

# Méthodes de tri des matières plastiques

## *Etat de l'art*



C4H5O2\_5 2/ 9/99 THERMC 4H 50 2 0G 300.000 5000.000/ 1392.000 1  
1.64121890E+01 1.20184883E-02-4.40468566E-06 7.30124728E-10-4.42784365E-14 2



ETUDE N° 96-0901/1A

**ÉTAT DE L'ART CONCERNANT LES METHODES  
DE TRI DES MATIERES PLASTIQUES**

**RAPPORT FINAL**

**mars 1998**

**J.-J. ROBIN - CEREMAP**

Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégialement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

**Avertissement :**

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :

**RECORD**, Etat de l'art concernant les méthodes de tri des matières plastiques, 1998, 223 p, n°96-0901/1A.

- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)  
[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

© RECORD, 1998

# Sommaire

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
---------------------	----------

<b>GENERALITES SUR LES TECHNIQUES DE SEPARATION DES MATIERES PLASTIQUES</b>
---

1 - Tri manuel	4
2 - Fragmentation	6
3 - Criblage	8
4 - Classifications hydraulique / pneumatique	10
5 - Séparation par fluide supercritique	15
6 - Tri balistique	17
7 - Flottation - moussage	18
8 - Tri magnétique	21
9 - Tri électrostatique	22
10 - Dissolution sélective	25
11 - Tri par détection	27
12 - Tri par différence de comportement à la chaleur	35
<i>Cas particuliers : l'extrusion-filtration</i>	37

<b>APPLICATIONS</b>
---------------------

<b>A - DECHETS MENAGERS / CORPS CREUX</b>	<b>40</b>
A.1 Séparation par détection	41
A.2 Séparation électrostatique	51
A.3 Autres procédés	53
<b>B - FILMS PHOTOGRAPHIQUES / RADIOGRAPHIQUES</b>	<b>55</b>
B.1 Traitement par voie chimique	55
B.2 Procédés par voie enzymatique	57
B.3 Procédés mécaniques	58

<b><i>C - AUTOMOBILES</i></b>	<b>59</b>
<b>C.1 - Pièces démontées</b>	<b>59</b>
1.1 Séparation par procédés mécaniques, voie sèche ou mixte	59
1.2 Séparation par procédés mécaniques, voie humide	65
1.3 Comparaison générale des techniques en voie sèche / voie humide	67
1.4 Procédés incluant des technologies de détection	68
<b>C.2 - Résidus de broyage</b>	<b>71</b>
<b><i>D - PRODUITS ELECTRIQUES ET ELECTRONIQUES</i></b>	<b>74</b>
<b>D.1 - Déchets de câbles</b>	<b>74</b>
1.1 Séparation par procédés à sec	74
1.2 Séparation par procédés en voie humide	75
1.3 Séparation par procédés mixtes	76
<b>D.2 - Déchets types cartes électroniques / circuits imprimés</b>	<b>77</b>
<b>D.3 - Traitement des produits blancs et bruns</b>	<b>79</b>
3.1 Séparation par procédés mixtes	79
3.2 Séparation par détection manuelle ou automatique	81
<b>D.4 - Traitement de déchets divers</b>	<b>84</b>
4.1 Séparation par procédés à sec	84
4.2 Séparation par procédés en voie humide	84
<b><i>E - TEXTILES : Moquettes</i></b>	<b>85</b>
D1 - Procédés de séparation en voie sèche	85
D2 - Procédés de séparation en voie humide	87
D3 - Procédés de séparation par détection	89
<b><i>F - BATIMENT - TRAVAUX PUBLICS</i></b>	<b>91</b>
<b>Conclusions</b>	<b>93</b>

<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>94</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>108</b>
• Compte-rendu de visite	108
* <i>Brüker Spectrospin</i>	108
* <i>Herbold</i>	113
* <i>KHD Humbold</i>	117
* <i>Pallmann</i>	119
* <i>Result SA</i>	123
* <i>TU Delft</i>	125
* <i>Veka</i>	131
• Tableaux d'adresse	133
• Glossaire	137
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>139</b>

## **GENERALITES SUR LES TECHNIQUES DE SEPARATION DES MATIERES PLASTIQUES**

Le secteur de la séparation des déchets de matières plastiques connaît un essor important depuis une vingtaine d'années. Cette évolution est directement liée, d'une part, à la prise de conscience de préoccupations environnementales graves (dues aux développements industriels anarchiques et risqués qui s'étaient opérés), et d'autre part, à l'ampleur grandissante des déchets divers qui ne trouvaient pas d'autres issues que la mise en décharge .

Annuellement, ce sont plus de 4 millions de tonnes de matières plastiques qui sont consommées en France. De par la grande diversité de propriétés de ces produits, nous sommes en contact journalier avec ces résines que l'on retrouve dans de nombreux secteurs d'activités : emballages (industriels et ménagers), transports, bâtiments, travaux publics, agriculture, produits électriques - électroniques, bureautique, biens d'équipements ménagers, ...

La multitude de niches d'applications que trouvent les matières plastiques conduit à la génération de déchets très variés, qu'ils soient issus d'unité de fabrication ou collectés après usage (post-consommation).

Outre le fait qu'il existe un nombre conséquent de résines, les déchets de matières plastiques se retrouvent sous des formes variées, dans des états de souillures propres à leur utilisation et/ou à leur stockage, en quantité inégales, sous forme de gisements monomatière ou en mélange. Autant de complexités à résoudre dans le cadre de la problématique de la séparation des matières plastiques entre elles, ce qui a conduit au développement de procédés de tri s'appuyant sur les nombreuses caractéristiques de ces matières.

Nombre de techniques qui seront décrites dans ce document trouvent leurs origines dans les secteurs de la minéralurgie et de la métallurgie, par la transposition d'un certain nombre de phénomènes, de lois physiques et/ou chimiques, au traitement des matières plastiques <sup>(1,2)</sup> .

Dans le vaste champ d'action que l'on retrouve autour du thème de la séparation des déchets de matières plastiques, sont présents des procédés très rudimentaires comme le tri manuel, mais aussi des procédés très sophistiqués comme le tri par détection.

Quoi qu'il en soit, ces techniques de séparation peuvent nécessiter assez souvent une étape de réduction générale de la taille des déchets au moyen de concasseurs, de déchiqueteurs, de broyeurs. Dans la plupart des cas, la séparation des déchets de plastiques entre eux ou des autres déchets présents est une opération délicate qui peut justifier une systématisation et une mécanisation poussées.

Lorsque l'on parle de techniques de séparation de matières plastiques, il convient de les diviser en sous-familles en fonction des propriétés physiques des matériaux directement mises en jeu, telles que la densité, la résistance au choc, la mouillabilité, etc...  
. On peut distinguer ainsi :

- 1) le tri manuel, souvent effectué à la SOURCE, et basé sur un choix de matériaux à conserver ou à éliminer d'un lot en fonction de critères définis au préalable
- 2) la fragmentation, mettant en jeu le comportement des matériaux lors des différentes étapes de réduction de taille envisageable
- 3) le criblage, qui est une opération de classement dimensionnel, intervenant souvent en aval d'opération de fragmentation
- 4) les classifications hydraulique et pneumatique (incluant les procédés de concentration gravimétrique), basées sur les phénomènes régis par les lois du mouvement des solides dans les fluides, le fluide étant respectivement un liquide ou un gaz
- 5) la séparation par fluide supercritique, dérivée des procédés de concentration gravimétrique, mettant en oeuvre des fluides dans des conditions de température et de pression supercritiques
- 6) le tri balistique, basé sur le mouvement des projectiles dans l'air
- 7) la flottation-moussage, mettant en jeu un fluide et un ou plusieurs additifs ayant pour rôle de modifier le comportement de surface des solides vis à vis du fluide
- 8) le tri magnétique, faisant intervenir les capacités d'aimantation des particules (cette technique concerne la séparation plastiques / métaux ; elle est très souvent appliquée en amont des lignes de régénération des matières plastiques)
- 9) le tri électrostatique, basé sur les phénomènes de répulsion / attraction de particules chargées entre elles
- 10) la dissolution sélective, régie par la dissolution des polymères dans des solvants spécifiques
- 11) le tri par détection, mettant à profit les propriétés optiques ou thermiques des polymères (nature des polymères, couleur, réflexion / transmission de la lumière, opacité, fluorescence, dégradation, ...)
- 12) le tri par voie thermique, basé sur les différences de comportement à la chaleur des polymères

Chacune de ces techniques peut être utilisée séparément , mais dans la plupart des applications industrielles, des combinaisons de plusieurs de ces techniques ont souvent été développées afin d'atteindre et d'optimiser la séparation des matières plastiques recherchée.

De plus, les matières plastiques sont souvent souillées de résidus autres que plastiques (métaux ferreux / non-ferreux, verre, papier, terre, résidus organiques, ...) qui ont un impact direct sur les techniques de séparation qui peuvent alors être fortement perturbées. Les techniques de séparation développées doivent donc tenir compte de la présence de certaines souillures et permettre leur élimination.

Le tableau de la figure n° 1 rassemble l'ensemble des techniques de séparation qui sont abordées dans cet ouvrage.

<b>TYPE DE SEPARATION</b>			
<i>En fonction de la forme des particules</i>		<i>En fonction du type de résine</i>	
Sans fluide (géométrie pure)	Avec fluide (liquide / gaz)	Voie sèche	Voie humide
<b>PROCEDES DE SEPARATION</b>			
Criblage Tamisage	Classifications hydraulique et pneumatique	Tri manuel Séparation électrostatique Séparation magnétique Tri balistique Détection et tri Séparation thermique	Concentration gravimétrique Flottaison Flottation-moussage Dissolution sélective Séparation par fluide supercritique

**Figure n° 1 : Techniques de séparation des matières plastiques**

**1 - Tri manuel <sup>(1-4)</sup>**

<i>Matières entrantes</i>	<i>Caractéristique du procédé</i>	<i>Matières sortantes</i>	<i>Stade d'avancement</i>	<i>Gamme de débits</i>	<i>Prix</i>	<i>Réf. adresse</i>
pièces entières	tri positif (matières valorisables) ou négatif (matières indésirables)	pièces entières, pureté de 95 à 99%	Industriel	Tri positif : *OM: 80-120 Kg/h *DIB: 1,5 T/h *VHU:1-2 Kg/mn	achat d'outils simples + main-d'oeuvre non qualifiée	Concepteur de machine /outil de tri

Propriétés utilisées : aspect visuel (forme, couleur, taille, marque...)

Ce tri intervient en amont d'un grand nombre d'opérations de traitement des déchets plastiques, à partir de déchets « entiers » (bouteilles, pièces automobiles, carcasses d'appareils, etc...). On le trouve sous différentes formes, notamment :

- les collectes sélectives (corps creux ménagers, bidons d'huiles, ...)
- les centres de tri (déchets ménagers et DIB)
- les unités de démontage, de démantèlement (véhicules hors d'usage, produits électriques-électroniques)

Ces opérations rudimentaires, qui peuvent quelquefois être en partie automatisées (ex. : unités équipées de déferrailleurs, de modules de séparation de matières) semblent aujourd'hui encore nécessaires dans les filières de valorisation des déchets de matières plastiques.

Bien évidemment, cette étape ne peut être réalisée que sur des critères simples de séparation, où un ou plusieurs objets précis sont identifiés et retirés d'un flux de déchets entrant.

Dans le cas particulier des unités de démontage de véhicules ou de produits électriques / électroniques en fin de vie, l'utilisation d'appareils de détection élaborés peut intervenir pour assurer une meilleure identification (et donc une meilleure séparation) des pièces démontées.

Pour les déchets d'ordures ménagères, la tendance consiste à compléter ce tri manuel par un système automatisé, ou l'inverse.

A titre d'exemple, les cadences appliquées dans les centres de tri de déchets ménagers sont de l'ordre de 80 à 120 Kg/h par opérateur, en tri positif (majoritaire dans ce cas). Cela demeure fortement dépendant des types de matières plastiques à récupérer (films, corps creux, etc ...) et de l'état général des déchets.

