

## Industrie et recyclage

# Traitement automatique des DEEE par séparations minéralurgiques

**L'objectif de cette étude est d'identifier les techniques physiques susceptibles d'être appliquées industriellement pour la séparation des composants principaux de lots de DEEE.**

**Afin de travailler dans des conditions équivalentes à celles industrielles, l'étude a été réalisée sur des lots de DEEE tout-venant.**

**L**e recyclage permet d'économiser les ressources naturelles, les matières premières et l'énergie. Sa pratique a débuté depuis très longtemps, notamment au sein des filières de la métallurgie et de la sidérurgie. Il y a 6 000 ans, c'est-à-dire à l'âge de bronze, les métaux étaient déjà recyclés en Europe. Il en allait de même dès le 2<sup>e</sup> siècle en Chine, pour les chiffons destinés à la fabrication du papier.

Plus récemment, un enchaînement de contraintes économiques et une prise de conscience environnementale ont conduit à l'industrialisation du recyclage telle que nous la connaissons aujourd'hui.

Avant les années 1970, le recyclage est resté marginal, car uniquement lié aux pénuries de matières vierges. Au cours des années 80, l'industrialisation du recyclage s'est amorcée pour répondre à la crainte de pénurie des ressources naturelles minérales et à un souhait d'indépendance nationale. Les années

1990 ont marqué le début de l'élan environnemental. Au début des années 2000, le recyclage a atteint sa maturité économique. Il est devenu prépondérant dans la production industrielle du fait des politiques de gestion des déchets, de la demande croissante de matières, des contraintes environnementales et économiques.

Au niveau européen, différents textes et réglementations ont fait du recyclage une priorité en matière de gestion des déchets. La directive-cadre déchets adoptée en juin 2008 a placé le recyclage en deuxième priorité après la prévention et le réemploi et impose des objectifs de recyclage pour les déchets ménagers et assimilés (DEEE) et du "bâtiment-travaux publics" (BTP). La stratégie sur la prévention et le recyclage a créé un cadre politique et donné une impulsion pour une "société européenne du recyclage", tandis que la stratégie sur "l'utilisation durable des ressources naturelles" a désigné le recyclage comme alternative à la raréfaction des ressources naturelles.

Les matières premières secondaires (MPS) représentent, aujourd'hui plus que jamais, un enjeu industriel et stratégique majeur. L'effervescence particulière que connaissent les marchés des métaux de récupération témoigne tout particulièrement de cette réalité. Dans un contexte de raréfaction des ressources liée à la croissance mondiale et à l'explosion du marché chinois, et à moyen terme indien, le recyclage permet en

effet d'économiser des ressources naturelles et de faire face à la demande.

La hausse du coût de l'énergie favorise également la demande de matières premières secondaires, car le recyclage est moins énergivore qu'une production réalisée à partir de ressources primaires. Cette tendance est parallèlement renforcée par la mise en place du système européen d'échange de quotas d'émissions de gaz à effet de serre, le recyclage permet généralement une réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

Dans ce contexte, il est clair que les DEEE sont un enjeu capital non seulement comme source de MPS mais également d'un point de vue écologique.

Les procédés de traitement existants font appel à une première étape de démantèlement manuel. Ce démantèlement est indispensable pour enlever les composants dangereux des DEEE. Lors de ce démantèlement, un tri est également effectué entre les pièces plastiques et les pièces métalliques de grande taille. À ce jour il n'existe pas de procédé entièrement automatisé pour ce type de déchets. Les filières de démantèlement en Europe sont actuellement fortement subventionnées et font intervenir des travailleurs sociaux. Cette situation n'est pas envisageable à long terme. Il est donc important de développer, dès maintenant, des technologies entièrement automatisées de traitement des DEEE en utilisant les techniques séparatives physiques. Le tri manuel serait alors



limité aux composants toxiques. Le problème n'est pas nouveau et beaucoup d'études sur la séparation des DEEE existent déjà. Elles mentionnent des séparations par courants de Foucault, des séparations électrostatiques par effet Corona et des séparations gravimétriques par jiggage. Néanmoins, la plupart des études concernent des déchets autres que les DEEE (par exemple, les véhicules hors d'usages, les matériaux de construction...) ou des fractions de DEEE (comme des circuits imprimés) ou des échantillons reconstitués. Toutes les études mettent en évidence le potentiel des trois techniques mentionnées pour séparer les constituants les uns des autres mais aucune étude n'a mis en évidence l'intérêt de les utiliser sur des DEEE tout-venant.

