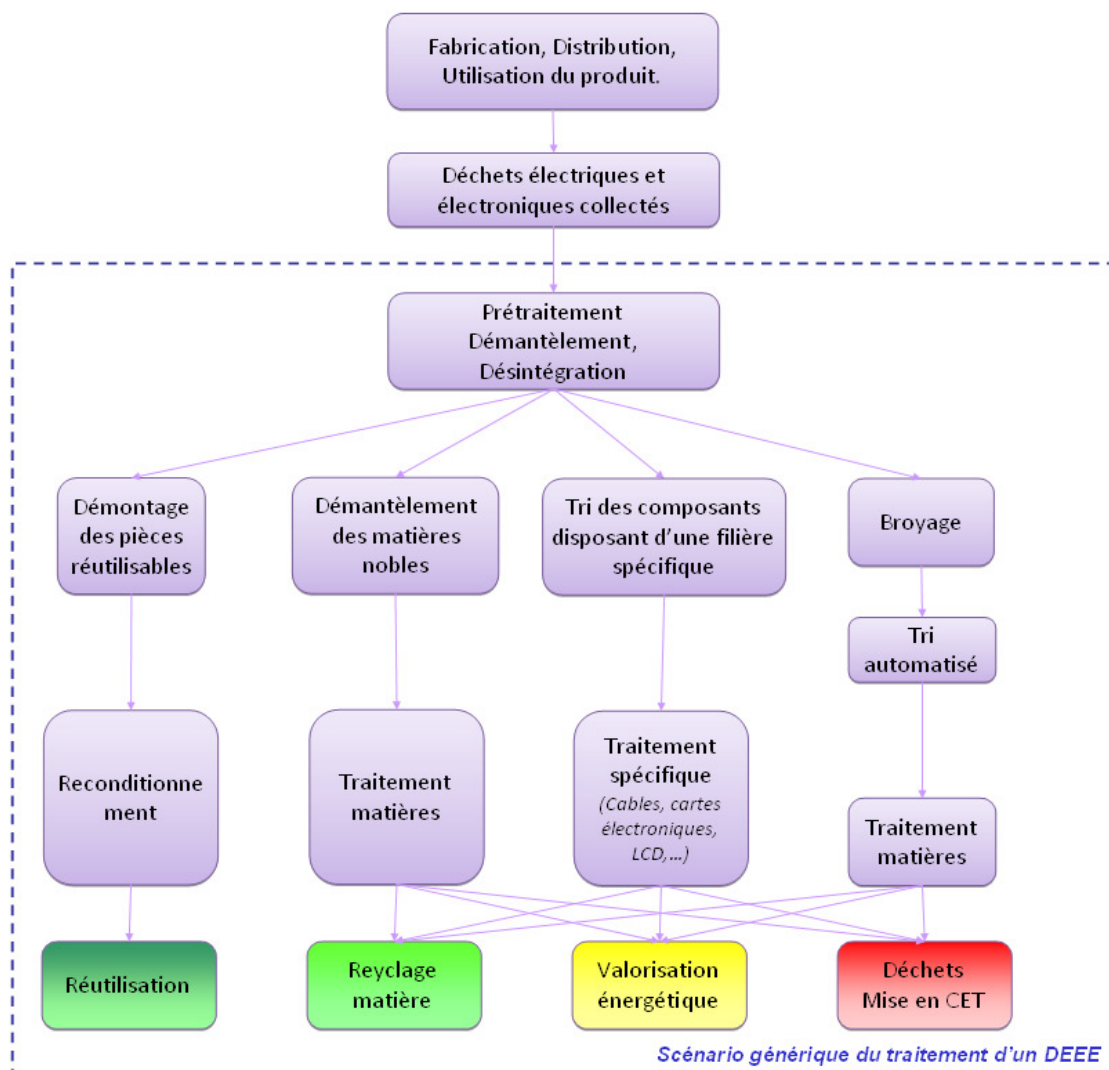


Figure 18 – Schéma du scénario générique de traitement d'un DEEE selon la méthodologie Eco'DEEE.

Ce processus générique tient compte :

- des exigences réglementaires en termes de dépollution ;
- de l'état de l'art des principaux procédés de traitement mis en œuvre par les opérateurs (broyage, tri automatisé) ;
- de la classification des fractions des produits post recyclage.

Si l'étape de dépollution est obligatoire d'un point de vue réglementaire, certains opérateurs procèdent à cette dépollution en phase post broyage (ou post désintégration). Le tri des composants à dépolluer est effectué après l'action mécanique (broyage ou désintégration).

Il a été choisi de considérer uniquement le cas d'une dépollution manuelle, permettant ainsi de promouvoir des règles de conception facilitant le démontage des équipements.

Ce choix est de plus en accord avec la position réglementaire privilégiant le réemploi.

7.5. Les variables et leurs symboles

Le tableau 6 donne les symboles des variables utilisées pour les masses dans le calcul des taux de recyclabilité et de valorisabilité.

Symbole	Signification
m_{REU}	Masse des pièces et composants destinées à de la réutilisation
m_{SEOLT}	Masse des matériaux et composants pris en compte à l'étape de prétraitement (dépollution) et destinées à un traitement spécifique
m_D	Masse des matériaux et composants pris en compte à l'étape de démontage ou de démantèlement
m_G	Masse des matériaux pris en compte après broyage de l'équipement
t_{CYCD}	Taux de recyclabilité d'une matière ou d'un composant après démantèlement
t_{COVD}	Taux de valorisabilité énergétique d'une matière ou d'un composant après démantèlement
t_{CYCS}	Taux de recyclabilité d'une matière ou d'un composant après broyage
t_{COVS}	Taux de valorisabilité énergétique d'une matière ou d'un composant après broyage
R_{REU}	Désigne le taux de réutilisabilité exprimé en pourcentage de la masse (fraction massique, en pour-cent) de l'équipement. Ce taux ne considère que les matières destinées à de la réutilisation.
R_{CYCm}	Désigne le taux de recyclabilité matière, exprimé en pourcentage de la masse (fraction massique, en pour-cent) de l'équipement. Ce taux ne considère que les matières destinées au recyclage matière.
R_{CYC}	Désigne le taux de recyclabilité de l'équipement, exprimé en pourcentage de la masse (fraction massique, en pour-cent) de l'équipement entrant. Ce taux considère les matières destinées à de la réutilisation additionnées aux matières destinées à suivre un recyclage matière.
R_{COVe}	Désigne le taux de valorisabilité énergétique, exprimé en pourcentage de la masse de l'équipement (fraction massique, en pour-cent). Ce taux ne considère que les matières destinées à subir une valorisation énergétique.
R_{COV}	Désigne le taux de valorisabilité de l'équipement, exprimé en pourcentage de la masse de l'équipement entrant (fraction massique, en pour-cent). Ce taux considère les matières destinées à de la réutilisation additionnées aux matières destinées à suivre un recyclage matière additionnées aux matières destinées à subir une valorisation énergétique.
m_E	Masse de l'équipement
Note : toutes les masses sont exprimées en kg	

7.6. Méthode de calcul

7.6.1. Séquence des étapes de valorisation considérées

Le calcul des taux de recyclabilité et de valorisabilité est effectué en quatre étapes appliquées à un équipement pour lequel les composants, matériaux ou les deux peuvent être pris en compte à chacune des étapes suivantes :

- a) prétraitement (dépollution)
- b) démontage/démantèlement
- c) séparation des métaux post broyage
- d) traitement des fractions non métalliques post broyage

Attention, cette séquence généralement observée chez les recycleurs peut ne pas être suivie pour certains produits, en particulier ceux non couverts par la réglementation européenne des DEEE.

7.6.2. Décomposition par pièces

L'équipement est considéré comme un assemblage de différentes pièces et composants, constitué d'une ou plusieurs matières. La décomposition du produit est établie par son arborescence. Chaque pièce est définie par sa composition matière.

Les composants devant faire l'objet d'une dépollution sont identifiés dans l'arborescence de l'équipement.

Les composants réutilisables sont identifiés dans l'arborescence de l'équipement.

La masse de chaque pièce doit être déterminée.

Les caractéristiques de réversibilité des liens entre les pièces et composants doivent être déterminées.