Fig 8 - DISMANTLING OF THE MAIN PLASTIC CAR PARTS  
 (Dismantling rate depending on model and methodology)

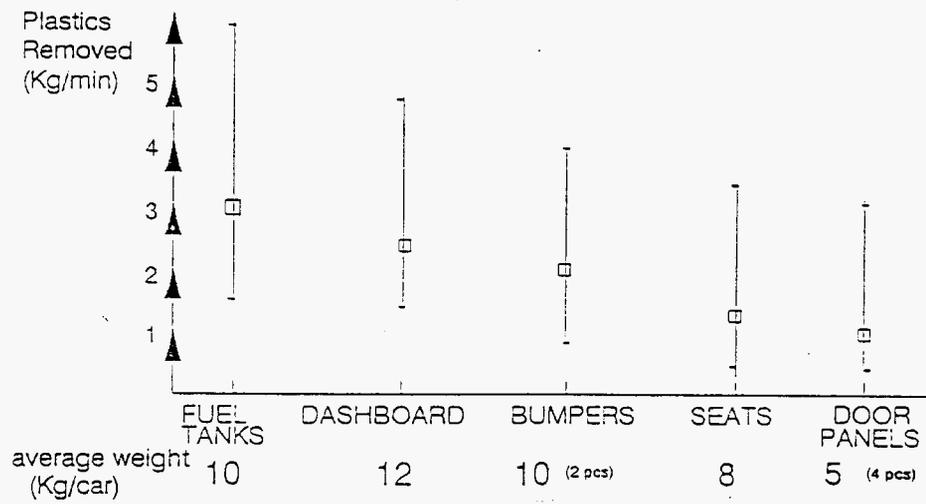


Figure N° 2 : Démontage de pièces plastiques issues de VHU

En centre de tri DIB (emballages plastiques/cartons/bois), les cadences de tri positif peuvent atteindre 1,5 T/h par opérateur, les déchets étant de taille nettement supérieure.

Enfin, en ce qui concerne le démontage des pièces automobiles, les temps et coûts de démontage sont difficilement chiffrables et sont une source de désaccord entre les différents constructeurs automobiles mondiaux qui ne prennent pas le même référentiel de base pour établir leurs estimations.

Le constructeur allemand BMW <sup>(3)</sup> annonce une cadence moyenne de démontage de 20 minutes par voiture, pour une quantité de matières plastiques extraites (toutes confondues) de 25 Kg / voiture (soit environ 1,25 Kg/min.).

Les constructeurs Fiat et Peugeot <sup>(4)</sup> ont estimé cette cadence à 2 Kg/min. pour le démontage du pare-chocs, du tableau de bord, du réservoir, des sièges et des panneaux de portes d'un véhicule. Mais ce chiffre varie énormément en fonction des modèles et des procédés d'assemblage utilisés. Le graphique de la figure n° 2 illustre les variations des temps de démontage des VHU, ces temps ayant été établis lors d'une opération pilote intégrant dans un programme de recherche européen (« RECAP »).

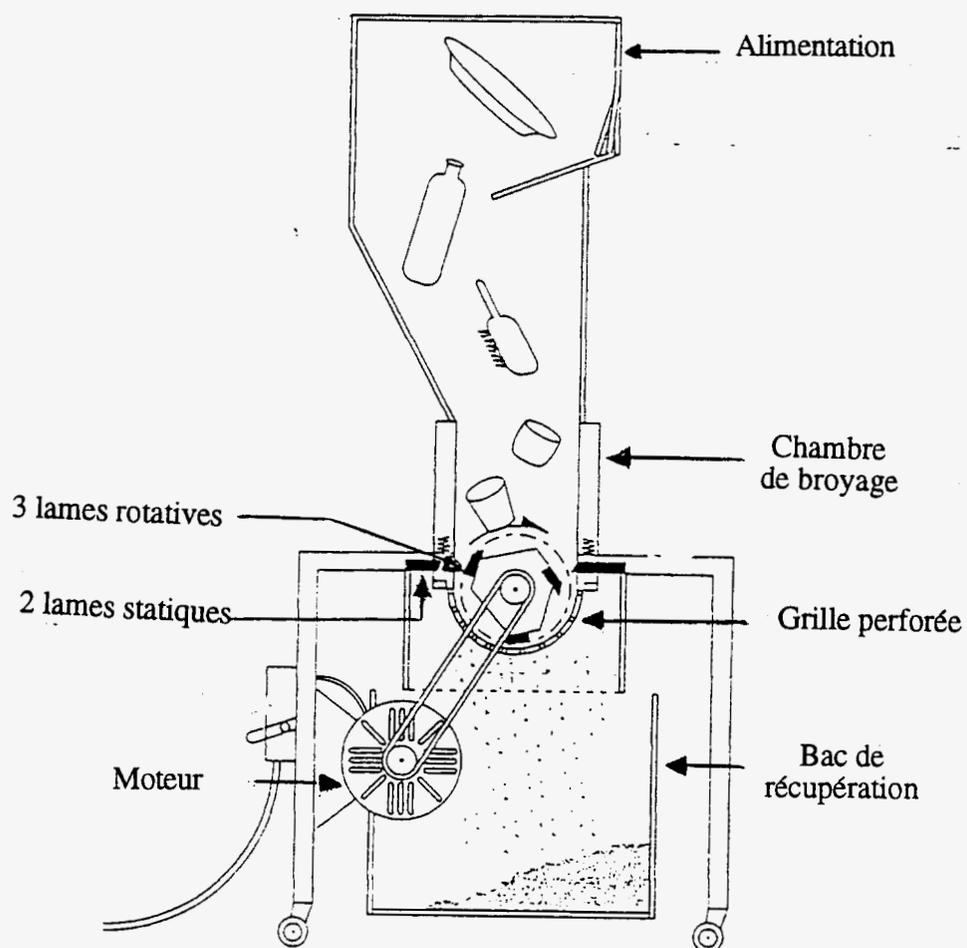


Figure n° 3 : Broyeur à couteaux

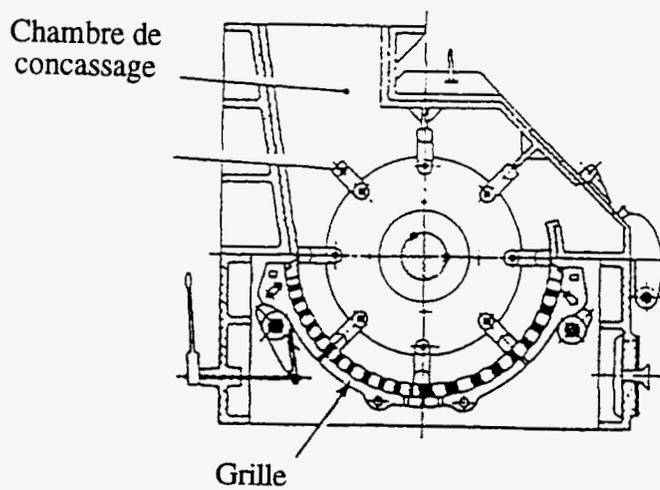


Figure n° 4 : Concasseur à impact

**2 - Fragmentation <sup>(1,2)</sup>**

<i>Matières entrantes</i>	<i>Caractéristique du procédé</i>	<i>Matières sortantes</i>	<i>Stade d'avancement</i>	<i>Gamme de débits</i>	<i>Prix</i>	<i>Réf. adresse</i>
- pièces entières	* voie sèche	broyats ( $\phi$ variable)	Industriel	De quelques Kg à 10 T / h	-investissement: 80 à 500 KF (broyeur seul)	15, 25, 26, 44, 62, 64,
- fraction pré-broyée	* voie humide	dépoussiérés ou lavés			→ coût de l'ordre de 0,50 FF / Kg (hors énergie)	73, 74, 77, 88

Propriétés utilisées : comportement au broyage (mettant en jeu l'élasticité, la tenue au choc des matériaux)

Définition : La fragmentation mécanique se définit comme l'ensemble des opérations ayant pour but de réaliser, grâce à l'application de contraintes mécaniques externes créées par des forces de contact :

- soit la division d'une masse solide en fragments de dimension maximum déterminée
- soit la réduction d'une dispersion solide existante jusqu'à des éléments de plus petits volumes unitaires

La mise en oeuvre de ces forces externes peut se rattacher à des actions de compression, de cisaillement, d'impact, de torsion, de flexion et d'attrition.

Pour cela, la fragmentation met en oeuvre trois grandes classes d'appareils en fonction de la nature des matières à traiter :

- machines par compression : réduction des matériaux durs, compacts et nettement abrasifs (ex : concasseurs)
- machines par percussion : réduction de matériaux durs ou demi-durs, compacts ou friables, mais peu abrasifs (ex : broyeurs à percussion, concasseurs, trommels concasseurs)
- machines par tranchage : éclatement ou déchiquetage dans le cas de matériaux tenaces, plastiques, fibreux (ex : déchiqueteurs, broyeurs à couteaux)

Dans le cas des matières plastiques, les machines par tranchage sont le plus souvent utilisées.

Les termes de "concassage" et de "broyage" sont couramment utilisés pour désigner l'ensemble des techniques de fragmentation, le concassage représentant, dans la plupart des cas, la première étape de la fragmentation du produit brut.

Des exemples de broyeurs / concasseurs sont donnés sur les figures n° 3 à n° 7.

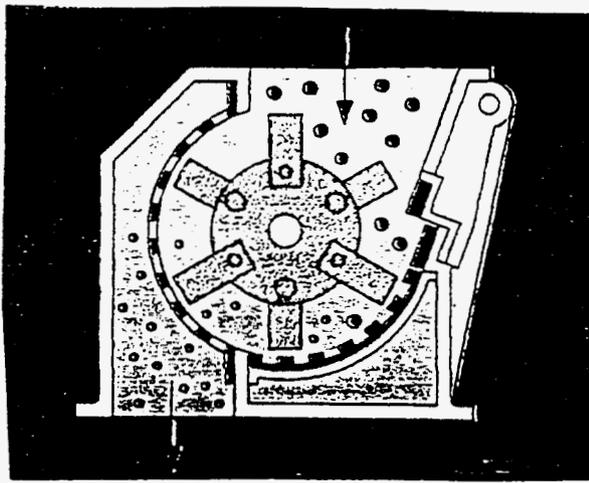


Figure n° 5 : Concasseur à marteaux

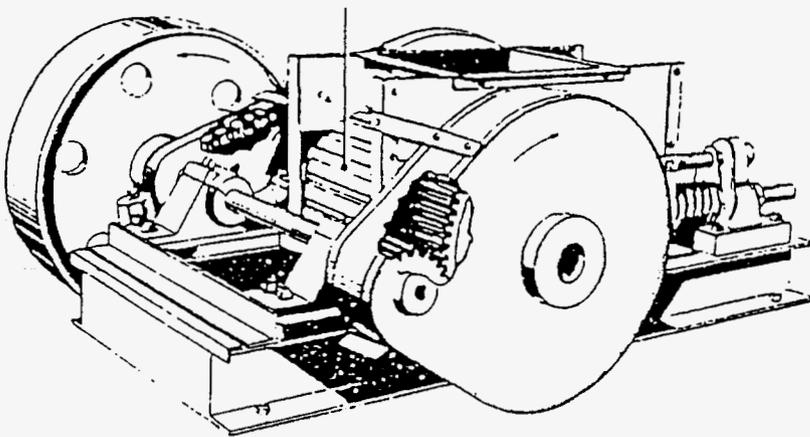


Figure n° 6 (a) : Concasseur à cylindre

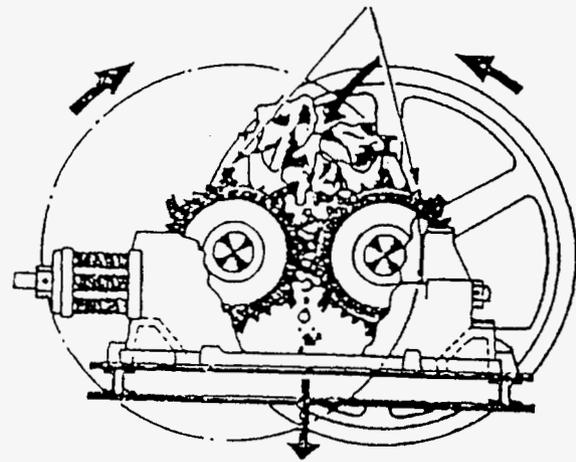
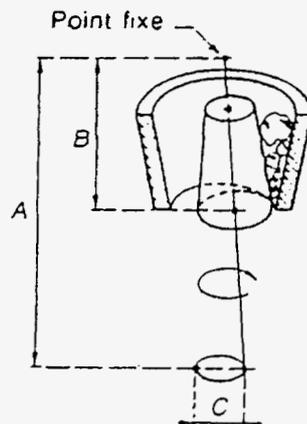


Figure n° 6 (b) : Concasseur à cylindre d.



$A/B$  bras de levier (rapport de démultiplication de l'effort)  
 $C$  trajectoire décrite par l'axe

Figure n° 7 : Concasseur giratoire (ou à cône)

On distingue trois types de broyage :

- le broyage à sec : moins de 2 % d'eau dans le produit
- le broyage semi-humide : de 2 à 25 % d'eau dans le produit (eau contenue dans le gisement ou ajoutée)
- le broyage en voie humide : de 25 à 300 % d'eau dans le produit (eau ajoutée)

Remarque : \* 25 % d'eau =  $\frac{3}{4}$  de matières +  $\frac{1}{4}$  d'eau, en poids  
\* 300 % d'eau =  $\frac{1}{4}$  de matières +  $\frac{3}{4}$  d'eau, en poids

Les opérations de fragmentation nécessitent souvent des stades successifs pouvant impliquer différents types d'appareils en série (rapport de réduction allant de 4/1 en fragmentation grossière à 100/1 en pulvérisation).