L'objectif de cette étude est d'identifier les techniques physiques susceptibles d'être appliquées industriellement pour la séparation des composants principaux de lots de DEEE. Afin de travailler dans des conditions équivalentes à celles industrielles, l'étude a été réalisée sur des lots de DEEE tout-venant.

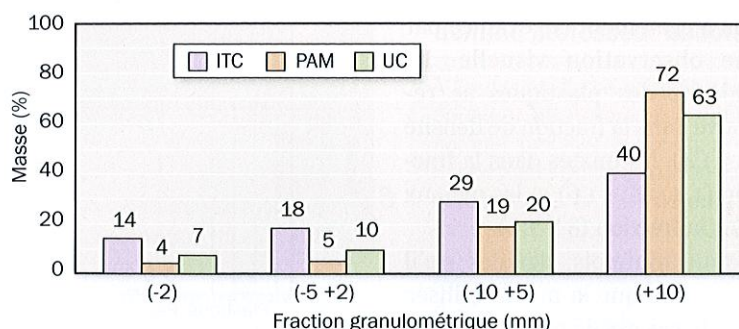
Cette étude a été menée en collaboration entre le Centre Terre et Pierre (CTP) en Belgique et le Bureau de recherche géologique et minière (BRGM).

### Caractérisation des échantillons étudiés

Les lots de DEEE ont été fournis par la société Galloo. Trois lots de départ ont été choisis ; ils sont respectivement constitués des catégories : "information et technologies de communication" (ITC), "petits appareils en mélange" (PAM) et "unité centrale d'ordinateur" (UC). Ceux-ci ont été broyés à 100 mm sur le site de l'industriel à l'aide d'un broyeur à marteaux mobiles (broyeur d'automobiles). Ensuite, ils ont été déferrailés et rebroyés à 30 mm.

Sur la fraction (+2 mm) de ces

Figure 1 - Répartition granulométrique des lots de départ



trois lots, une analyse granulométrique et un tri manuel en sept catégories (plastiques et mousses, papier, bois, métaux, fils électriques, mixtes métalliques et lourds minéraux) ont été réalisés.

L'analyse granulométrique montre que la distribution granulométrique est relativement étroite ; les produits se retrouvent essentiellement entre 5 et 30 mm et les fines (-2 mm) représentent généralement moins de 10 % du produit de départ (figure 1).

Les résultats du tri manuel sont détaillés au tableau I et représentés graphiquement à la figure 2

(page suivante). Les lots fournis ont des compositions très différentes, ils correspondent bien à des lots de DEEE bien distincts. Comme on peut le constater, il n'existe pas de variation de composition significative entre les différents constituants en fonction de la granulométrie.

Une séparation par liqueur dense a également été menée sur le (+2 mm) des trois lots. La liqueur utilisée est du chlorure de zinc pour les densités supérieures à 1,0. Les résultats de ces séparations sont donnés au tableau II (page suivante) et représentés graphiquement à la

Tableau I - Répartition par famille de constituants

Échantillon		Informations et technologies d'information (ITC)							
Fraction (mm)	Masse (%)	Plastique	Papier	Bois	Métaux	Fils	Mixtes*	Minéral	Total
Teneur (%)									
(+10)	39,9	84,8	1,2	0,1	3,4	2,3	8,2	0,0	100,0
(-10 + 5)	28,7	90,2	< 0,1	0,1	3,7	2,1	2,0	1,9	100,0
(-5 + 2)	17,9	66,5	< 0,1	0,8	18,3	3,4	3,3	7,7	100,0
(+2)	86,5	82,8	0,6	0,2	6,6	2,5	5,1	2,2	100,0
(-2)	13,5	-	-	-	-	-	-	-	-