7.6.3. Détermination des masses partielles

7.6.3.1. Prétraitement – dépollution – détermination de m_{SEOLT}

A cette étape du calcul, les composants suivants doivent être pris en compte :

- condensateurs contenant du polychlorobiphényle (PCB) ;
- composants contenant du mercure, tels que les interrupteurs ou les lampes à rétro éclairage ;
- piles et accumulateurs ;
- cartes de circuits imprimés de téléphones mobiles, et de tout appareil d'une manière générale si la surface de la carte de circuit imprimé est supérieure à 10 centimètres carrés ;
- cartouches de toner, liquide ou en pâte, ainsi que les toners de couleur ;
- matières plastiques contenant des retardateurs de flamme bromés ;
- déchets d'amiante et composants contenant de l'amiante ;

- tubes cathodiques ;
- chlorofluorocarbones (CFC), hydrochlorofluorocarbone (HCFC) ou hydrofluorocarbone (HFC), hydrocarbures (HC) ;
- lampes à décharge ;
- écrans à cristaux liquides (ainsi que leur boîtier le cas échéant) d'une surface supérieure à 100 centimètres carrés et tous les écrans rétroéclairés par des lampes à décharge ;
- câbles électriques extérieurs ;
- composants contenant des fibres céramiques réfractaires tels que décrits à l'annexe 1 de l'arrêté du 20 avril 1994 modifié relatif à la déclaration, la classification, l'emballage et l'étiquetage des substances ;
- composants contenant des substances radioactives à l'exception des composants en quantités ne dépassant pas les seuils d'exemption fixés au tableau A de l'annexe 13-8 du code de la santé publique ;
- condensateurs électrolytiques contenant des substances dangereuses (hauteur > 25 mm, diamètre > 25 mm ou volume proportionnellement similaire).

Cette liste correspond aux exigences de dépollution de la directive DEEE (annexe 2 de la directive). Elle s'applique dans le cadre de la présente méthode aux équipements électriques et électroniques soumis ou non à cette directive.

Note : Par fluide on entend, par exemple, les fluides frigorigènes contenus dans les équipements de type réfrigérateurs, congélateurs, climatisations ainsi que tous les fluides tels que les huiles de frites, ...

Dans le cadre du présent calcul, le taux de recyclabilité et de valorisabilité de chaque composant ou matière doit être considéré.

Il faut déterminer la masse m_{SEOLT} de chaque composant devant être dépollué. Cette masse devra être multipliée lors du calcul final par le taux de recyclabilité et le taux de valorisabilité de chacun des composants dépollués. Des taux de valorisabilité de certains composants sont présentés en annexe 1.

7.6.3.2. Réutilisation

A cette étape du calcul, les composants ou les pièces définies comme réutilisables sont prises en compte.

La prise en compte d'un composant comme réutilisable est de la responsabilité du constructeur et doit être justifiée.

A titre indicatif, les composants ou les pièces définies comme réutilisables sont considérées comme réutilisables si aucun lien irréversible ne les lie au reste du produit et s'il existe une filière de réutilisation de ce composant. Ne peuvent être pris en compte que les composants pour lesquels il existe ou sera mis en place une filière industrielle de réutilisation.

Il faut déterminer la masse, m_{Ri} de chaque composant défini comme réutilisable.

Ex : si un capot est défini comme réutilisable, définir sa masse m_R sous la forme m_{R_capot} .

Si une pièce est effectivement réutilisée/réutilisable à un niveau industriel, le taux de réutilisabilité considéré est égal à 100%.

7.6.3.3. Démontage – détermination de m_D

A cette étape du calcul, certains autres composants recyclables de l'équipement peuvent être pris en compte, en se basant sur ce qui suit.

La prise en compte d'un composant lors de l'étape de démontage est de la responsabilité du constructeur et doit être justifiée.

A titre indicatif, un composant / une pièce peut faire l'objet d'un démontage en vue de son recyclage s'il remplit un certain nombre de conditions. En illustration, on peut citer les exemples de conditions suivantes :

- accessibilité de la pièce à un coût acceptable (pièce superféficielle ou non, liens réversibles ou non, liens cassables ou non, etc.) ;
- ratio masse de la pièce / temps de démontage ;
- existence d'un marché pour le matériau constitutif de la pièce.

Ces conditions doivent être déterminées pour le produit et les pièces en questions, si nécessaire avec des partenaires recycleurs.

Une pièce doit être considérée comme recyclable et valorisable en se basant sur son potentiel de recyclabilité et de valorisation énergétique après démantèlement. Ceci représente l'exigence de calcul pour les composants démontables. Ces taux de recyclabilité potentiels après démantèlement tiennent compte de l'existence de filières de recyclage viables à l'échelle industrielle.

Les taux de recyclabilité et de valorisabilité après démantèlement des matières et composants, représentatifs des filières de traitement des DEEE ménagers, sont présentés en annexe 1. Ces taux sont à prendre en considération pour le présent calcul dans le cas où l'équipement suit une filière classique de traitement des DEEE.

Il faut déterminer la masse m_D , de chacune des pièces pouvant être démontées. La masse de ces pièces devra être multipliée par le potentiel de recyclabilité et de valorisabilité après démantèlement de la matière principale en composition.

Note : Dans le cas où l'équipement considéré n'est pas un équipement ménager, le producteur a la possibilité de mettre en place une filière spécifique de collecte et de traitement de son équipement. Dans ce cas seulement, les taux présentés en annexe peuvent être adaptés pour tenir compte des taux spécifiques de cette filière dans la mesure où ceux-ci sont connus et peuvent être justifiés par des statistiques obtenues dans le cadre de campagnes de traitement.

Ex : Un fabricant met en place un partenariat avec un opérateur de traitement permettant de recycler 100% de la masse des boîtiers en plastiques de l'équipement, il est autorisé de considérer un taux de recyclabilité ajusté tenant compte de la réalité de la filière spécifique en question sous réserve d'être en mesure de justifier les chiffres avancés.

7.6.3.4. Broyage – détermination de m_G

A cette étape du calcul, les pièces n'ayant pas été prises en compte lors des étapes précédentes doivent être considérées.

Il faut déterminer la masse m_G de chaque pièce. La masse des matières correspondantes doit être multipliée par leurs taux respectifs de recyclabilité et le taux de valorisabilité après broyage. Les taux de recyclabilité et les taux de valorisabilité à prendre en considération sont présentés en annexe 1.

En l'absence de données sur des matières particulières présentées en annexe 1, le cas le plus défavorable doit être pris en compte.

Le calcul à mettre en œuvre est décrit dans le chapitre suivant.

7.6.4. Calcul des taux de réutilisabilité, de recyclabilité et de valorisabilité

7.6.4.1. Taux de réutilisabilité, R_{REU}

Calculer le taux de réutilisabilité R_{REU} de l'équipement comme un pourcentage de sa masse (fraction massique, en %), à l'aide de la formule suivante :

$$R_{REU} = \frac{\sum(m_{REUi})}{m_E} \times 100$$

7.6.4.2. Taux de recyclabilité matière et taux de recyclabilité, R_{CYCm} , R_{CYC}

Calculer le taux de recyclabilité matière R_{CYCm} , de l'équipement comme un pourcentage de sa masse (fraction massique, en %), à l'aide de la formule suivante :

$$R_{CYCm} = \frac{\sum(m_{SEOLTi} \times t_{CYCDi}) + \sum(m_{Di} \times t_{CYCDi}) + \sum(m_{Gi} \times t_{CYCGi})}{m_E} \times 100$$

Ainsi le taux de recyclabilité matière correspond à la somme des taux de recyclabilité des composants nécessitant un traitement spécifique issus de la dépollution, additionné à la somme des taux de recyclabilité des matières issues du démantèlement, additionné à la somme des taux de recyclabilité des matières issues du broyage.

Calculer le taux de recyclabilité R_R , de l'équipement comme un pourcentage de sa masse (fraction massique, en %), à l'aide de la formule suivante :

$$R_{CYC} = R_{REU} + R_{CYCm}$$

Il s'agit de la somme des fractions de l'équipement réutilisées et recyclées.