Dans le cadre du traitement des matières plastiques, les opérations de fragmentation ont pour objectif :

- 1) soit d'obtenir une réduction de la dimension des corps solides en vue de faciliter leur conditionnement (**broyage simple**),
- 2) soit, par cette réduction, de faciliter des opérations purement physiques, telles que triages, mélanges, dosages. C'est le cas du **broyage différentiel** (ou sélectif) dans lequel la réduction des matières friables est poussée plus loin que celle des constituants plus durs,
- 3) soit de permettre ou de faciliter des réactions physico-chimiques ou chimiques, dont la rapidité et l'efficacité sont normalement fonction de l'importance des surfaces exposées, c'est à dire du degré de division des matières solides,
- 4) soit de permettre la séparation préalable de matières plastiques adhérentes.

Les matières plastiques étant considérées comme des produits plus ou moins élastiques et mous, il peut être quelquefois nécessaire, en plus du broyage, de fragiliser thermiquement le matériau. Cette fragilisation thermique peut se faire :

- soit par choc(s) thermique(s) : montée en température et refroidissement brutal, par exemple par trempage
- soit par traitement à très basse température (**broyage cryogénique**, température allant jusqu'à -196° C, en travaillant dans l'azote liquide)

Bien évidemment, le surcoût amené par ces étapes de fragilisation influence souvent négativement la rentabilité du broyage.

Placée dans le contexte de la séparation des matières plastiques, la fragmentation ne constitue pas une fin en elle-même, le procédé de traitement devant souvent comporter plusieurs étapes de réduction, séparées ou non par des étapes de classement dimensionnel, qui sont soit le criblage, soit la sédimentation en phase liquide ou gazeuse.

**3 - Criblage <sup>(1,2)</sup>**

<i>Matières entrantes</i>	<i>Caractéristique du procédé</i>	<i>Matières sortantes</i>	<i>Stade d'avancement</i>	<i>Gamme de débits</i>	<i>Prix</i>	<i>Réf. adresse</i>
déchets broyés (< 100 mm)	- efficacité : de 90 à 95%	- pureté : < 99 %	Industriel	De quelques Kg à quelques T / h		24, 64, 71, 81, 90, 102

Propriétés utilisées : forme, dimension (liées aux propriétés mises en oeuvre lors de la fragmentation)

Définition : Le criblage est une opération de classement dimensionnel de grains de matière de formes et de dimensions variées, par présentation de ces grains sur des surfaces perforées qui laissent passer les grains de tailles inférieures à la maille et retiennent ceux de tailles supérieures.

Les opérations de criblage ont différents buts :

- séparer les plus gros fragments, pour éliminer ou pour réduire à nouveau leur dimension (étêtage ou scalpage)
- séparer les plus petits fragments, pour les éliminer (dépoussiérage) ou pour les agglomérer
- classer les produits fragmentés en dimensions adaptées à leur commercialisation (calibrage)
- classer les fragments selon des granulométries homogènes, facilitant les opérations de traitements physiques ou chimiques ultérieurs.

**N.B.** : Les rendements de séparation dépassent rarement 90 - 95 % en criblage mécanique, une fraction de "fines" restant toujours mélangée aux "gros" et vice et versa.

Pour distinguer les multiples actions de classement dimensionnel, on trouve les opérations les plus couramment utilisées ci-après :

- \* calibrage : opération de classement portant sur les broyats de dimensions supérieures à 100 mm
- \* criblage : opération de classement portant sur les dimensions de séparation comprises entre 1 et 100 mm (utilisation de cribles rotatifs, de cribles vibrants, de cribles plans à secousses)
- \* tamisage : opération de classement portant sur les dimensions inférieures à 1 mm (utilisation de toiles fines)
- \* égouttage / essorage : élimination par voie d'écoulement (naturel / activé) d'un excédent de liquides, dans le cas de traitement en voie humide

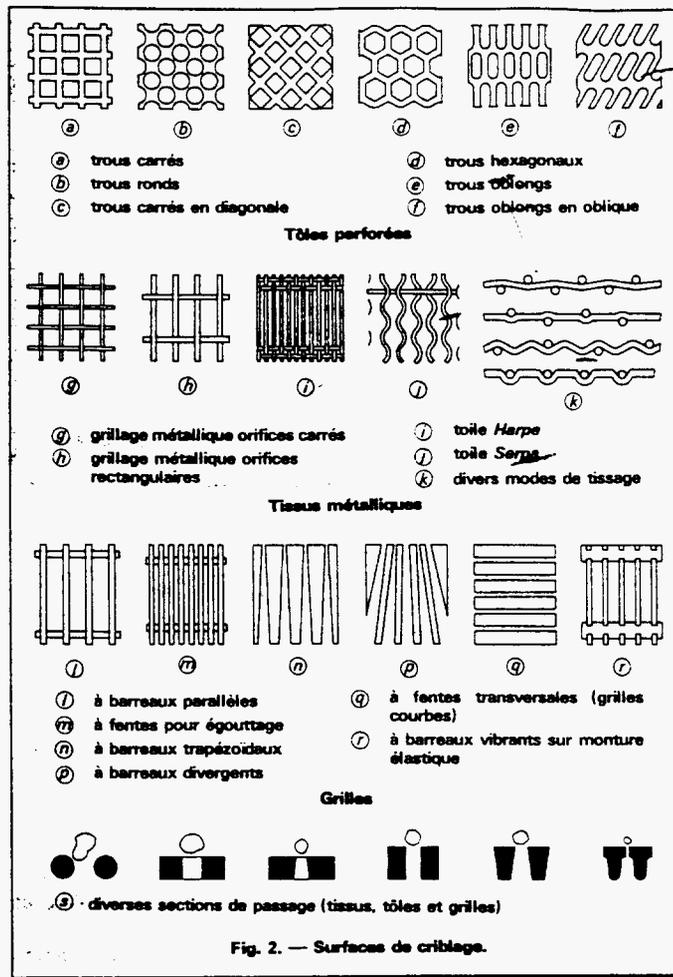
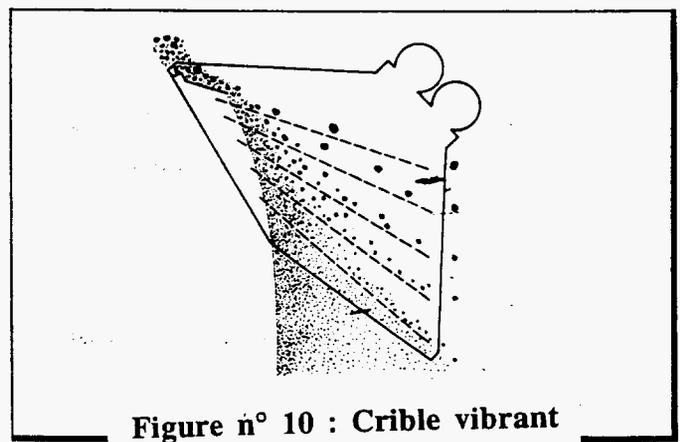
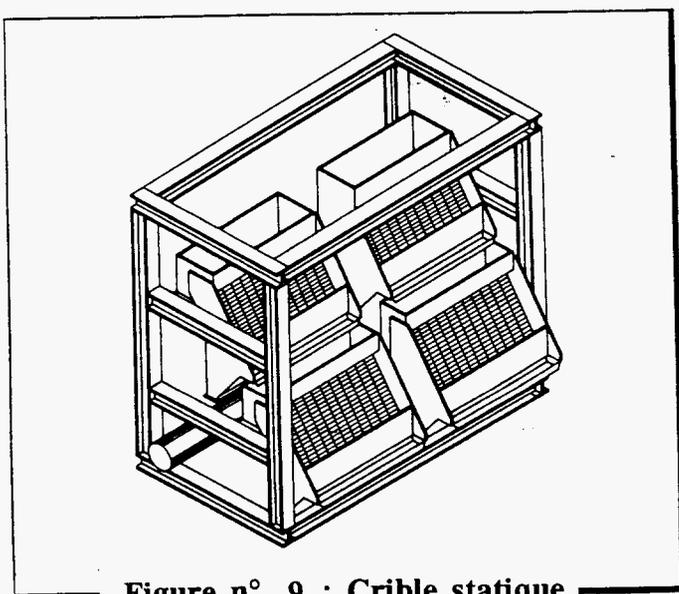


Figure n° 8 : Surfaces de criblage



\* **dépoussiérage / deschlammage** : élimination de particules fines ou ultra - fines (dans l'air / dans un liquide) constituant un déchet

Les surfaces métalliques de criblage sont choisies en fonction des matières à cribler, et de la séparation recherchée. Les surfaces de criblage les plus couramment utilisées sont illustrées sur la figure n° 8.

Il existe différents types d'appareils en fonction de l'application du criblage, dont les principaux sont :

- les grilles et cribles statiques (Voir figure n° 9)
- les grilles à mouvement mécanique
- les trommels (surface perforée tournante cylindrique - axe incliné ou conique - axe horizontal)
- les cribles vibrants (Voir figure n°10)
- les cribles radiaux et tangentiels (application fibres et moquettes)

Toutes ces techniques peuvent être mises en oeuvre soit à sec, soit en voie humide par adjonction de rampe d'arrosage (classification hydraulique), ou encore avec fluidification par un courant gazeux (classification pneumatique). Le travail en voie humide permet d'augmenter la fluidité de la masse à cribler, de faciliter l'entraînement rapide des fines à travers les ouvertures et d'assurer le lavage-rinçage des produits. Le travail avec ajout de courant gazeux a pour double effet d'augmenter la fluidité de la masse à cribler et d'activer le passage des fines au travers des tissus tamisants.

**4 - Classification hydraulique / classification pneumatique** <sup>(1,2,5-10)</sup>

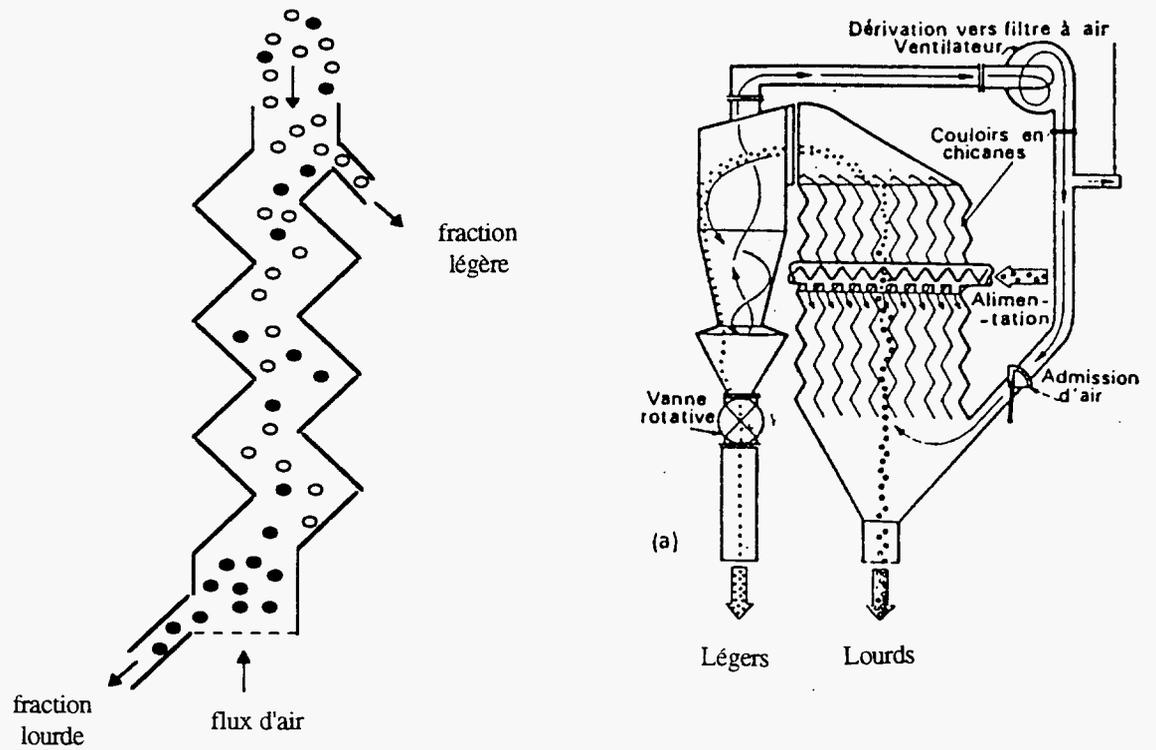
<i>Matières entrantes</i>	<i>Caractéristique du procédé</i>	<i>Matières sortantes</i>	<i>Stade d'avancement</i>	<i>Gamme de débits</i>	<i>Prix</i>	<i>Réf. adresse</i>
déchets broyés (< 10 mm)	* <u>pneumatique</u> : dépoussiérage + extraction des mousses	pureté : de 70 à 90 %	Industriel	100 Kg / h à 2 T / h	De moyen à cher	44, 53, 84, 87, 90
+ état de surface propre	* <u>hydraulique</u> : séparation en fonction de la densité, de la forme, de la taille  →conc gravimétrique : - différence de densité de 0,2 g/cm <sup>3</sup> , forme et taille homogènes - valeurs d'accélération : <i>bac</i> : 10 g <i>cyclone</i> : 100 g <i>bi-cyclone</i> : 1 000 g	pureté : de 95 à 99,9 %	Industriel + R&D	50 Kg/h à 10 T / h	Achat : de 1 à 5 MF	