Échantillon		Petits appareils en mélange (PAM)							
Fraction (mm)	Masse (%)	Plastique	Papier	Bois	Métaux	Fils	Mixtes*	Minéral	Total
Teneur (%)									
(+10)	72,2	63,1	0,4	< 0,1	32,8	1,0	2,7	0,0	100,0
(-10 + 5)	18,7	62,9	0,2	0,6	25,6	3,2	5,1	2,4	100,0
(-5 + 2)	4,9	41,8	0,8	0,9	35,7	4,2	4,4	12,2	100,0
(+2)	95,8	61,9	0,4	0,2	31,5	1,6	3,3	1,1	100,0
(-2)	4,2	-	-	-	-	-	-	-	-

Échantillon		Unité centrale d'ordinateur (UC)							
Fraction (mm)	Masse (%)	Plastique	Papier	Bois	Métaux	Fils	Mixtes*	Minéral	Total
Teneur (%)									
(+10)	62,8	30,3	< 0,1	0,0	28,6	10,8	30,3	0,0	100,0
(-10 + 5)	20,4	35,3	< 0,1	< 0,1	21,1	19,0	24,5	0,0	100,0
(-5 + 2)	9,6	41,7	< 0,1	0,1	29,8	13,8	12,9	1,7	100,0
(+2)	92,8	32,5	< 0,1	< 0,1	27,1	12,9	27,2	0,2	100,0
(-2)	7,2	-	-	-	-	-	-	-	-

\* Mixtes : composite "plastique-métal"



figure 3. La qualité de la séparation a également été évaluée par une observation visuelle. La majorité des plastiques se retrouve dans la fraction de densité ( $\delta < 1,4$ ), les mixtes dans la fraction ( $1,4 < \delta < 1,6$ ) et les métaux dans la fraction ( $\delta > 1,6$ ).

Il faut toutefois signaler qu'il s'est avéré que la masse utilisée lors de ces essais n'est pas suffisante pour obtenir un échantillon représentatif ; cependant il existe une bonne corrélation entre les données de ces deux caractérisations.

### Séparation magnétique et par courants de Foucault

Les essais de séparation magnétique et d'extraction des non ferreux ont été réalisés à l'aide d'un séparateur à courants de Foucault de type Andrin SOM 30L (figure 4).

Ceux-ci ont été réalisés sur les ITC (-15 mm), les ITC (+4 mm), les PAM (+4 mm) et les UC (+4 mm). Les conditions opératoires de l'extraction des non ferreux sont : une vitesse de 1 m/s pour la bande d'alimentation et 2 880 tours/min. pour la roue polaire ; le débit d'alimentation était compris, suivant les lots et les passages (2 à 3), entre 230 et 430 kg/h.

Les mêmes tendances sont observées pour les quatre échantillons. À titre d'exemple, les résultats des essais effectués sur les PAM (+4 mm) sont fournis au tableau III. La fraction "inerte" contient encore des non ferreux ; l'observation visuelle montre que ce sont surtout les fils de cuivre qui ne sont pas éliminés. La fraction de non ferreux est quasi pure ; les 6 % de particule de densité ( $\delta < 1,4$ ) s'expliquent par la présence de circuit imprimé qui doivent être considérés comme des mixtes "plastic-métal".