7.6.4.3. Taux de valorisabilité énergétique et taux de valorisabilité de l'équipement, R_{COVe} , R_{COV}

Calculer le taux de valorisabilité énergétique R_{COVe} , de l'équipement comme un pourcentage de sa masse (fraction massique, en %), à l'aide de la formule suivante :

$$R_{COVe} = \frac{\sum(m_{SEOLTi} \times t_{COVDi}) + \sum(m_{Di} \times t_{CYCDi}) + \sum(m_{Gi} \times t_{COVGi})}{m_E} \times 100$$

Calculer le taux de valorisabilité R_{COV} , de l'équipement comme un pourcentage de sa masse (fraction massique, en %), à l'aide de la formule suivante :

$$R_{COV} = R_{REU} + R_{CYC} + R_{COVe}$$

Le taux de valorisation correspond à la somme des taux de réutilisabilité, de recyclabilité et de valorisabilité énergétique.

7.6.4.4. Taux de déchets résiduels

Il est entendu que les éléments du produit ne faisant pas l'objet d'une réutilisation, d'un recyclage ou d'une valorisation énergétique sont considérés comme des déchets (pouvant être incinérés sans valorisation énergétique ou mis en centre d'enfouissement technique).

7.6.4.5. Incertitudes

Les résultats obtenus correspondent à une valeur estimée du taux de recyclabilité et de valorisabilité d'un équipement. Il est à noter que les incertitudes sur les taux de valorisabilité des matériaux et composants sont aujourd'hui importantes. Les résultats doivent être considérés comme un potentiel de recyclabilité avec un degré de précision limité estimé à plus ou moins 5%.

8. Intégration de la méthode Eco'DEEE dans l'outil d'ACV EIME

En tenant compte des réflexions méthodologiques menées dans le cadre du projet, des spécifications de développements informatiques ont été rédigées pour guider le développement de la nouvelle version du logiciel EIME.

L'objectif était de développer les fonctionnalités du logiciel EIME en matière d'aide à l'écoconception en vue du recyclage.

Les chapitres suivants présentent les actions réalisées sur cette étape du projet.

8.1. Calcul des taux de recyclabilité des équipements électriques et électroniques

8.1.1. Etat des lieux de l'existant

EIME est un outil d'écoconception implanté au sein des entreprises du secteur électrique et électronique. Le logiciel présentait déjà des fonctionnalités destinées à améliorer la conception en vue de la fin de vie.

Le retour d'expérience des utilisateurs actuels du logiciel a fait ressortir la nécessité de faire évoluer la méthode suite à la mise en place notamment de la directive DEEE et des filières de traitement des produits.

Développer le logiciel EIME doit permettre d'assurer une large diffusion de la méthodologie développée dans le cadre du projet Eco'DEEE.

Les fonctionnalités existantes d'EIME sont présentées ci-après :

L'utilisateur modélise l'arborescence de son produit. Il précise la composition de chacune des pièces et indique au logiciel les liens existants entre les différents sous ensembles (colle, vis, rivets, soudure,...). L'utilisateur choisit ensuite entre deux scénarios de fin de vie : un scénario de démantèlement ou un scénario de broyage. Tous les calculs se passent ensuite en coulisse.

L'impression d'écran suivante présente l'interface utilisateur du logiciel dans lequel un lien vissage a été défini entre différentes pièces du produit.

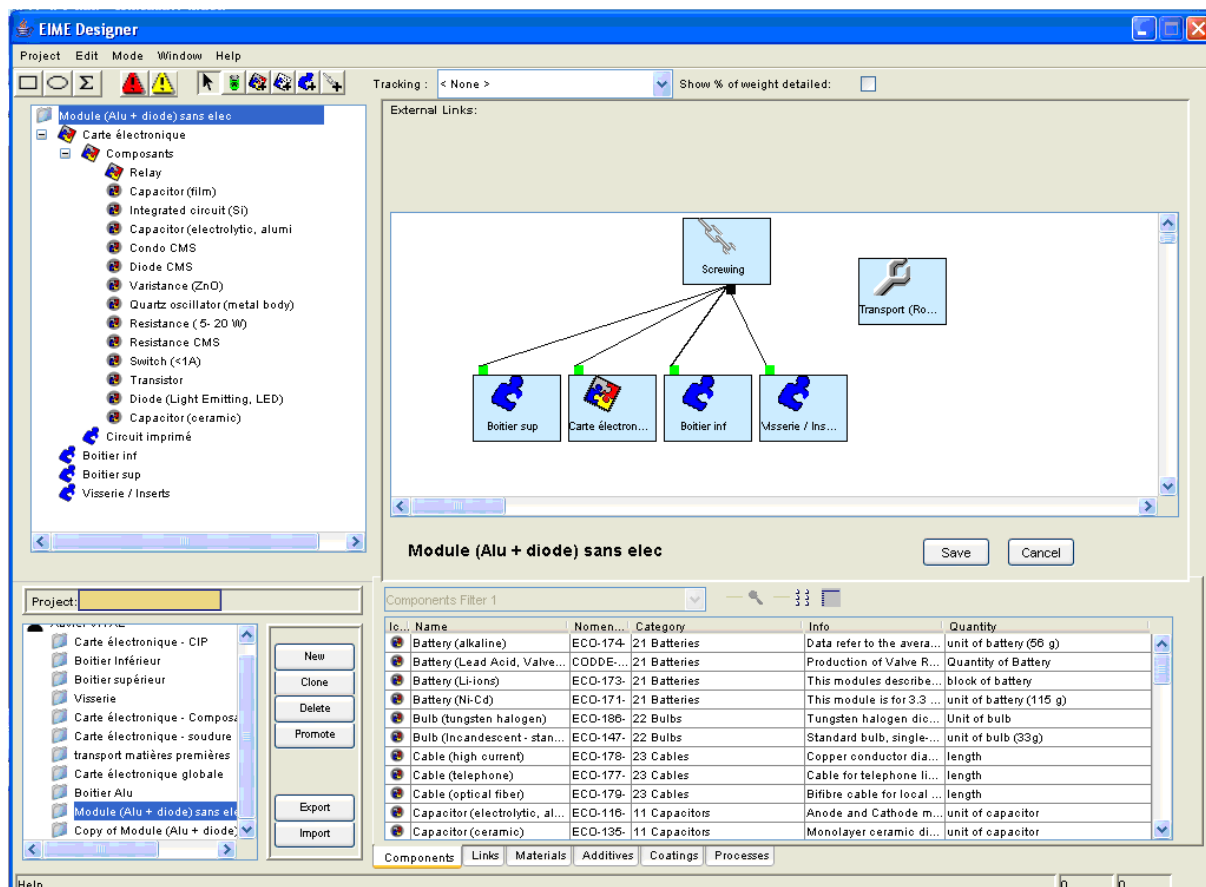


Figure 19 - Présentation de l'interface designer EIME – modélisation de l'arborescence d'un produit et prise en compte des liens entre les sous ensembles

L'impression d'écran suivante présente l'onglet fin de vie dans lequel l'utilisateur choisit son scénario de traitement pour son produit.