**Définition** : Les procédés de classification sont basés sur les phénomènes régis par les lois du mouvement des solides dans les fluides. C'est la résistance opposée par un fluide au déplacement du solide qui est utilisée pour ce classement. Dans le cas où le fluide est un liquide, on parle de classification hydraulique ; dans le cas où le fluide est l'air, on parle de classification pneumatique. *Applicables dans le cas de tri et de sur-tri.*

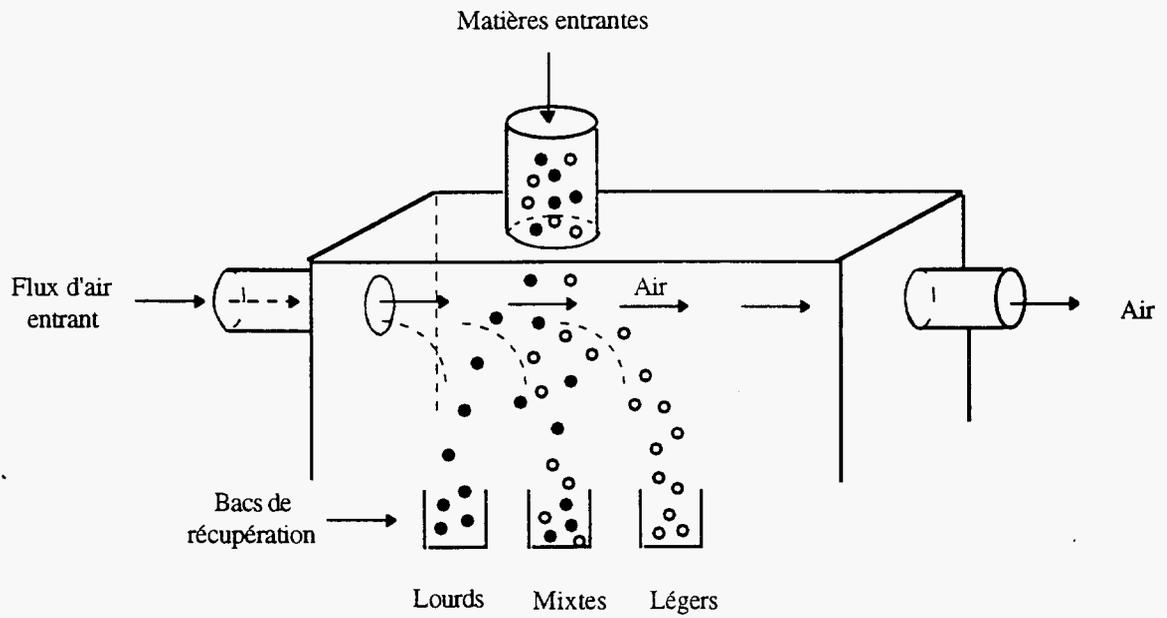
**Propriétés utilisées** : forme, masse volumique, surface d'une particule dans un fluide

Les pulpes diluées (cas de la sédimentation libre : moins de 5% en volume de solide dans le fluide) sont utilisés pour les classements volumétriques (taille, forme des particules), tandis que les pulpes relativement denses (cas de la sédimentation gênée : plus de 5% en volume de solide dans le fluide, et environ 25% dans le cas de pulpes denses) s'utilisent pour les classements densimétriques.

Le classificateur est l'appareil qui permet d'opérer un classement par entraînement de certaines particules à l'aide d'un courant d'eau ou d'air (cette fraction s'appelle surverse ou *overflow*), alors que d'autres particules sédimentent (fraction dite sousverse ou *underflow*). La plupart de ces appareils travaillent dans des conditions de sédimentation gênée (plus de 5 % en volume de solide dans le fluide), de façon à se trouver le plus souvent en régime d'écoulement laminaire et de diminuer la vitesse de sédimentation des particules.



**Figure n° 11 : Principe de fonctionnement du zig-zag**



**Figure n° 12 : Principe de fonctionnement de "l'air-knife"**

Techniquement, les procédés de classification sont divisés en deux familles, qui sont les procédés pneumatiques ou hydrauliques, suivant que le fluide est l'air ou l'eau.

### 1) Classification pneumatique

On désigne sous le terme générique de classifications pneumatiques l'ensemble des procédés permettant la séparation de particules solides en suspension dans un flux d'air, méthode s'appuyant sur les mouvements relatifs des particules les unes par rapport aux autres et de ces mêmes particules par rapport à l'air, lorsque l'ensemble solide/liquide est soumis à l'action d'un champ d'accélération (gravité ou accélération centrifuge).

La réussite de ce type de procédé nécessite un degré de siccité poussé des matières plastiques à traiter.

On trouve différents classificateurs pneumatiques :

- chambres de dépoussiérage (pas de coupe granulométrique précise, récupération du maximum de poussières ou du maximum de grains grossiers)
- appareils à courant d'air ascendant (dépoussiéreurs, sélecteurs ou élutriateurs ou zig-zags - Voir figure n° 11)
- appareils agissant par centrifugation (cyclones dépoussiéreurs, sélecteurs à air en spirale)
- appareil à courant d'air horizontal (« *air-knife* » - Voir figure n° 12)

Dans le domaine du traitement des matières plastiques, outre les opérations de dépoussiérage et d'extraction de fines très pratiquées, la classification pneumatique peut être appliquée à la séparation de matières de très faible densité (mousses, matières expansées, films, mais aussi papiers), ou présentant une différence de densité significative.

Il faut cependant noter, que bien que ces techniques de classification pneumatique permettent d'obtenir des taux élevés de pureté, les rendements sont souvent insatisfaisants dans le cas de la séparation des plastiques (autres que les fines / poussières et les mousses).

### Classification hydraulique

La classification hydraulique est l'équivalent de la classification pneumatique, en utilisant un liquide (souvent de l'eau) comme fluide.

Dans la classification hydraulique se trouvent les procédés de concentration gravimétrique, possible grâce aux différences de mouvement des particules dans un fluide en fonction de l'action simultanée de la gravité (ou d'une force centrifuge) et d'une ou plusieurs autres forces, en général la résistance à la pénétration des particules dans un milieu plus ou moins fluide (gaz, eau, liquide homogène ou mélange fluide + particules solides en suspension).

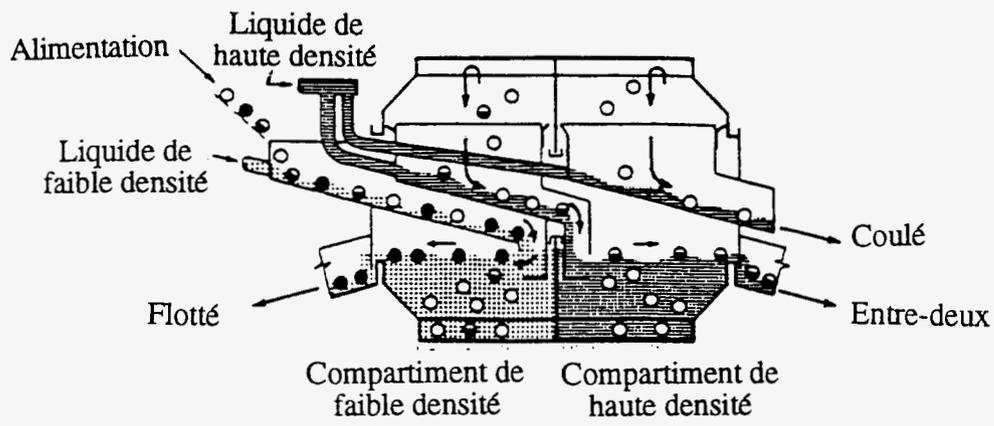


Figure n° 13 : Séparateur à tambour

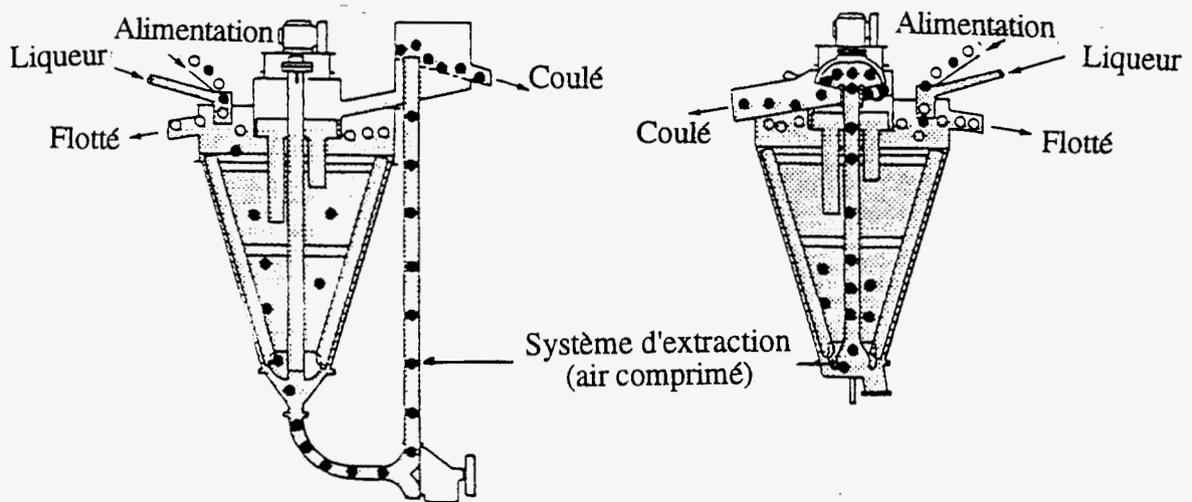


Figure n° 14 : Séparateur à cônes

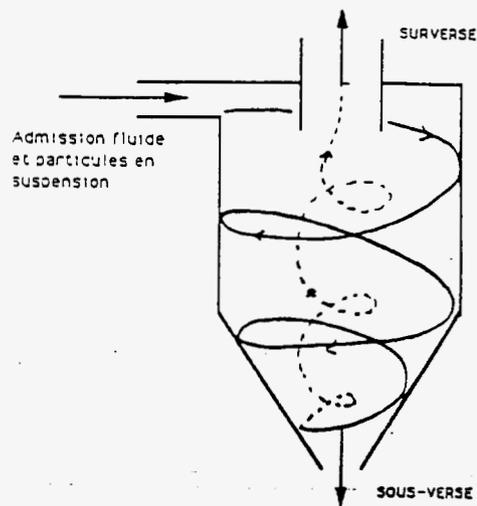


Figure n° 14bis : Fonctionnement d'un cyclone

Cette technique de séparation utilise soit la masse volumique du fluide, sa viscosité et l'aptitude des corps à flotter ou plonger dans ce fluide, soit un fluide pulsé verticalement et les mouvements des corps pendant les impulsions ascendantes ou descendantes, soit, enfin, un fluide en mouvement pratiquement horizontal et le frottement entre les solides à séparer et une surface-support fixe ou mobile, plus ou moins rugueuse.

Deux procédés <sup>(1,2)</sup> permettent de séparer les matières plastiques par les techniques de concentration gravimétrique :

- le procédé avec fluide stationnaire : la séparation flottés/coulés se fait selon le principe de la poussée d'Archimède. Cela porte aussi le nom de concentration par liqueur dense. Les solides sont immergés dans un liquide ayant une densité intermédiaire entre celles des solides à séparer. Les particules lourdes vont couler alors que les légères vont flotter. Les appareils permettant cette séparation utilisent soit la pesanteur (séparateurs à tambours - figure n° 13 - ou à cône - figure n° 14), soit la force centrifuge (séparateurs à cyclones - Voir figure n° 14bis).
- le procédé avec fluide en mouvement, qui fait l'objet de deux principales techniques :
  - \* la technique dite de la nappe fluante, où les solides s'écoulent sur une surface plane souvent rainurée, inclinée légèrement par rapport à l'horizontale, cette surface pouvant être fixe ou mobile, dans la même direction qu'une nappe ou qu'un courant d'eau. On parle alors de séparation par table humide ("wet tabling") et de séparation par table sèche ("dry tabling"), selon que le fluide utilisé est l'eau ou l'air.
  - \* la technique par accélération différentielle, où les solides sont soumis à des courants ascendants et/ou descendants. Le liquide est "pulsé" verticalement de façon alternée, provoquant la chute de la fraction lourde au fond du lit et la montée de la fraction légère au sommet. La pulsation du liquide est donnée soit par le mouvement du bac, soit par le mouvement de l'eau. On nomme ces appareils "jigs" ou bacs à pistonage.