### Séparations en voie sèche

#### Séparation gravimétrique à l'aide d'une table pneumatique

Les séparations pneumatiques ont été réalisées sur deux types

Figure 2 - Répartition par famille de constituants

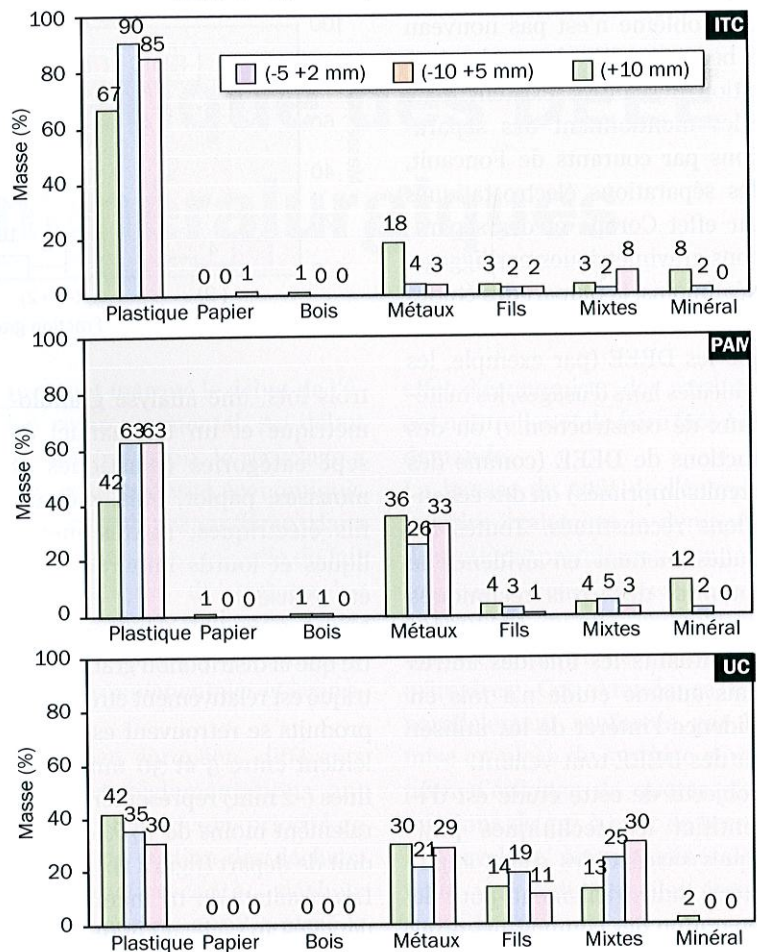


Tableau II - Répartition densimétrique des lots de départ

Fraction densimétrique	( $\delta < 1,0$ )	( $1,0 < \delta < 1,4$ )	( $1,4 < \delta < 1,6$ )	( $\delta > 1,6$ )	Total
Échantillon					
Masse (%)					
ITC	2	80	4	14	100,0
PAM	2	55	3	40	100,0
UC	1	31	6	62	100,0

Figure 3 - Répartition densimétrique des lots étudiés

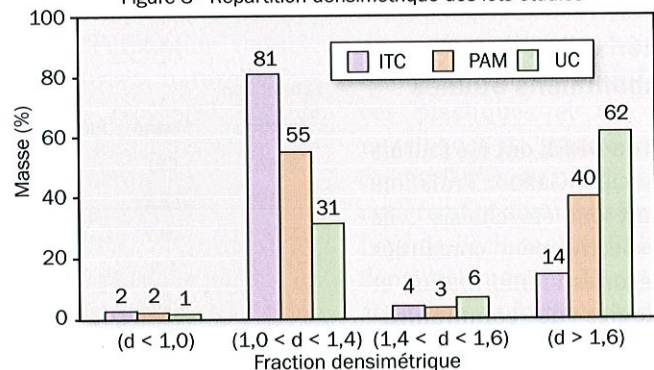


Tableau III - Fractions obtenues par séparation magnétique et courants de Foucault des PAM (+4 mm)

Fraction	Masse (%)	( $\delta < 1,4$ )	( $1,4 < \delta < 1,6$ )	( $\delta > 1,6$ )	Total
Masse (%)					
Ferreux	70,8	10	7	83	100,0
Non ferreux	21,7	6	1	93	100,0
"Inertes"	7,5	87	2	11	100,0
PAM (+4 mm)	100,0	15	5	80	100,0