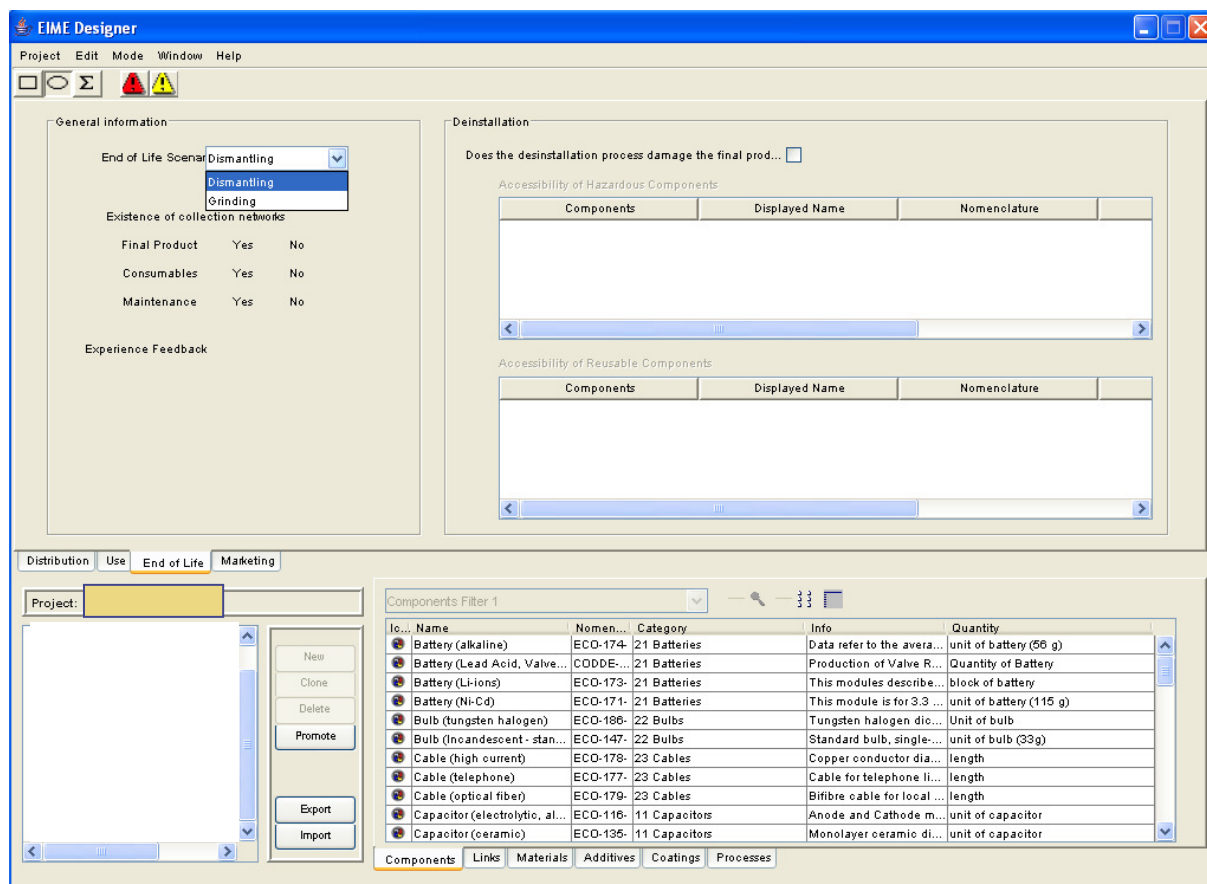


Figure 20 - Présentation de l'interface designer EIME – choix du scénario de fin de vie

L'algorithme de calcul actuel tient déjà compte d'un scénario complexe de fin de vie d'un DEEE. Le scénario de démantèlement permet de tenir compte de l'étape de dépollution des composants listés par la directive DEEE et de la séparation sélective des pièces définies comme intéressantes d'un point de vue économique. On considère que le reste du produit subit un broyage.

Les informations suivantes sont prises en compte :

- architecture du produit ;
- liens entre les sous ensembles ;
- compatibilité pour le recyclage entre les matières non séparables ;
- substances ou composants « polluants » nécessitant un traitement spécifique ;
- potentiels de recyclabilité après broyage ou après démantèlement des matières et composants.

La base de données contient en effet pour chaque matériau et chaque composant des informations sur les taux de recyclabilité après broyage ou après démantèlement. Si deux matières ne peuvent être séparées, le logiciel se réfère à une table de compatibilité qui lui indique si les matières sont compatibles en vue du recyclage.

L'ensemble du produit passe ainsi par l'algorithme du logiciel qui est en mesure de calculer un taux de recyclabilité potentiel du produit.

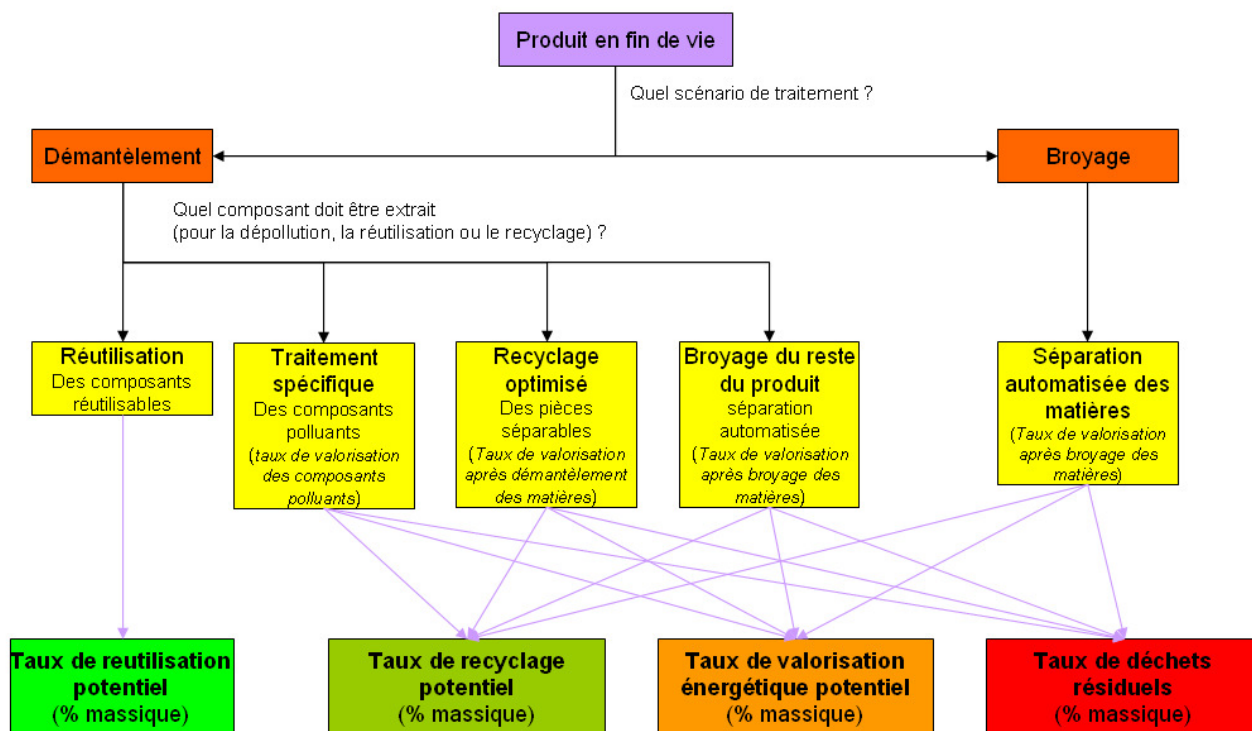


Figure 21- Algorithme simplifié de calcul des taux de recyclabilité par EIME

Le développement des fonctionnalités d'EIME permettent de caractériser précisément les différentes fractions du produit selon les filières décrites dans la réglementation :

- réutilisation ;
- recyclage ;
- valorisation énergétique ;
- déchets (ultimes mis en décharge).

L'outil permet à l'utilisateur d'identifier dans son produit les points faibles en vue du recyclage

Il permet aussi désormais de quantifier les impacts environnementaux de la fin de vie du produit.

8.1.2. Présentation des nouvelles fonctionnalités

Les évolutions réalisées dans le cadre du projet Eco'DEEE sont présentées ci-après :

L'algorithme général proposé par le logiciel est conservé. Les étapes successives du traitement du produit par EIME sont conformes aux étapes de traitement observées sur le terrain. Comme prévu par la directive DEEE, la priorité est donnée dans l'ordre à la réutilisation, suivie du recyclage, de la valorisation puis de la mise en CET.

8.1.2.1. Evolution des données contenues dans la base de données matériaux et composants

Comme le montre l'impression d'écran suivante, la structure de la base de données EIME actuelle permet de mentionner pour chaque matière et chaque composant le taux de recyclabilité potentiel après broyage et après démantèlement (valeurs présentées non à jour).

The screenshot shows the 'EIME Expert' application window. On the left, there's a 'Type of Module' section with radio buttons for 'Component', 'Process', and 'Material'. Below it is a list of modules, with 'Battery (alkaline)' selected. The main area is divided into several panels: 'Component Characteristics' (with fields for Ref. unit, Ref. value, Range), 'Energy Consumption' (with fields for Active, Idle, Sleep, Off), 'Physical Characteristics' (with fields for Recycled Content, Weight, Volume, Life Span), and 'Component Options' (with checkboxes for Expandable, Consumable, Labeled, Reusable, Detailed description). A red circle highlights the 'Recycling Potential' section, which contains fields for Recycling Potential, Downcycling Potential, Rec. Pot. after grinding, and Energy Recovery Pot.