Un cas particuliers de concentration gravimétrique est la séparation par table densimétrique à lit fluidisé : un fluide (essentiellement l'air) est envoyé à travers le crible qui est donc, dans ce cas, percé. La séparation se fait selon le schéma de la figure n° 15.

L'efficacité de ces techniques est très liée à la granulométrie des solides à séparer, au degré de libération en fonction de la taille de ces solides, ainsi qu'à leur forme. Il existe de plus des limitations aux différences de densités spécifiques des produits ; par exemple dans le cas de la séparation par liqueur dense, cette différence doit être au moins égale à  $0,2 \text{ g/cm}^3$ , pour obtenir une bonne efficacité de séparation.

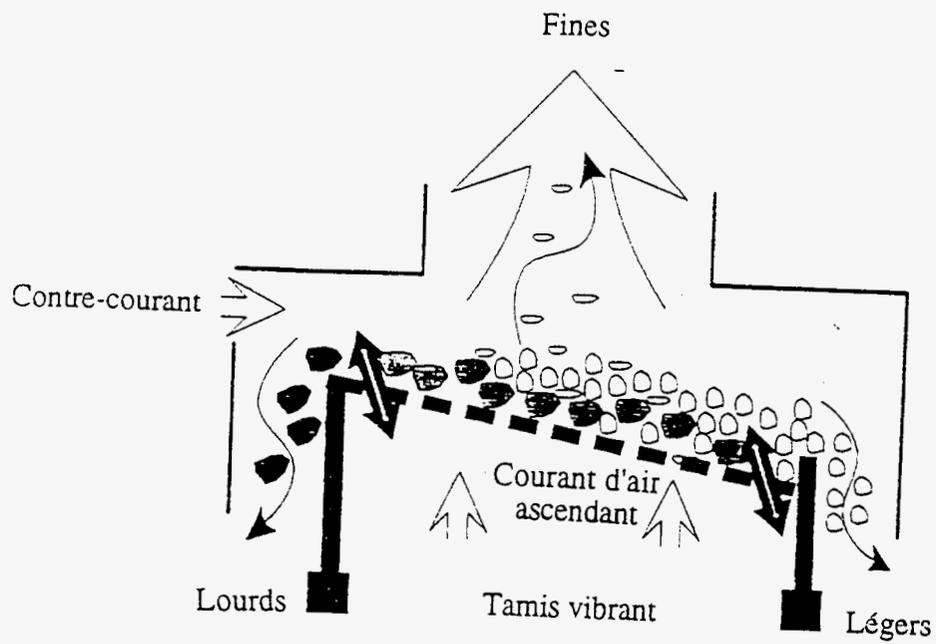


Figure n° 15 : Table densimétrique à lit fluidisé

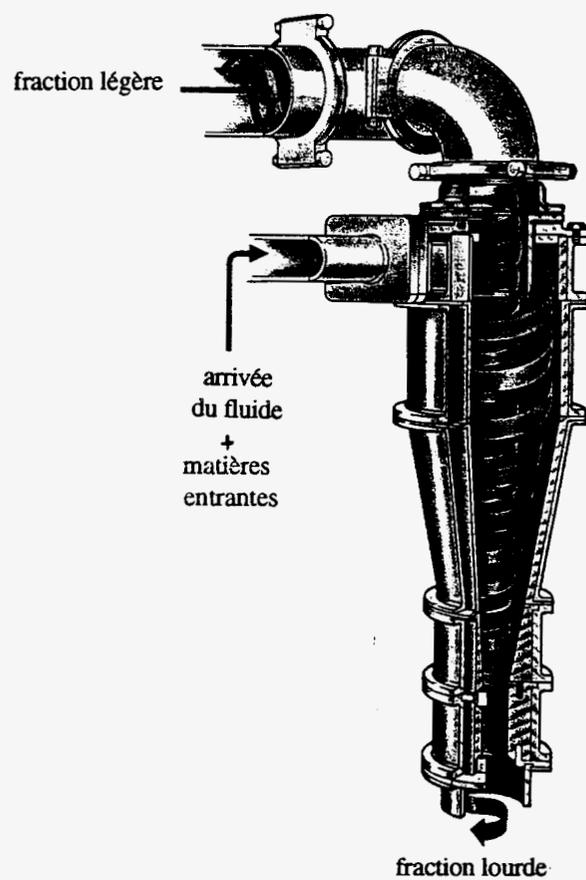


Figure n° 16 : Hydrocyclone

### Procédés particuliers de séparation par concentration gravimétrique <sup>(5-10)</sup>

Certaines techniques de séparation densimétrique font intervenir un traitement préalable du mélange de polymères ayant des densités voisines, modifiant la densité apparente d'un des composés, ce qui permet ensuite d'appliquer une séparation densimétrique par flottaison classique.

Ainsi, plusieurs brevets, notamment européen et américain <sup>(5,6)</sup>, ont été déposés. Ils proposent une séparation densimétrique PVC/PET mettant en oeuvre la modification préalable de la densité du PVC par ajout d'un agent gonflant spécifique (par exemple l'acétone <sup>(5)</sup>). Le procédé comprend le traitement du mélange PVC/PET sec avec un solvant sélectif du PVC (capable de le faire gonfler, de le modifier), l'élimination du solvant en excès par séchage, et le traitement du mélange modifié dans un bain de densité supérieure à celle du polymère modifié. Ceci permet la séparation entre le polymère gonflé (PVC) qui va flotter, et le polymère non gonflé (PET) qui va couler, et la récupération des deux fractions séparées. Cependant, l'extraction du solvant absorbé par le PVC, nécessaire à sa récupération, est assez coûteuse, ce qui pose toujours un problème de rentabilité du procédé.

**N.B.** : La séparation polymère gonflé / polymère non gonflé peut aussi être réalisée par flottation-moussage.

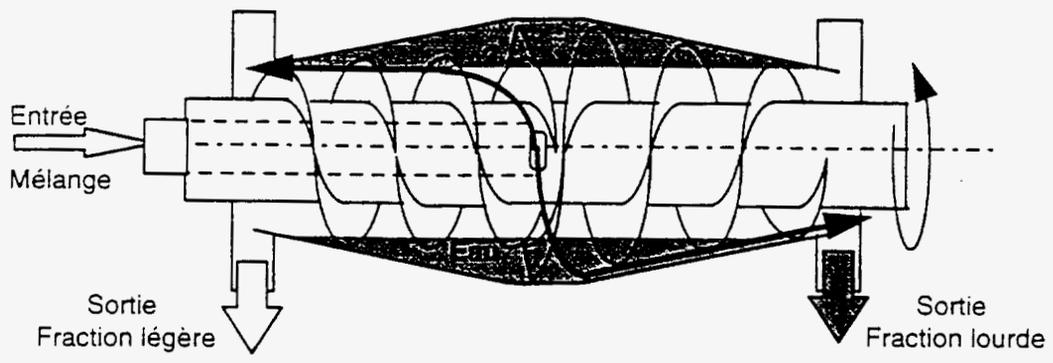
La **Goodrich Company** <sup>(7)</sup> a breveté un procédé de séparation des matières plastiques de densités voisines faisant intervenir l'ajout de plastifiant pour la modification de densité d'un des polymères du mélange. Les particules sont mises dans un bain de densité connue contenant le plastifiant d'un des plastiques, qui doit être chauffé à une température voisine de la température de transition vitreuse (Tg) du plastique à plastifier, mais inférieure au Tg de chacun des autres plastiques présents dans le mélange.

L'excès de plastifiant est retiré par lavage et séchage des particules. La coupe densimétrique est ensuite effectuée soit par flottaison, soit par hydrocyclonage. Par exemple, dans le cas de la séparation PVC/PET, le plastifiant utilisé est le dioctyl adipate, ajouté dans un bain de densité comprise entre 1,1 et 1,3 g/cm<sup>3</sup> : le PVC qui a absorbé le plastifiant possède une densité plus faible que celle du bain et flotte, tandis que le PET coule.

Des sociétés allemandes, telles **AKW** (Apparate und Verfahren GmbH) <sup>(8)</sup> et **Herbold GmbH** <sup>(9)</sup>, ont développé des équipements d'hydrocyclonage pour la séparation des matières plastiques selon le principe de fonctionnement donné sur le schéma n°16. Mais la société Herbold a depuis abandonné cette technologie (voir compte-rendu de visite joint en annexe).

Le liquide utilisé est généralement de l'eau. La coupe densimétrique réalisée par l'hydrocyclone peut être fixée à différentes valeurs car elle est régie par la géométrie de l'hydrocyclone et par la pression d'eau appliquée qui conditionne la force des vortex intérieur et extérieur (voir figure n° 16).

Cependant, cette technique est très sensible à la granulométrie des particules



**Figure n° 17 : Principe du procédé CENSOR**

*broyées qui doit être idéalement homogène et inférieure à 10-15 mm. Si une trop importante dispersion de taille est présente dans le gisement, on peut observer une double séparation basée à la fois sur la densité (les particules lourdes descendent tandis que les particules légères remontent) et sur la taille (les grosses particules ont tendance à descendre quelle que soit leur densité).*

*NB : La densité de séparation peut aussi être modifiée par l'utilisation de solutions salines ou de suspensions (ex. : baryte + eau).*

*La société allemande **KHD Humbolt Wedag**<sup>(10)</sup> a breveté récemment un procédé industriel de séparation centrifuge en voie humide qui combine les avantages de la flottation (séparation densimétrique fine) et de l'hydrocyclonage (faible encombrement, rapidité de séparation).*

*L'appareil est constitué de deux cônes horizontaux accolés, partiellement remplis d'un liquide de densité variable, et en mouvement de rotation rapide. Les plastiques sont mis en suspension dans ce même liquide avant d'être introduits dans l'appareil, où ils subissent d'importantes forces de cisaillement et des turbulences. Les particules de densité supérieure à celle du liquide sont repoussées en dehors de la chambre centrifuge et celles de densité inférieure flottent à l'intérieur. Les fractions séparées sont transportées par des cavités longitudinales situées sur chaque cône, puis elles sont extraites du liquide et séchées par centrifugation. Le procédé peut être réalisé en une seule étape ou en deux étapes en cascade (voir figure n° 17).*

*Cette technique permet de laver les plastiques, de les séparer avec une grande sélectivité et de les sécher, la circulation du fluide se faisant en boucle fermée. De plus, KHD Humbolt avance que la forme et la taille des particules n'ont qu'une influence secondaire sur la séparation. Les taux de pureté peuvent atteindre 99,9 % avec une efficacité de 99,5 %.*

*Des unités de traitement de corps creux sont opérationnelles (capacité de traitement de 3 à 10 T/h), et des essais ont été réalisés sur la récupération de PA, ABS ou PVC issus de déchets de câbles et de revêtements de sol. Mais cette société s'intéresse aussi aux déchets issus du secteur automobile.*