Christian Lucion

nommé professeur honoraire à Quito (Équateur)

À l'occasion de ce congrès sur le recyclage organisé en Équateur en novembre dernier, Christian Lucion a été nommé professeur honoraire de l'École polytechnique nationale de Quito. C. Lucion est administrateur de la Sim depuis 2006 et il est le président du Groupement des membres belges de la Sim (GMB-Sim). Il est animateur du groupe Recyclage et valorisation et auteur de parties de l'ouvrage sur le Recyclage publié par la Sim.

Diplômé en 1971 ingénieur civil métallurgiste à l'Université catholique de Louvain, il a ensuite travaillé pendant 25 ans au laboratoire de traitement des minerais de cette université, avant de devenir, de 1996 à mai 2010, directeur général opérationnel du CTP (Centre technologique international de la Terre et de la Pierre), qui est spécialisé dans le domaine de la minéralurgie, des matériaux et de l'environnement.

Depuis 1978, C. Lucion avait participé à plusieurs projets de coopération entre la Belgique et l'Équateur, pour former des étudiants équatoriens et doter le pays de chercheurs en métallurgie extractive, en traitement de minerais et d'effluents, et en recyclage de résidus industriels.

C'est le 17 novembre 2010, lors du deuxième congrès international du recyclage des matériaux et de traitement des effluents industriels à Quito, que son titre de "Profesor Honorífico" de l'Escuela Politécnica Nacional (EPN) lui a été remis par ses anciens élèves. En effet, deux des anciens étudiants de C. Lucion ont participé à cette remise de titre : Ernesto de la Torre, doyen de la faculté d'ingénierie chimique et agro-industrielle et chef du Département de métallurgie extractive (Demex) de l'EPN et Alicia Guevara, professeur à l'EPN.

marque Vibration Industrielle et un autre de marque Philibert (figure 6).

La séparation basée sur la différence de forme des constituants qui devait être le principe de



Figure 4 - Séparateur à courants de Foucault de type Andrin SOM 30L

DR

de table à secousse : une de type Raoul Lenoir TD 6/9 (surface de tri de 0,5 x 0,75 m avec une toile ayant des ouvertures de 80 µm) et une autre de type Berry EX20B (surface de tri de 0,2 x 1,3 m).

Les fractions granulométriques (+4 mm) des échantillons de départ ont tout d'abord été testées sur la table pneumatique Lenoir (figure 5) en utilisant les conditions opératoires suivantes : pente longitudinale de 8 cm, pente transversale de 4 cm, amplitude des vibrations 20 à 27 % et un débit de 1,8 à 4,8 kg/h. L'observation visuelle montre un enrichissement en plastiques dans la fraction légère de la table et en métaux dans la fraction lourde mais les résultats se sont avérés non satisfaisants.

Des essais complémentaires ont été menés sur une fraction granulométrique plus étroite (-2 +1 mm) des ICT. La pureté des lourds est nettement meilleure : 94 % de la masse de ceux-ci ont une densité inférieure à 1,6. Les légers ne contiennent que 2,5 % de particules de densité supérieure à 1,6 mais

contiennent de nombreux mixtes (37 % de particules de densité comprise entre 1,4 et 1,6).

Des essais supplémentaires ont été réalisés à l'aide de la table Berry sur des fractions plus grossières des ICT [(-4 + 2 mm) et (-6 + 4 mm)] et des PAM (-8 + 6 mm). Les fractions légères obtenues sont relativement propres (84 à 92 % de particules de densité inférieure à 1,4) tandis que la qualité des lourds se dégradent avec l'augmentation de la granulométrie (respectivement 93, 64 et 56 % de particules de densité supérieure à 1,6). Lors de tous ces essais, les séparations ont été gênées par la présence de fils électriques qui enchevêtraient la matière.