Figure 22 - Architecture actuelle de la base de données EIME composants et matériaux

La nouvelle version du logiciel doit permettre de séparer la notion de potentiel de valorisation énergétique :

The screenshot shows the 'EIME Expert' application window with the new architecture. The 'Recycling Potential' section is highlighted with a red circle. It now includes separate fields for 'After dismantling' and 'After grinding', each with 'Recycling Potential', 'Energy recovery potential', and 'Downcycling Potential'. The 'Component Options' section also includes a new checkbox for 'Selective End Of Life Treatment'.

Figure 23 - Nouvelle architecture de la base de données EIME composants et matériaux

Les données sur les taux de recyclabilité des matières et composants collectées au cours du projet ont été intégrées dans la nouvelle version de la base de données du logiciel (Version EIME BDD 10.0) livrée en août 2008.

8.1.2.2. Evolution du calcul des indicateurs de recyclabilité

L'impression d'écran suivante montre les résultats bruts obtenus aux moyens d'EIME sur le calcul des taux de recyclabilité potentiel des produits avec la méthode actuelle.

The screenshot shows the EIME Designer interface with a table of indicators. The table has columns for name, unit, sum, and Value. The data is as follows:

name	Unit	sum	Value
Weight Ratio of Special Handling Components	%	0E0	0E0
Weight Ratio of Reusable Components	%	0E0	0E0
Weight Ratio of Recyclable Components	%	100	100
Weight Ratio of Waste	%	0E0	0E0
Number of Special Handling Components	unit	0E0	0E0
Number of Extractable Reusable Components	unit	0E0	0E0
Number of Problematic Lines	unit	0E0	0E0
Number of Distinct Materials (all phased)	unit	1	1

Below the table, there are tabs for Physical Characteristics, Use Characteristics, and End Of Life Characteristics. The 'End Of Life Characteristics' tab is selected. There are also checkboxes for 'sum' and 'Value', both of which are checked. At the bottom, there are tabs for Impact Indicators, Design Indicators, and Bills of Materials.

Figure 24 - Présentation actuelle des résultats du calcul de la recyclabilité potentielle des produits avec EIME

La nouvelle interface est présentée ci-après :

The screenshot shows the EIME Designer interface with a table of new end-of-life indicators. The table has columns for name, unit, sum, and Value. The data is as follows:

name	Unit	sum	Value
Total		99.168	99.168
Weight Ratio of Reusable Components	%	0E0	0E0
Weight Ratio of Recyclable Components	%	32.01	32.01
Weight Ratio of Incinerated Components	%	5.7593E-1	5.7593E-1
Weight Ratio of Waste	%	66.582	66.582

Below the table, there are tabs for Recycling Potential, End Of Life Characteristics, Physical Characteristics, and Use Characteristics. The 'Recycling Potential' tab is selected. There are also checkboxes for 'sum' and 'Value', both of which are checked. At the bottom, there are tabs for Impact Indicators, Design Indicators, and Bills of Materials. The 'Project' field is set to 'EIME BDD10' and the 'User' field is set to 'new NEW'.

Figure 25 - Nouveaux indicateurs de fin de vie calculés aux moyens d'EIME

8.1.2.3. Développement du tracking des indicateurs de fin de vie

L'ensemble des indicateurs de fin de vie font désormais l'objet d'un tracking. Cela signifie que le logiciel propose à l'utilisateur d'identifier dans la structure du produit les sous-ensembles réutilisables, recyclables, valorisables ou ceux considérés comme déchets. Cette fonctionnalité offre une plus grande transparence des calculs mis en œuvre et sera un outil puissant d'aide à l'écoconception orientée fin de vie des produits.

Pour permettre les évolutions présentées précédemment, un travail important d'évolution de la structure informatique du logiciel a été nécessaire.

8.1.3. Tests et validation – exemple de calcul pour un équipement ménager

La méthodologie de calcul Eco'DEEE intégrée et automatisée dans le logiciel EIME a été testée sur plusieurs équipements en cours de conception ou de reconception.

Ce chapitre présente les résultats du calcul qui ont pu être obtenus.

Le produit analysé est un produit domestique destiné au grand public permettant de traiter de l'eau de boisson. Pour des raisons de confidentialité, le nom du produit ne sera pas mentionné.

Ce produit a fait l'objet d'une analyse du cycle de vie aux moyens de la nouvelle version du logiciel EIME permettant ainsi le test des nouveaux indicateurs de fin de vie.

Les résultats obtenus sont les suivants :

Indicateurs de fin de vie	
Ratio massique d'éléments réutilisables	<< 1 %
Ratio massique d'éléments recyclables	78 %
Ratio massique d'éléments incinérés	2 %
Ratio massique de déchets (enfouissement)	20 %

Figure 26 -Résultats EIME du calcul du potentiel de recyclabilité du produit étudié selon la méthodologie Eco'DEEE

8.2. Fonctionnalités d'aide à l'écoconception

Le calcul d'un taux de recyclabilité peut permettre à l'entreprise de communiquer mais aussi de se fixer des objectifs d'amélioration.

Ainsi, il convient d'identifier les axes de progrès permettant d'augmenter les taux de recyclabilités calculés.

La fonctionnalité de tracking permet rapidement d'identifier par exemple les éléments qui ne seront pas valorisés (car non recyclables) et ainsi de réfléchir à des solutions de remplacement.

La figure suivant présente cette fonction tracking sur le produit étudié :

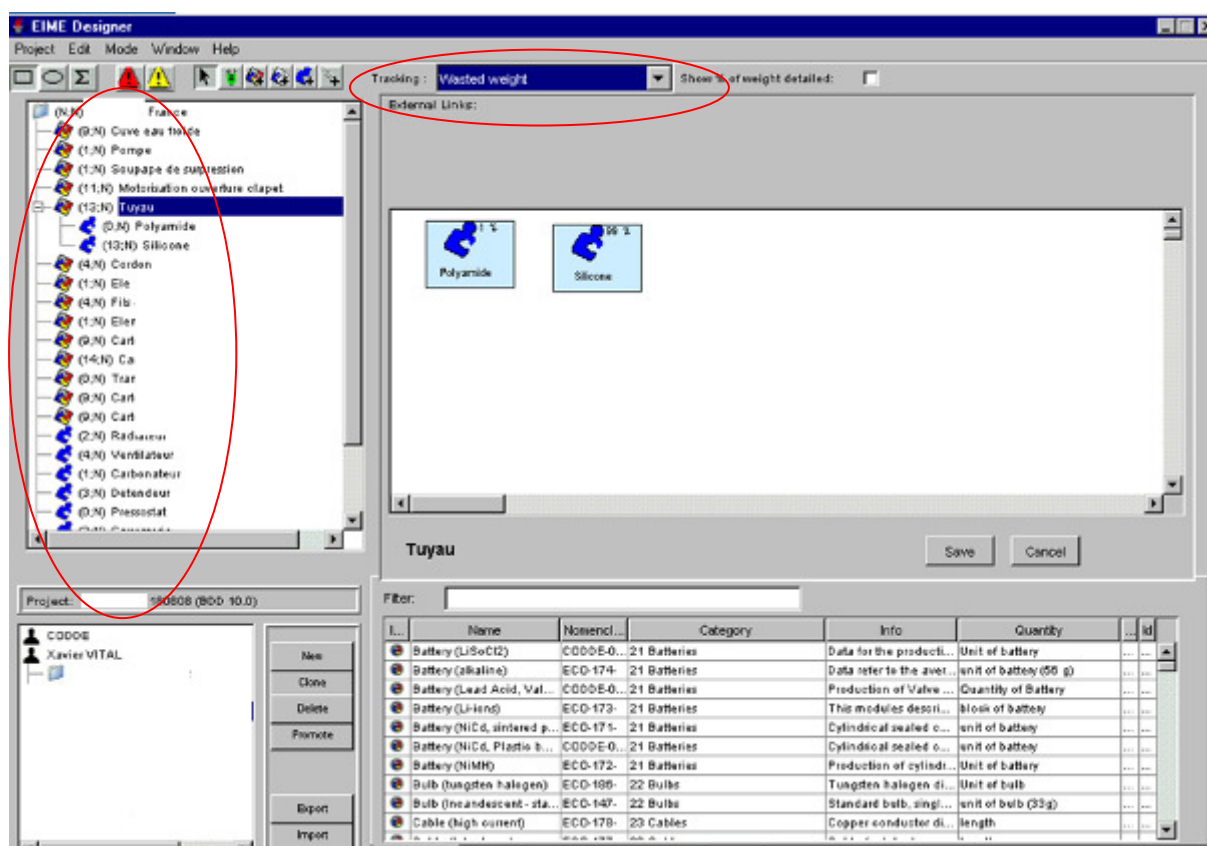


Figure 27 - Tracking des éléments considérés comme non valorisables dans l'arborescence d'un produit