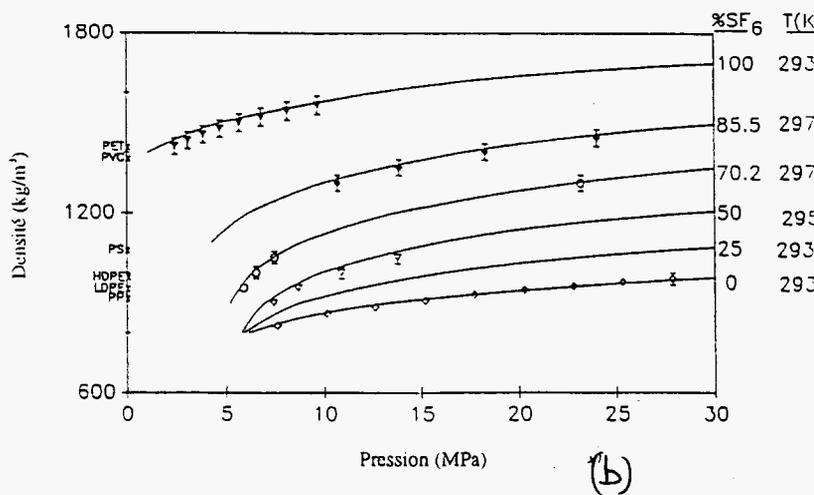
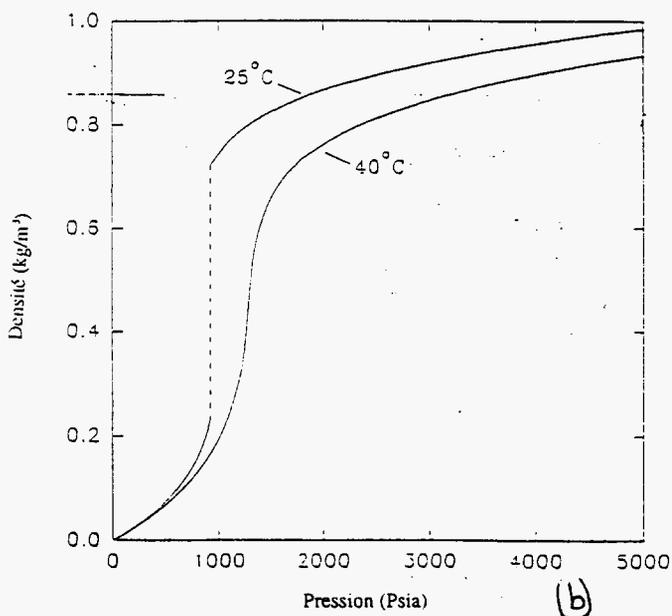
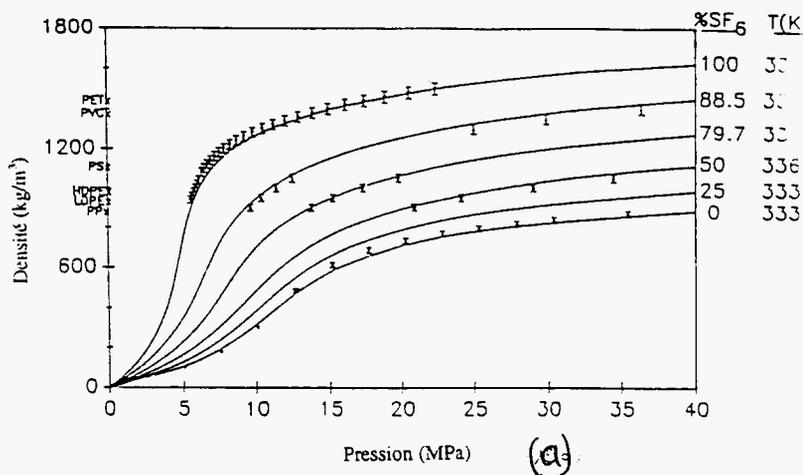
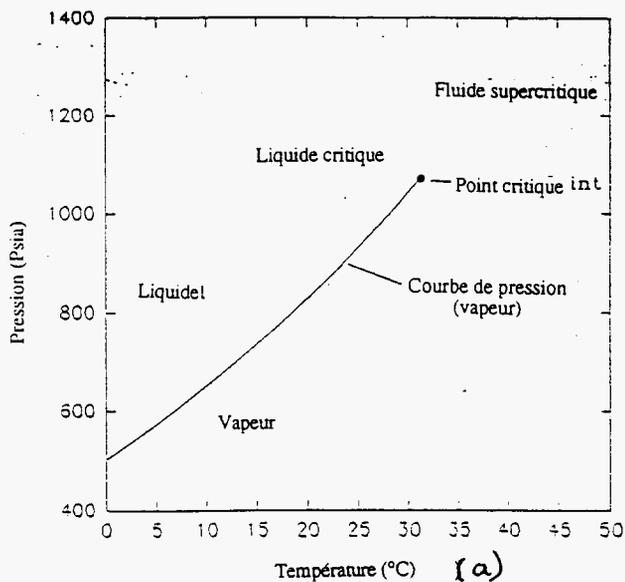


Figure n° 18 (a, b) : Courbes de CO<sub>2</sub> (densité/T°/Pression)

Figure n° 19 (a, b) : Courbes de CO<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>

**5 - Séparation par fluide supercritique <sup>(11-16)</sup>**

<i>Matières entrantes</i>	<i>Caractéristique du procédé</i>	<i>Matières sortantes</i>	<i>Stade d'avancement</i>	<i>Gamme de débits</i>	<i>Prix</i>	<i>Réf. adresse</i>
déchets broyés (< 6 mm)	- efficacité : > 95% (précision de séparation sur 0,001 g/cm <sup>3</sup> )	- pureté : > 99 %	R&D	débit à l'échelle du laboratoire	Coût élevé (travail sous haute pression), rentable sur produits à très haute valeur ajoutée	46, 99

Définition : cas particulier de concentration gravimétrique. *Développement en procédés de tri et sur-tri.*

Propriétés utilisées : masse volumique

Un cas particulier de concentration gravimétrique utilise les fluides dans des conditions de température et de pression supérieures aux valeurs critiques de ces derniers. Dans ces conditions, propres à chaque fluide, les phases liquide et vapeur ont la même densité et se mêlent de façon homogène pour donner le fluide supercritique. Les fluides supercritiques les plus couramment utilisés sont le CO<sub>2</sub> et le SF<sub>6</sub>, ou une combinaison des deux (voir figures n° 18 a/b et n° 19 a/b).

Deux procédés découlent de cette technique :

- \* le premier <sup>(11-15)</sup> consiste à placer un mélange de polymères préalablement broyés dans un fluide supercritique et, par l'application de variation de pression, à faire varier la densité de ce fluide de façon à séparer sélectivement les différents composants par mise en suspension ou coulage sélectif de ces derniers. Cette technique de séparation densimétrique permet une précision dans la séparation de l'ordre de 0,001 g/cm<sup>3</sup>, pour une échelle de densité comprise entre 0,780 et 1,700 g/cm<sup>3</sup>, ce qui rend possible la séparation de polymères ayant des densités très proches, tels que le PVC et le PET par exemple. Cette technique est la plus fréquemment mise en oeuvre.
- \* le second procédé <sup>(16)</sup> met en oeuvre la dissolution sélective d'un fluide supercritique dans l'un des polymères aux conditions de température et de pression appropriées. Une fois le mélange mis en solution dans le fluide supercritique, une diminution rapide de la pression va provoquer le moussage d'un des composants par incorporation du fluide à l'intérieur de ce dernier. Ce composant va alors voir sa densité apparente modifiée. Le mélange, ainsi modifié, peut ensuite subir une opération de séparation densimétrique classique, à température et pression ambiantes.

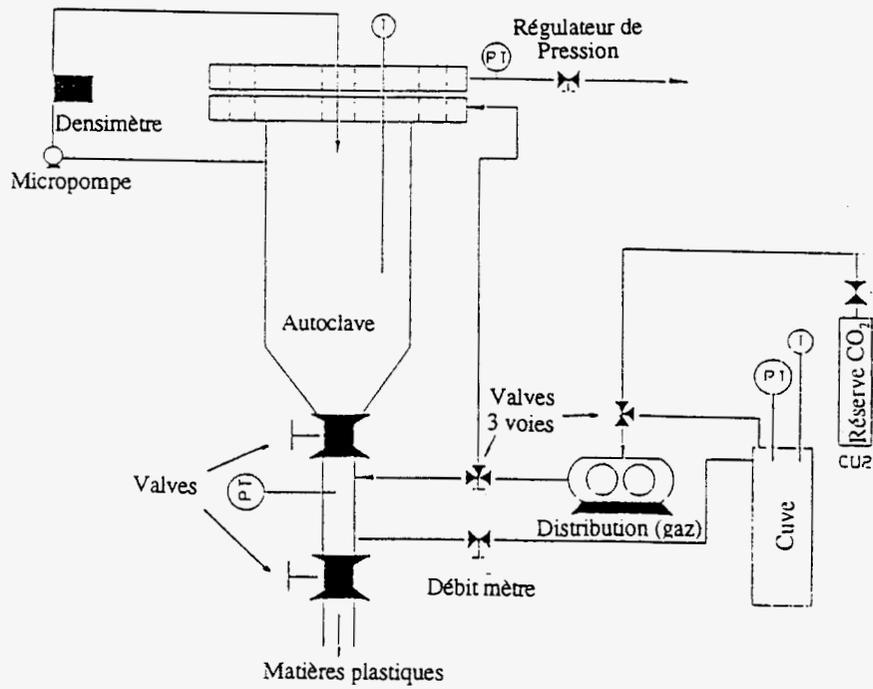


Figure n° 20 : Appareillage de laboratoire (séparation par fluide supercritique)

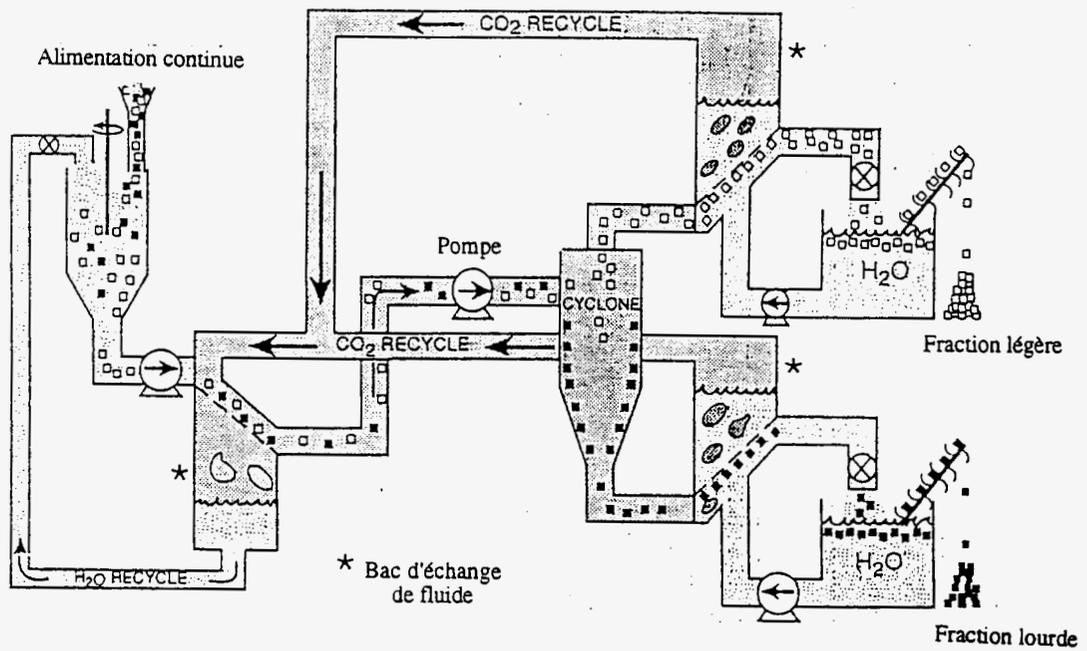


Figure n° 21 : Appareillage industriel (séparation par fluide supercritique)

Ces procédés présentent de multiples avantages:

- ils permettent la séparation densimétrique de polymères ayant des densités proches, et donc inséparables par les techniques densimétriques classiques
- absence des effets néfastes liés aux tensions superficielles
- faible viscosité des fluides entraînant des vitesses de séparation rapide
- faible toxicité, inflammabilité et inertie chimique des fluides sont des facteurs positifs dans le choix de ces procédés (essentiellement dans le cas du CO<sub>2</sub>)
- les taux de pureté peuvent atteindre plus de 99 %.

Les principaux inconvénients résident dans la nécessité de travailler à haute pression, et les coûts d'installations sont parfois élevés.

Une seconde limitation économique de ce process concerne la faible quantité de matières plastiques pouvant être traitée par fluide supercritique. L'Université de Pittsburg <sup>(11bis)</sup> tente actuellement de développer des systèmes de réacteurs sous faible agitation, qui permettraient d'augmenter la quantité de plastiques traités de 2 % à 56 % en volume. Des recherches de faisabilité économique sont donc toujours en cours.

Cette technique de séparation peut être mise en oeuvre à l'échelle du laboratoire selon le schéma de fonctionnement de la figure n° 20, proposé par l'université de Pittsburg <sup>(12)</sup>. Industriellement, ce procédé peut être réalisé dans un cyclone tel celui proposé sur le schéma de fonctionnement représenté sur la figure n° 21.

Il faut toutefois préciser que la séparation par fluide supercritique, de par son coût très élevé, trouve à ce jour des applications essentiellement dans la préparation de produits alimentaires et pharmaceutiques à très haute valeur ajoutée.