#### Séparation sur base de la forme des particules à l'aide d'un élévateur vibrant hélicoïdal

Les essais ont été réalisés sur deux spirales de relevage utilisées habituellement pour alimenter des matières morcelées : un élévateur vibrant hélicoïdal de

DR



Figure 5 - Table pneumatique de laboratoire de type Raoul Lenoir TD 6/9



Figure 6 - Élévateur vibrant hélicoïdal

DR



base de ces essais n'est pas efficace sur ces produits. Aucune tendance de ségrégation n'est observée entre les plastiques et les métaux. Les fibres des ITC et les amas de fils gainés pour les UC avancent plus vite que les autres constituants. Dans leur montée, ils poussent mécaniquement tous les éléments se trouvant devant eux ce qui empêche leur séparation.

## Séparations en voie humide

### Séparation gravimétrique par jiggage

Les essais d'orientation de séparation par jiggage ont été réalisés au moyen d'un bac à piston discontinu de type Krupp (figure 7).

Les conditions opératoires sont les suivantes : 32 mm d'amplitude de pulsation et 144 pulsations par minute. Quelques kilos de (+2 mm) des lots de départ ont été testés. Après l'essai, le lit est découpé, en fonction de la hauteur et de l'observation visuelle, en trois tranches (légers, mixtes et lourds) qui, comme précédemment, sont ensuite soumises à des séparations par liqueur dense afin de déterminer la qualité de la sépa-



Figure 7 - Bac à piston discontinu de type Krupp

ration par jiggage. Les résultats de l'essai effectué sur les PAM (+2 mm) sont présentés au tableau IV.

La fraction "légère" est quasi exempte de métaux (100 % de particules de densité inférieure à 1,4). La fraction "lourde" contient beaucoup de métaux sous forme de gros bloc (75 % de particules de densité supérieure à 1,4) et de composites "plastique-métal" (25 %).

Les mêmes observations ont été faites sur les autres échantillons. Malgré ces résultats prometteurs, la séparation par jiggage semble être compromise à cause de l'encrassement de la grille pas les fils de cuivre. Pour pallier ce problème, celle-ci a été protégée en ajoutant un lit de billes d'acier ayant pour but de servir de barrière physique entre la grille et les fils de cuivre. Les résultats d'un essai réalisé dans ces conditions montrent

que les fils de cuivre n'atteignent plus la grille mais, par contre, le lit de grenailles se charge rapidement en fils (6 % de la masse de l'alimentation) ce qui devra nécessiter, lors d'un fonctionnement industriel, un nettoyage périodique du lit.

### Séparation sur base de la forme des particules à l'aide d'un Lavodune

Un appareil semi industriel de type séparateur hydrodynamique à effet dune a été utilisé pour ces essais ; le principe général de fonctionnement est présenté à la figure 8.

Les essais ont été réalisés sur des ICT (-5 +2 mm). L'observation visuelle et les résultats des séparations par liqueurs denses des produits obtenus par la séparation au Lavodune montrent qu'il existe bien une ségrégation entre les lourds et les légers, les lourds étant majoritairement constitués de métaux et les légers de plastiques. Néanmoins, les lourds contiennent entre 14 et 28 % de produits de densité inférieure à 1,4. La présence de fils semble rédhibitoire à l'utilisation de cette technique séparative. En effet, ils bloquent la zone de séparation et entremêlent les autres constituants.

### Schéma de traitement retenu

Sur la base des essais précédents, le schéma de traitement repris à la figure 9 a été retenu. Les techniques considérées comme prometteuses ont été conservées : séparations magnétiques (overband et poulie magnétique) et par courants de Foucault, flottaison dans l'eau ( $\delta = 1$ ) et séparations gravimétrique par jiggage [jig de type Schabaver à lit traversant de taille pilote (surface de tri de 720 cm<sup>2</sup>) dont une huche a été modifiée pour répondre au besoin d'évacuer en continu les lourds et les légers]. Il faut néanmoins noter que l'applica-