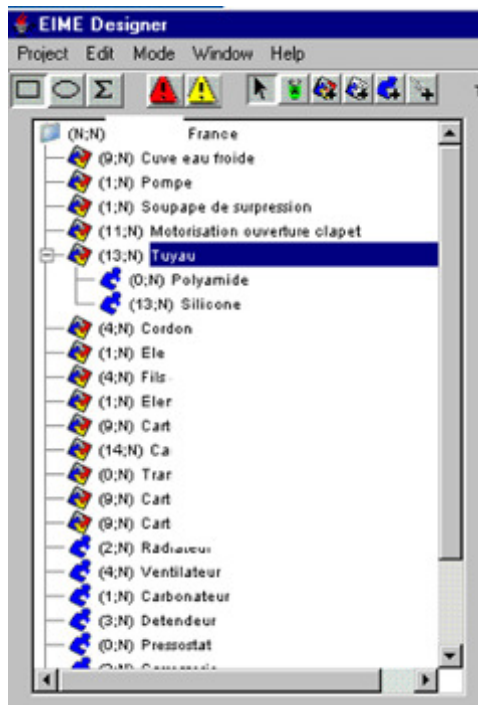


Figure 28 - Focus sur l'arborescence du produit – exemple, 13% des éléments non valorisables se situent au niveau du tuyau en raison de la présence de silicone

L'ensemble des indicateurs de fin de vie peuvent être recherchés. Il est ainsi possible d'identifier rapidement les éléments nécessitant un traitement spécifique (batteries, cartes électroniques, écrans LCD,...) afin de prévoir de faciliter leur séparation en fin de vie.

8.3. Calcul des impacts environnementaux d'un scénario de traitement en fin de vie

En raison du manque de données environnementales disponibles pour tenir compte des impacts environnementaux de la fin de vie, la méthodologie EIME ne permettait pas jusque là leur calcul.

Les informations collectées dans le cadre du projet Eco'DEEE ont permis la mise en place de scénarios représentatifs du traitement d'équipements électriques et électroniques. Un exemple de scénario pour le produit étudié dans le chapitre précédent pourrait être le suivant :

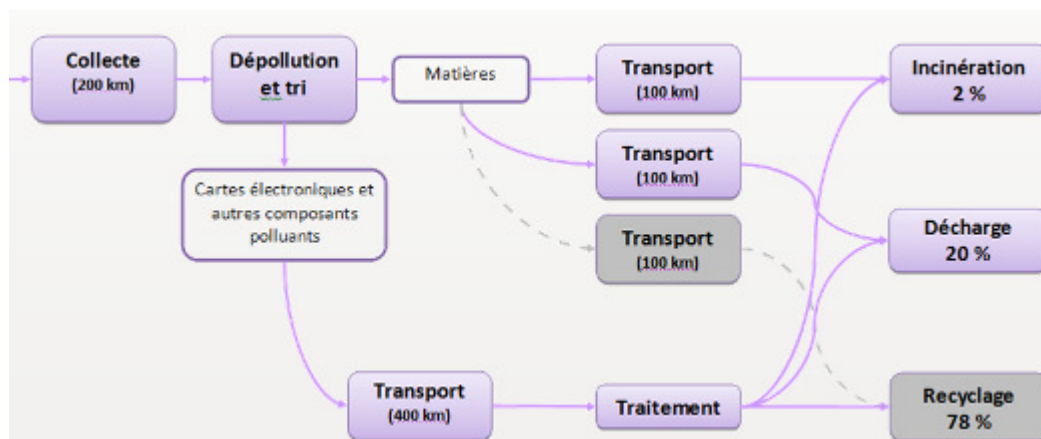


Figure 29 – Présentation des étapes prise en compte pour le calcul des impacts environnementaux d'un scénario de traitement d'un DEEE

La base de données version 10.0 du logiciel EIME a été enrichie de données d'inventaires de cycle de vie permettant de tenir compte des impacts environnementaux des procédés de traitement et de recyclage mis en œuvre sur les filières.

Les données disponibles sont les suivantes :

B	C	D	E
Modules Database 10.0 (July 2008)			
New Name	Ref	SOURCE OF DATA	Data
Disposal (Fluorescent lamp treatment)	CODDE-0342	CODDE study based on Ecoinvent and DEAM data	2005
Disposal (Battery alkaline saline, hydrometallurgical treatment)	CODDE-0336	CODDE study based on Ecoinvent and DEAM data	2004
Disposal (Battery alkaline saline, pyrometallurgical treatment)	CODDE-0337	CODDE study based on Ecoinvent and DEAM data	2004
Disposal (Battery Li-Ion, hydrometallurgical treatment)	CODDE-0332	CODDE study based on Ecoinvent and DEAM data	2004
Disposal (Battery Li-Ion, pyrometallurgical treatment)	CODDE-0333	CODDE study based on Ecoinvent and DEAM data	2004
Disposal (Battery NiCd, pyrometallurgical treatment)	CODDE-0334	CODDE study based on Ecoinvent and DEAM data	2004
Disposal (Battery NiMH, pyrometallurgical treatment)	CODDE-0335	CODDE study based on Ecoinvent and DEAM data	2004
Disposal (Cable treatment)	CODDE-0341	CODDE study based on Ecoinvent and DEAM data	2005
Disposal (LCD Panel treatment)	CODDE-0338	CODDE study based on Ecoinvent and DEAM data	2005
Disposal (LCD screen treatment)	CODDE-0339	CODDE study based on Ecoinvent and DEAM data	2005
Disposal (PWB treatment)	CODDE-0340	CODDE study based on Ecoinvent and DEAM data	2005
Disposal (WEEE, pretreatment dismantling and material separation)	CODDE-0345	CODDE study based on Ecoinvent and DEAM data	1995
Disposal (WEEE, residual waste to incineration)	CODDE-0344	CODDE study based on Ecoinvent and DEAM data	1995
Disposal (WEEE, residual waste to landfill)	CODDE-0343	CODDE study based on Ecoinvent and DEAM data	1995

Tableau 6 – Présentation des données d'inventaire de cycle de vie intégrées à la base de données EIME

Les sources de données utilisées pour développer les modules sont ECOINVENT, DEAM et des données collectées auprès des opérateurs de traitement.

La qualité des informations sont jugées moyennes car en grande partie fondées sur des hypothèses provenant de la littérature. Elles permettent cependant de réaliser une première

simulation des impacts environnementaux de l'étape de fin de vie et d'analyse la contribution de cette étape sur l'ensemble du cycle de vie des produits.

Ci-après les résultats de l'évaluation du produit présenté dans le chapitre précédent :

Tableau 7 – Exemple de résultats quantifiés d'impacts environnementaux sur le cycle de vie d'un produit (Résultats extraits d'EIME).

Le graphique suivant est une représentation de la répartition des impacts environnementaux du même produit obtenue à partir du tableau précédent :

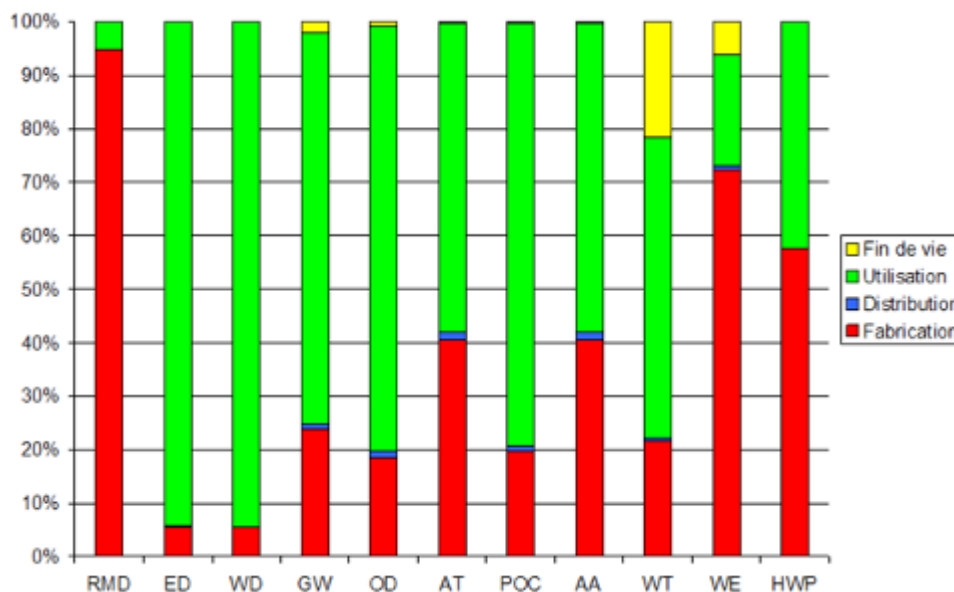


Figure 30 – Exemple de représentation de la répartition des impacts environnementaux d'un produit sur son cycle de vie (Graphique EIME).