## Principe de fonctionnement du tri balistique

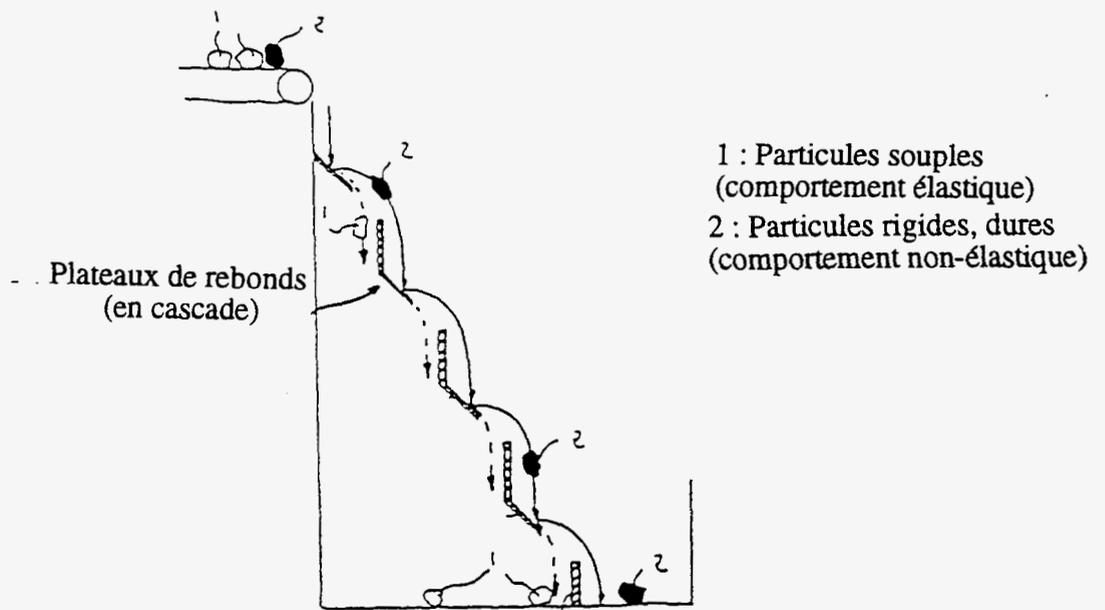


Figure n° 22 : Tri balistique (par rebonds)

**6 - Tri balistique**

<i>Matières entrantes</i>	<i>Caractéristique du procédé</i>	<i>Matières sortantes</i>	<i>Stade d'avancement</i>	<i>Unités / débits commercialisés</i>	<i>Prix</i>	<i>Réf. adresse</i>
déchets broyés (< 10 mm), secs, de granulométrie homogène	Séparation essentiellement de corps plats / volumineux	- pureté : > 98 %	R&D + Industriel (peu répandu)	débit : jusqu'à 0,5 T / h		102

Propriétés utilisées : forme, densité, élasticité, poids

Définition : Le tri balistique est basé sur le mouvement des corps lancés dans l'air, c'est à dire sur le mouvement des projectiles. Cette séparation fait donc intervenir l'action de la gravité sur des particules lancées. *Applicable en tri.*

On peut distinguer deux types de tri balistique :

- le premier consiste à soumettre des particules solides, que l'on projette, à l'action de la gravité. L'expérience montre que chaque solide a une trajectoire qui lui est propre.
- le second consiste à projeter les particules solides sur une paroi où elles vont venir rebondir. Ce second procédé combine donc l'action de la gravité à la différence de propriétés de rebond des particules (directement liée à l'élasticité du matériau).

Ces techniques, inspirées des phénomènes aérodynamiques des projectiles dans l'air, sont assez récentes dans le domaine de la séparation des matières plastiques et sont à ce jour relativement peu développées.

L'exemple du tri balistique par rebonds, qui est le plus répandu à ce jour, est décrit sur la figure n° 22.

**7 - Flottation-Moussage** <sup>(1,2, 17-20)</sup>

<i>Matières entrantes</i>	<i>Caractéristique du procédé</i>	<i>Matières sortantes</i>	<i>Stade d'avancement</i>	<i>Unités / débits commercialisés</i>	<i>Prix</i>	<i>Réf. adresse</i>
déchets broyés fins (< 3 mm), secs, de granulométrie homogène	- efficacité : > 70 % - limites d'utilisation : très sensible à de multiples facteurs	- aspect  - pureté : teneur en polluant < 100 ppm, ou 10 ppm selon le gisement	R&D et Industriel	1 ou 2 unités aux USA (sur-tri PET/PVC)		17, 96, 101

Propriétés utilisées : mouillabilité, propriété de surface, densité apparente

Définition : Cette technique utilise les différences de propriétés des interfaces entre les solides, une solution aqueuse et un gaz (souvent l'air). La séparation se base donc sur l'aptitude des solides à être mouillés par des fluides, en général l'eau (phénomènes de tensions superficielles). *Applicable en sur-tri.*

La flottation-moussage se décompose en plusieurs opérations élémentaires :

- 1 . Mise en suspension des solides dans l'eau et adsorption de surfactants à l'interface solide/solution aqueuse afin de conférer une hydrophobicité suffisante à la surface des particules.
2. Modulation de l'adsorption de ces surfactants par ajout d'un agent modificateur qui rend sélective l'action du (ou des) surfactants par activation (un corps qui coulait va flotter en présence de cet agent) ou par dépression (un corps qui flottait va couler en présence de cet agent)
3. Contact entre les particules solides et les bulles d'air engendrées par des agitateurs, des diaphragmes ou des électrodes
4. Transfert de l'agglomérat "particules + bulles" dans l'écume

La séparation est donc basée sur le principe flottés/coulés, par modification de l'hydrophobicité de la seule phase solide à séparer : on parle de flottation différentielle.

Les particules que l'on désire séparer sont mises en suspension dans l'eau. On traite alors cette "pulpe" avec des réactifs chimiques (surfactants, éventuellement modificateurs), dont le rôle est de rendre hydrophobe la surface de certains solides, de manière à ce qu'elle ait une plus grande affinité pour l'air que pour l'eau. A la fin de cette phase de conditionnement, la surface des particules constituées de la fraction solide à séparer est seule devenue hydrophobe, ce qui permet de réaliser une flottation différentielle. La seconde étape consiste à introduire la pulpe dans des cellules de flottation où on génère dans la suspension un bullage d'air. Selon le principe de la poussée

- A : Rotor
- B : Rotor en position basse
- C : Rotor en position haute
- D : Tube fixe
- E : Rotor
- F : Force centrifuge
- G : Stator

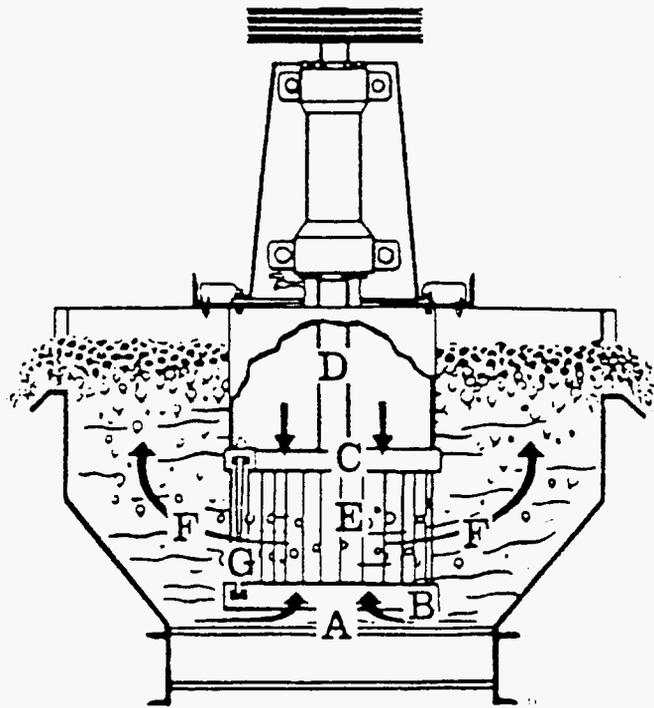


Figure n° 23 : Equipement de flottation-moussage

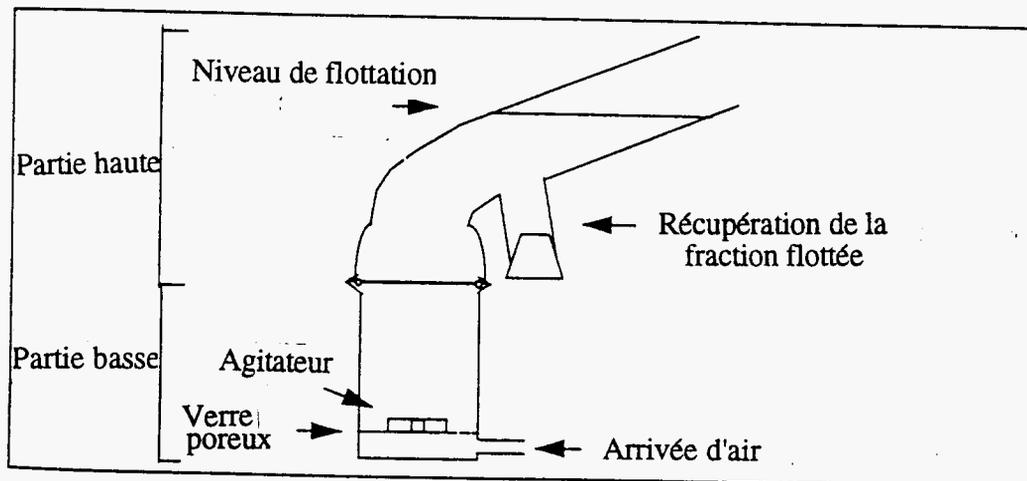


Figure n° 24 : Colonne d'Hallimond (Appareillage de laboratoire)

d'Archimède, l'ensemble "particule + bulles d'air" va monter dans l'écume qui, une fois enrichie en fraction solide, sera retirée.

L'ajout d'un agent moussant en faible concentration lors de l'étape 3 est quelquefois nécessaire, permettant ainsi le contrôle de la distribution granulométrique des bulles d'air qui sont plus fines et donnant une mousse pseudo-stable qui facilite la collecte des solides.

Un exemple de mise en oeuvre de ce procédé <sup>(2)</sup> est donné sur la figure n° 23. Le principe de la colonne de Hallimond en régime newtonien (non turbulent) est plus spécifiquement utilisé pour le traitement des matières plastiques (figure n° 24), à l'échelle du laboratoire <sup>(20)</sup>.

Cette technique demeure cependant délicate à mettre en oeuvre car elle nécessite la compréhension de différents paramètres comme :

- le mécanisme cinétique des réactions
- l'influence de la granulométrie, de la composition, directement liés aux propriétés des solides
- l'influence des facteurs liés aux réacteurs (volume, débit, conditions d'agitation,...)

L'état de surface a aussi une très grande importance sur l'efficacité de la séparation, un nettoyage poussé des matières est souvent nécessaire. Ainsi, dans le cas de matières plastiques issues de la collecte sélective, la pollution par de nombreux contaminants pose d'importants problèmes de séparation par ce procédé.

De ce fait, la flottation-moussage reste à ce jour un procédé difficile, utilisé essentiellement en sur-tri dans le cadre de la séparation des matières plastiques.

### **Procédés particuliers de séparation par flottation-moussage**

*Une équipe américaine <sup>(17)</sup> s'est attachée plus spécifiquement à l'étude du compromis taille des particules/ taille des bulles pour optimiser l'efficacité de ce procédé. Comme l'expérience montre que plus le rapport  $d_p/d_b$  est élevé ( $d_p$  = taille des particules,  $d_b$  = taille des bulles) plus la séparation est efficace, l'efficacité de la séparation croît donc soit quand la taille des particules augmente, soit quand la taille des bulles diminue. C'est sur ce dernier constat qu'ils ont développé une technique de production de microbulles d'air, de taille inférieure à 500  $\mu\text{m}$ . Ils estiment que l'efficacité de séparation peut atteindre 100 % pour des bulles inférieures à 500  $\mu\text{m}$  et des tailles de particules comprises entre 500 et 850  $\mu\text{m}$ .*

*Cette technique nécessite donc un broyage poussé des plastiques, ce qui freine la rentabilité du procédé de flottation-moussage.*

*Dans le cadre du recyclage des bouteilles en PVC et en PET, une thèse <sup>(20)</sup>, réalisée en partenariat avec l'ADEME et le BRGM, a été soutenue fin Octobre 1997. Il a été démontré (170) que les conditions les plus favorables à la sélectivité du réactif vis à vis du PET, en terme de concentration, de pH, de granulométrie et de forme des particules, permettent d'obtenir une teneur résiduelle en PVC dans un gisement de PET de moins de 100 ppm, ceci à partir d'un gisement initial contenant de 150 à 300 ppm de polluant PVC.*

*Le TU Delft <sup>(19)</sup> réalise des études plus fondamentales sur la compréhension des phénomènes de surface qui régissent l'efficacité de la séparation par flottation-moussage. A ce titre, de nombreux types d'additifs ont été testés (produits polaires, non-polaires, ioniques, non-ioniques, complexes, ...) , dans des conditions de température et de pH différentes, avec des plastiques techniques différents (PP, HIPS, ABS, PC, PA, PMMA, PVC, POM, ...). Cet ouvrage a pour objectif de guider chercheurs et industriels dans leur choix d'additifs à utiliser préférentiellement pour le type de séparation de matières plastiques qu'ils ont à mettre en œuvre.*