Tableau IV - Fractions obtenues par jiggage des PAM (+4 mm)

Fraction	Masse (%)	( $\delta < 1,0$ )	( $1,0 < \delta < 1,4$ )	( $1,4 < \delta < 1,6$ )	( $\delta > 1,6$ )	Total
		Masse (%)				
"Légers"	26	3	97	0	0	100,0
"Mixtes"	27	0	76	0	24	100,0
"Lourds"	47	0	25	9	66	100,0
PAM (+4 mm)	100	1	57	4	38	100,0

Tableau V - Résultats du schéma global de traitement des PAM

Fraction	Masse (%)	( $\delta < 1,0$ )	( $1,0 < \delta < 1,4$ )	( $1,4 < \delta < 1,6$ )	( $\delta > 1,6$ )	(-1 mm)	Total
		Masse (%)					
Ferreux I	1,3	0,1	8,0	3,6	86,8	1,5	100,0
Ferreux II	6,5	2,4	8,6	4,1	75,8	9,1	100,0
Non ferreux	23,9	1,8	6,1	1,6	89,6	0,9	100,0
Fils	8,4	8,1	33,4	4,3	53,9	0,3	100,0
(-2 mm)	3,5	2,4	6,9	3,5	58,4	28,8	100,0
$\delta < 1,0$	10,3	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0
Légers	36,9	2,6	92,2	2,5	2,7	0,0	100,0
Lourds	9,2	0,0	52,5	18,3	29,2	0,0	100,0
PAM	100,0	12,6	44,0	3,8	37,7	1,9	100,0



tion de ce schéma reste conditionnée à la possibilité de trouver une technique industrielle permettant de séparer en continu les fils de cuivre.

Les résultats de la validation de ce schéma de traitement effectué sur les PAM sont donnés au Tableau V.

Les ferreux représentent 7,8 % de la masse de départ et contiennent plus de 76 % de particules de densité supérieure à 1,6.

Les non ferreux (23,9 % en masse) sont également d'une

pureté élevée (90 % de particules de densité supérieure à 1,6). Les légers obtenus par jiggage représentent la fraction la plus importante en masse ; ils contiennent 94,8 % de particules de densité inférieure à 1,4. L'observation visuelle met en évidence que cette fraction est principalement composée de plastiques avec quelques impuretés sous la forme de morceaux de circuit imprimé.

La dernière fraction obtenue correspond aux lourds du jiggage (9,2 % en masse) ; elle est constituée de plastiques et de métaux et doit être considérée comme un mixte. En effet, les essais de contrôle au bac à piston ont montré qu'il y avait moyen d'obtenir de meilleurs résultats, les conditions opératoires utilisées au jiggage en continu n'étant probablement pas optimisées (temps de séjour trop court).

À titre de comparaison, le tableau VI reprend les masses des principaux flux obtenus sur les PAM et les ITC. Ces résultats mettent en évidence les différences très significatives obtenues à partir de DEEE différents.

### Traitement industriel continu envisageable

Le schéma de traitement retenu montre qu'il est possible de séparer les principaux constituants des DEEE. Un traitement industriel en continu est envisageable dans la mesure du moins où une technique industrielle d'élimination des fils de cuivre et d'aluminium qui posent problème pour toutes les séparations, sera trouvée.

### Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) pour leur participation financière à ce projet de recherche et la société Galloo pour la fourniture des échantillons de départ.

### Bibliographie

- Ademe - Le recyclage en France, réf. 6455, 2008, 16 pages.  
S. Touzé, M. Save, N. Menad, Chr. Lucion et P. Hubaux, Development of an automatic WEEE treatment using physical separation techniques to limit manual sorting, REWAS 2008, TMS 2008, pp 623-629.