A ce jour, la méthode ne considère pas de bénéfices environnementaux associés au recyclage des matières. Seuls les impacts environnementaux des procédés mis en œuvre sont considérés.

Les impacts associés au recyclage matière ne sont pas compris dans le système étudié car ils sont déjà comptabilisés à l'étape de fabrication des équipements. Les étapes prises en compte lors de l'évaluation EIME sont présentées ci-après :

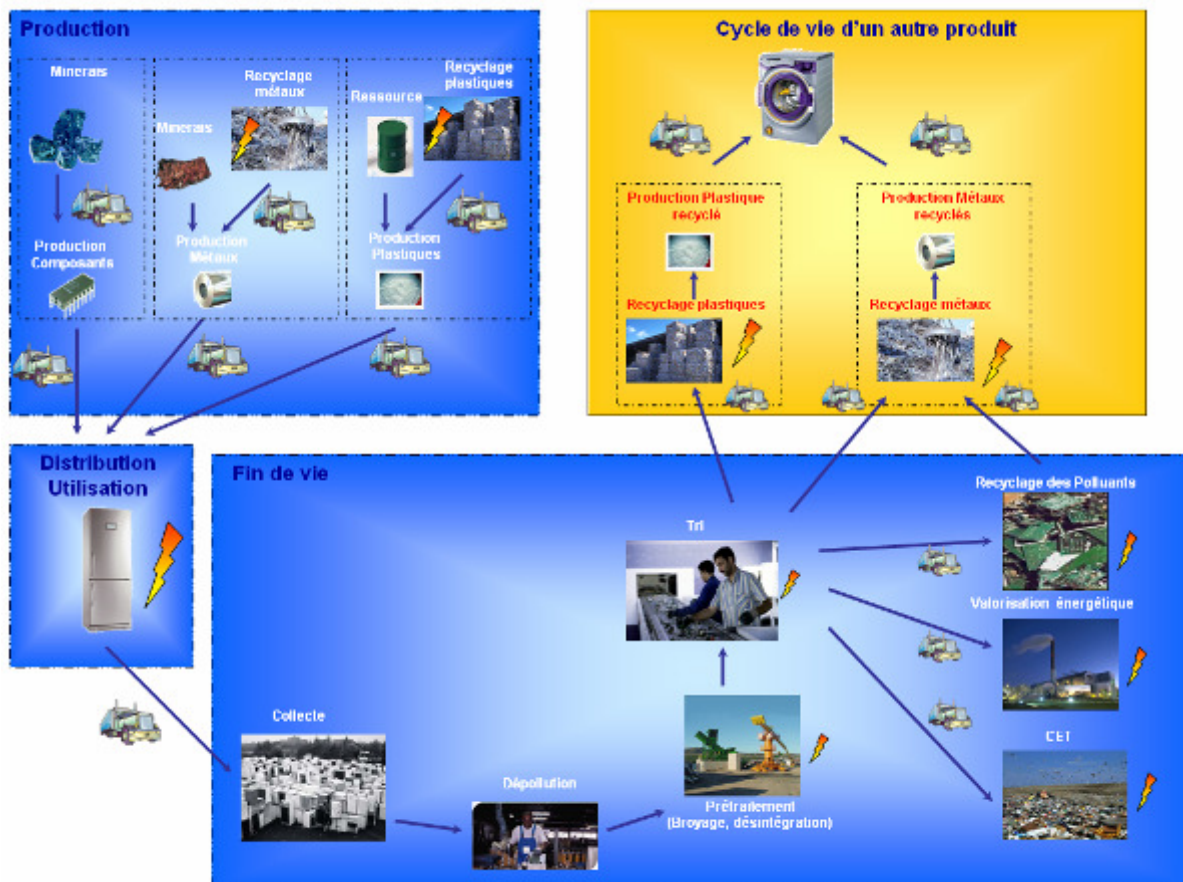


Figure 31 – Illustration des étapes prises en compte dans l'évaluation EIME avec un focus sur l'étape de fin de vie

En bleu sont représentées toutes les étapes du cycle de vie prises en compte dans un calcul avec EIME.

En fonction des choix méthodologiques qui seront effectués dans le cadre de la plateforme sur l'affichage environnemental des produits, cette méthodologie pourra évoluer à l'avenir.

Sources

- [1] Castro, M.B., Remmerswaal, J.A.M., Brezet, J.C., van Schaik, A., Reuter, M.A., *A simulation model of the comminution-liberation of recycling streams - Relationships between product design and the liberation of materials during recycling*. International Journal of Mineral Processing, 2005. **75**(3-4): p. 255-281.
- [2] Chiodo, J.D., Billet, E., Harisson, D., *Active disassembly*. Journal of Sustainable Product Design, 1998(7): p.26-36.
- [3] Claudé, B. *Renewable reinforcements for composites used in automotive applications at Renault (in French)*. in Proceedings of Cars of tomorrow: what potential for renewable materials? 2006. Reims (France).
- [4] Dewulf, W., Duflou, J., Anders, A., *Integrating eco-efficiency in rail vehicle design - Final report of the RAVEL Project*. 2001, Leuven (Belgium): Leuven University Press. ISBN 90-5867-176-3.
- [5] Dowie, T.A., *A disassembly planning and optimisation methodology for design*, in Department of Mechanical Engineering, Design and Manufacture. PhD thesis. 1995, Manchester Metropolitan University: Manchester (United Kingdom). p. 167p.
- [6] Duflou, J., Willems, B., Dewulf, W., *Towards self disassembling products - Design solutions for economically feasible large-scale disassembly*, in Innovation in Life cycle Engineering and Sustainable development, D. Brissaud, Tichkiewitch, S., Zwolinski, P., Editor. 2006, Springer: Dordrecht (The Netherlands).
- [7] ENSAM/ADEME, *Prise en compte de la fin de vie des produits électriques et électroniques dans leur conception*. Rapport technique. 2002, ENSAM Chambéry - ADEME: Chambéry. p. 111p.
- [8] Froelich, D., Haoues, N., Leroy, Y., Renard, H., *Development of a new methodology to integrate ELV treatment limits into requirements for metal automotive part design*. Minerals Engineering, 2007. **20**: p. 891-901.
- [9] Froelich, D., Maris, E., Haoues, N., Chemineau, L., Renard, H., Abraham, F., Lassartesses, R., *State of the art of plastic sorting and recycling: Feedback to vehicle design*. Minerals Engineering, 2007. **20**: p. 902-912.
- [10] Graedel, T.E., Allenby, B.R., *Design for Environment*. 1996: Prentice Hall (USA). ISBN-10 0135316820.
- [11] Haoues, N., Froelich, D., Brissaud, D., Zwolinski, P. *Contribution to integrate constraints of dismantling and recycling in conceptual design*. in Proceedings of 1st International seminar on Society & Materials (SAM1). 2007. Sevilla (Spain).
- [12] Hundal, M. *Design for recycling and remanufacturing*. in Proceedings of International Design Conference - Design 2000. 2000. Dubrovnik (Croatia).
- [13] Johansson, G., *Design for disassembly - A framework*, in Graduate School of Management and Industrial Engineering. Licentiate thesis. 1997, Linköping Universitet: Linköping (Suède). p. 108p.
- [14] Lagerstedt, J., Luttrup, C., *Guidelines in ecodesign: a case study from railway industry*, in Innovation in Life cycle Engineering and Sustainable development, D. Brissaud, Tichkiewitch, S., Zwolinski, P., Editor. 2006, Springer: Dordrecht (The Netherlands).
- [15] Mathieux, F., Rebitzer, G., Ferrendier, S., Simon, M., Froelich, D., *Ecodesign in the European Electr(on)ics Industry - An analysis of the current practices based on cases studies*. Journal of Sustainable Product Design, 2001. **1**(4): p. 233-245.
- [16] Mathieux, F., *Contribution à l'intégration de la valorisation en fin de vie dès la conception d'un produit - Une méthode basée sur l'évaluation multicritères de la*