Les différents produits obtenus devraient pouvoir être valorisés à l'exception de la fraction granulométrique (-2 mm). Du côté des métaux, les ferreux iraient en sidérurgie et les non ferreux et les fils dans l'industrie correspondante. La fraction flottante dans l'eau et les légers du jiggage, constitués principalement de plastiques, pourraient être recyclés dans cette branche d'activité. Néanmoins, ces derniers contiennent des impuretés telles que des fils ainsi que des morceaux de circuits imprimés et de bois ; une séparation par reconnaissance optique devrait pouvoir améliorer la qualité de ce produit. Quant aux lourds de jiggage, composés principalement de mixtes plastiques-métaux et en quantité moindre, de verres et de particules minérales, ils pourraient être traités par pyrometallurgie dans une installation de recyclage de métaux non ferreux.

**Christian Lucion<sup>1</sup>,  
Paul Hubaux<sup>1</sup>, Solène  
Touzé<sup>2</sup> et Maurice Save<sup>2</sup>**

1 - Centre Terre et Pierre (CTP, Belgique)

2 - Bureau de recherche géologique et minière (BRGM)

Figure 8 - Principe de fonctionnement d'un séparateur de type Lavodune

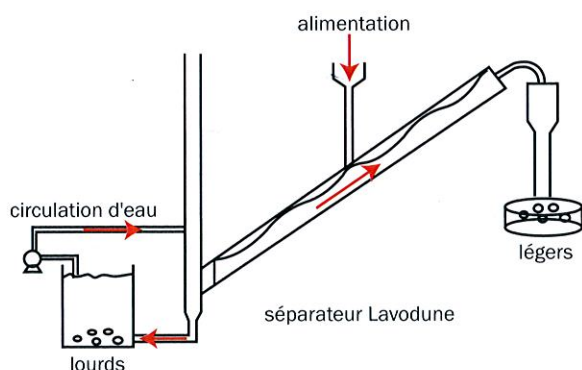


Figure 9 - Schéma global de traitement des DEEE

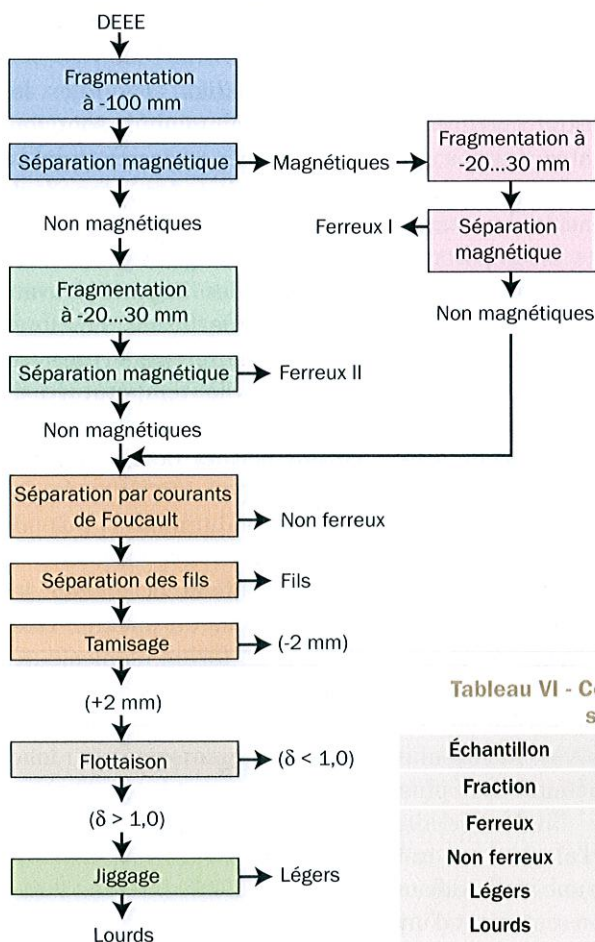


Tableau VI - Comparaison des résultats obtenus sur les PAM et les ITC

Échantillon	PAM	ITC
Fraction	Masse (%)	
Ferreux	7,8	6,7
Non ferreux	23,9	6,8
Légers	36,9	49,9
Lourds	9,2	21,4