- recyclabilité du produit et sur l'identification de points faibles de conception*, in *Institut Conception, Mécanique et Environnement*. Thèse de doctorat. 2002, ENSAM Chambéry: Chambéry. p. 288p.
- [17] Mathieux, F., Froelich, D., Moszkowicz, P., *ReSICLED: a new Recovery-Conscious Design method for complex products based on a multicriteria assessment of the recoverability*. Journal of Cleaner Production, 2008. **16**(3): p. 277-298.
 - [18] Renault, *Conception en vue du recyclage*, Ref 00 - 10 - 060. 1994, Renault Automobiles.
 - [19] Renault, *IVF, Indicateur de recyclabilité*, Ref 00 - 10 - 098. 2001, Renault Automobiles.
 - [20] Rose, C.M., *Design for environment: a method for formulating product end-of-life strategies*, in *Department of Mechanical Engineering*. PhD thesis. 2000, Stanford University: Stanford (Etats-Unis). p. 175p.
 - [21] TU Wien, *EcoDesign Pilot webpage*. <http://www.ecodesign.at/pilot/ONLINE/FRANCAIS/> (25/07/2008). 2008.
 - [22] UE, *Directive du Parlement Européen et du Conseil relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques*. 2003, Union Européenne: Bruxelles (Belgique).
 - [23] van Schaik, A., Reuter, M. *Design for Recycling and ecodesign: linking material selection and joining to recycle quality and recycling technology*. in *Proceedings of 2nd International seminar on Society & Materials (SAM1)*. 2008. Nantes (France).
 - [24] Zwolinski, P., Lopez Ontiveros, M.A., Brissaud, D., *Integrated design of remanufacturable products based on product profiles*. Journal of Cleaner Production, 2006. **14**(15-16): p. pp 1333-1345.
 - [25] Brezet, H., Van Hemel, C., *Ecodesign: a promising approach to sustainable production and consumption*. 1997, Paris (France): UNEP.

Liste des Annexes

Annexe 1 : Guidelines Eco'DEEE – Préconisations d'écoconception en vue du recyclage

Ce document est confidentiel et sera transmis aux entreprises ayant suivi le module de formation à l'écoconception orientée fin de vie.

Annexe 2 : Equipements électriques et électroniques – Méthode de calcul des taux de recyclabilité et de valorisabilité

Ce document est public et est libre de diffusion. Il synthétise les choix méthodologiques effectués dans le cadre du présent projet. Les annexes de ce document incluent les taux de recyclabilités et de valorisabilités des matières et composants à prendre en compte pour le calcul du taux de recyclabilité des équipements. Ce document évolue dans le temps. Il est recommandé de demander à CODDE la dernière version à par email à l'adresse codde@codde.fr.

Annexe 3 : Annexe financière relative aux dépenses engagées

9. Synthèse

Le projet Eco'DEEE est un projet de recherche et de développement destiné à développer des méthodes et des outils nécessaires à l'orientation de choix de conception des équipements électriques et électroniques facilitant leur traitement en fin de vie. L'objectif de ce rapport final est de présenter les livrables du projet Eco'DEEE.

La société CODDE est le centre d'expertise international du groupe Bureau Veritas en matière d'évaluation des impacts environnementaux des produits et d'écoconception. Créée en janvier 2003, CODDE a développé un savoir faire spécifique dans le domaine des équipements électriques et électroniques.

CODDE accompagne également des entreprises de la plasturgie, de la mécanique ou du textile. CODDE cumule 25 années d'expérience en écoconception grâce à ses experts, en entreprise au sein des équipes projets. Par ailleurs, au travers de la méthodologie EIME, CODDE dispose d'une base de données sur les impacts des composants, matériaux ou procédés de transformation les plus courants, lui permettant d'analyser tout type de produits et d'apporter aux entreprises une quantification de leur progression.

Ce projet créé à l'initiative de CODDE et soutenu par l'ADEME, rassemble 5 partenaires industriels : Groupe Fagor-Brandt, Neopost Technologies, Sagem Communications, Groupe SEB, Schneider Electric. Trois opérateurs de traitement ont contribué au projet : Derichebourg Environnement, Galloo, Triade Electronique.

Les livrables du projet sont :

- **un état des lieux des procédés de traitement possibles pour les produits cibles des observations (vision Européenne),**

Les visites des principaux sites de traitement ont permis d'identifier les contraintes et limites des procédés mis en œuvre.

- **un recueil d'information concernant les leviers d'optimisation des couples produits et procédés de traitement en fin de vie**, un module d'information sur l'écoconception orientée fin de vie à destination des concepteurs des entreprises,

Rassemblées sous la forme de guidelines, les recommandations d'écoconception en vue du recyclage doivent aider les équipes de conception à orienter leurs choix afin d'augmenter le potentiel de recyclabilité des nouveaux équipements.

- **un module de formation à l'écoconception orientée fin de vie,**

Destiné aux équipes techniques de conception, ce module de formation présente le devenir en fin de vie des différentes catégories d'équipements. Ponctué de nombreuses illustrations et films tournés pendant le projet, cette journée de sensibilisation offre aux équipes de conception la compréhension du devenir probable de leur équipement en fin de vie. Organisée autour de cas concrets, cette journée permet de réfléchir à des solutions techniques de substitution et propose la mise en œuvre de la méthodologie de calcul des taux de recyclabilité des équipements électriques et électroniques Eco'DEEE.

- **la mise en place d'une méthodologie de calcul des taux de recyclabilité des équipements électriques et électroniques,**

En l'absence d'une norme internationale fixant les règles de calcul de la recyclabilité d'un équipement électrique et électronique, les entreprises ont spontanément développé des méthodes leur propre méthode de calcul. La diversité des hypothèses et méthodes rend impossible la comparaison des résultats et des chiffres communiqués. Fort de ce constat, les d'expériences et réflexions du projet Eco'DEEE ont été rassemblées dans une méthodologie de calcul des taux de recyclabilité des équipements électriques et électroniques. Cette méthode a pour vocation d'être partagée afin de proposer un référentiel de calcul aux industriels.

- **L'intégration de cette méthodologie dans l'outil d'analyse du cycle de vie EIME.**

La méthodologie Eco'DEEE a été intégrée dans le logiciel d'analyse du cycle de vie EIME. Le logiciel de référence pour l'analyse environnementale des produits électriques et électroniques propose ainsi le couplage de l'analyse du cycle de vie avec des fonctionnalités pragmatiques d'aide à l'écoconception. Accessible à des non experts, cette intégration permet d'apporter aux équipes de conception des outils efficaces d'aide à la décision. Les fonctions de tracking permettent ainsi très facilement d'identifier les éléments de l'architecture d'un produit qui ne pourront être valorisés et ainsi orienter précisément les efforts de conception sur les aspects environnementaux significatifs.

Des données d'inventaire de cycle de vie ont en outre été développées afin de permettre le calcul des impacts environnementaux de la fin de vie des équipements. Ces nouvelles fonctionnalités permettent aux utilisateurs du logiciel EIME de calculer les impacts environnementaux d'un équipement sur l'intégralité de son cycle de vie.

Les livrables du projet constituent une boîte à outils permettant d'accompagner les équipes de conception dans la mise en place d'une démarche d'écoconception orientée fin de vie. Ces outils sont complémentaires aux outils déjà existants (ACV par exemple) et se veulent adaptés aux besoins particuliers des industriels.

Les réflexions menées dans le cadre du projet Eco'DEEE ont pour vocation de vivre et d'évoluer au fil des évolutions des filières de traitement et de l'amélioration des connaissances relatives au recyclage des matières et composants. La méthodologie Eco'DEEE fixant des règles rigoureuses de mesure de la qualité d'un équipement en vue de son traitement en fin de vie, son utilisation pour contribuer aux réflexions de normalisation internationale ou pour le développement d'une grille d'éco-participation différenciant les produits conçus pour le recyclage est une option à considérer.