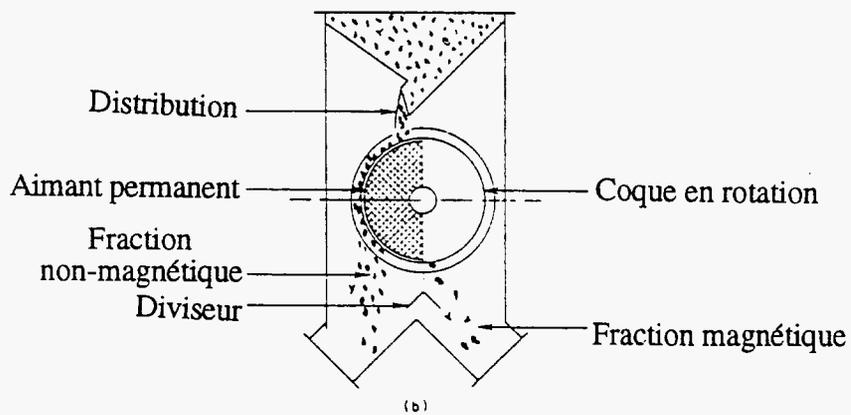
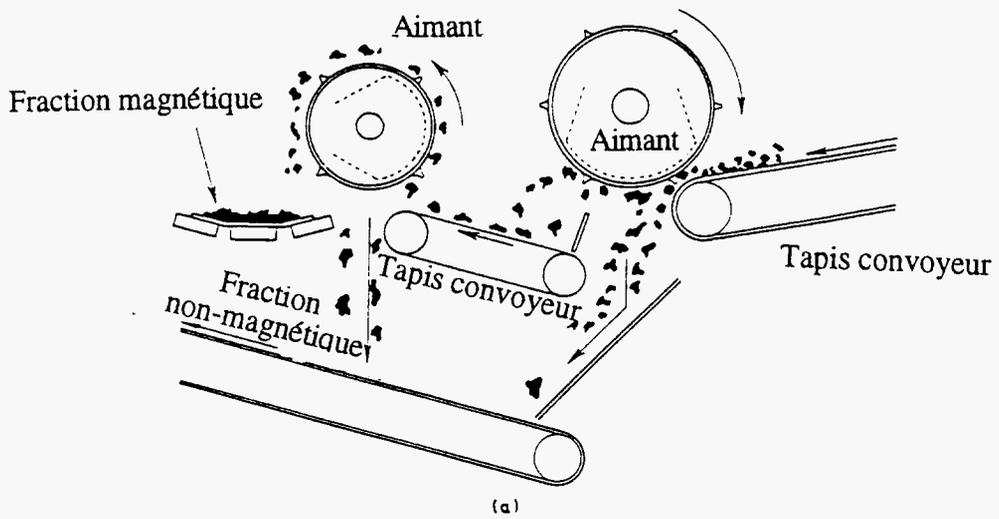


Figure n° 25 (a, b) : Séparateurs magnétiques

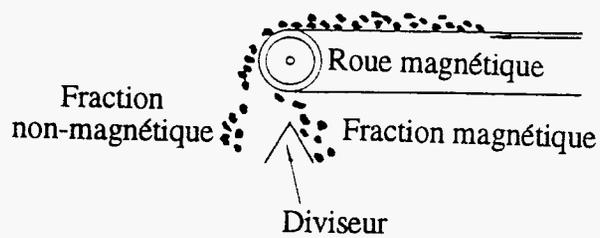


Figure n° 26 : Poulie magnétique

**8 - Tri magnétique <sup>(1,2)</sup>**

<i>Matières entrantes</i>	<i>Caractéristique du procédé</i>	<i>Matières sortantes</i>	<i>Stade d'avancement</i>	<i>Unités / débits commercialisés</i>	<i>Prix</i>	<i>Réf. adresse</i>
pièces entières ou déchets broyés	séparation métaux / plastiques, efficacité > 99%	- pureté	Industriel	Très répandu, notamment pour la protection des équipements de régénération des plastiques		3, 13, 36, 47, 68, 85, 89

Propriétés utilisées : électromagnétisme

Définition : Le tri magnétique est un procédé qui utilise la force engendrée par un champ magnétique pour aimanter de façon sélective les corps qui présentent la plus grande aptitude à l'aimantation. Le tri magnétique ne concerne pas directement la séparation des matières plastiques entre elles, mais il intervient très souvent en amont de traitements, notamment pour protéger les installations. *Applicable en tri.*

L'ensemble des particules est soumis à différentes forces qui sont :

- la force magnétique
- les forces indépendantes des propriétés magnétiques, telles que les forces gravitationnelle, centrifuge, d'entraînement par l'eau,...

Le comportement des matières dans un champ magnétique diffère selon que ces corps sont diamagnétiques, paramagnétiques, antiferromagnétiques (aimantation directement proportionnelle à la valeur du champ magnétique), ou bien ferromagnétique (l'aimantation est fonction de la température, du champ magnétique appliqué et des champs magnétiques appliqués antérieurs).

Il existe deux techniques de séparation :

- la séparation par aimantation simple : séparation des matériaux ferreux // non ferreux + non-métaux
- la séparation par électro-aimantation (ou courant de Foucault) : séparation des matériaux ferreux et non ferreux // non-métaux

Le tri magnétique trouve son application principale dans le déferrailage des déchets de matières plastiques. Les plastiques ne présentant aucune caractéristique magnétique, ils ne peuvent pas être séparés entre eux par cette technique.

Les figures n° 25 a/b et n° 26 sont des exemples de procédés de séparation magnétique.

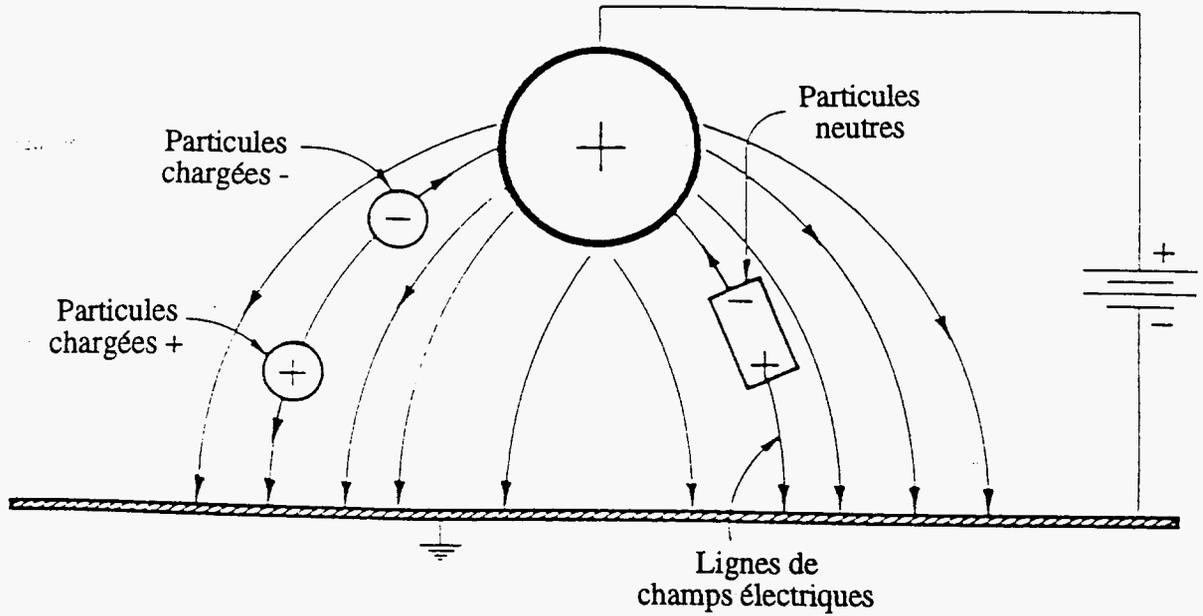
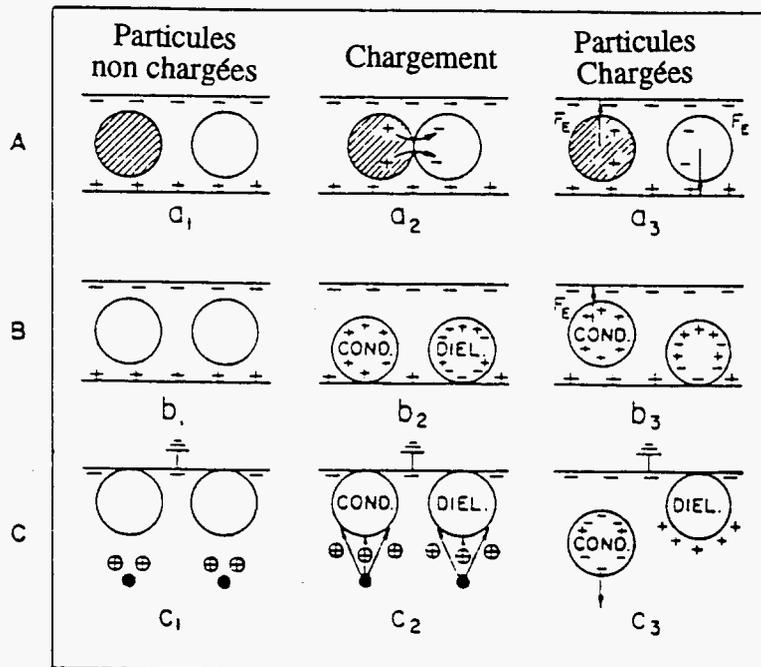


Figure n° 27 : Mouvement de particules chargées



Représentation des mécanismes de chargement :

- (A) Electrification par contact
- (B) Induction conductive
- (C) Bombardement ionique
  - électrode haute tension
  - ⊕ ions issus de bombardement ionique

Figure n° 28a: Techniques de chargement des particules

**9 - Tri électrostatique <sup>(1,2,,21-25)</sup>**

<i>Matières entrantes</i>	<i>Caractéristique du procédé</i>	<i>Matières sortantes</i>	<i>Stade d'avancement</i>	<i>Gamme de débits</i>	<i>Prix</i>	<i>Réf. adresse</i>
déchets de granulo. uniforme et < 6 mm, parfaitement secs et dépoussiérés		- pureté :	R&D et Industriel	Débit : 0,5 - 4 T / h  Essentiellement utilisé en sur-tri du PVC	-achat: de 1 à 2,5 MF (peu énergivore)  - coût : de 0,75 à 1 FF/Kg	22, 43, 50

Propriétés utilisées : aptitude des matières à se charger positivement (+) ou négativement (-)

Définition : Cette technique est basée sur les phénomènes d'attraction / répulsion différentielle de particules chargées soumises à un champ électrique. Les particules subissent une mise en charge entraînant l'apparition de charges négatives ou positives par transferts d'électrons. *Applicable en sur-tri.*

Ces particules ainsi chargées (+) ou (-) sont soumises à un champ électrique uniforme et séparées par attraction vers l'électrode de signe opposé : c'est la technique de l'électrophorèse.

Dans le cas où les particules restent neutres, on parle de diélectrophorèse, qui est une technique basée sur le mouvement de ces dernières dans un champ électrique non uniforme. Les particules neutres ne se polarisent pas tandis que les particules polarisées se déplacent dans la direction du champ électrique et sont donc attirées dans la région de haute intensité.

Les principes de séparation de ces techniques sont rassemblés sur la figure n° 27.

Les techniques utilisées pour charger les particules sont au nombre de trois <sup>(1,2)</sup> :

- \* la *charge triboélectrique* ou par *contact* : elle est obtenue par frottement intensif de particules différentes entre elles. Les particules ayant la plus forte constante diélectrique se chargent positivement, celles ayant la plus faible se chargeant négativement.
- \* l'*induction conductive* : des particules non chargées viennent au contact de particules présentant une surface chargée, donc ayant une polarité, avec éventuellement un potentiel de surface. Si les particules sont conductrices, elles prendront la polarité et le potentiel de la surface chargée rapidement ; si elles sont diélectriques, elles deviendront polarisées et le côté de la particule éloignée de la surface chargée développera la même polarité que cette surface chargée.

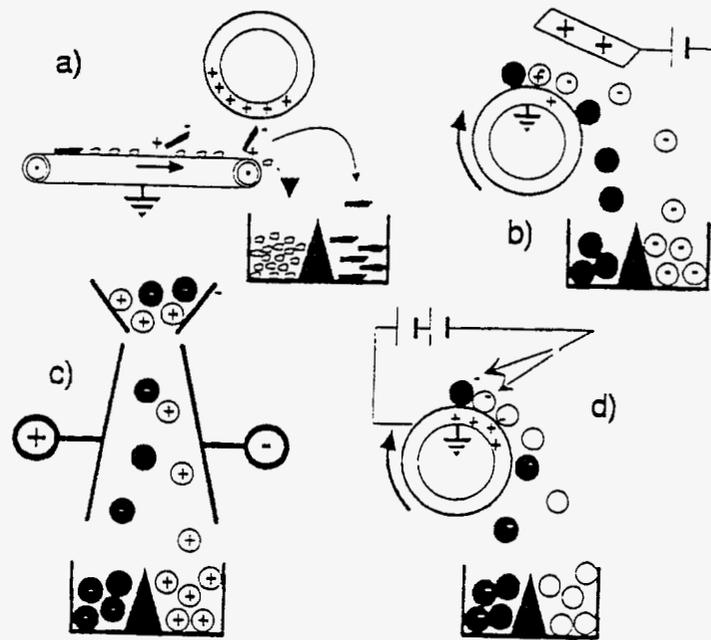


Figure n° 28 b : Principe de séparation électrostatique



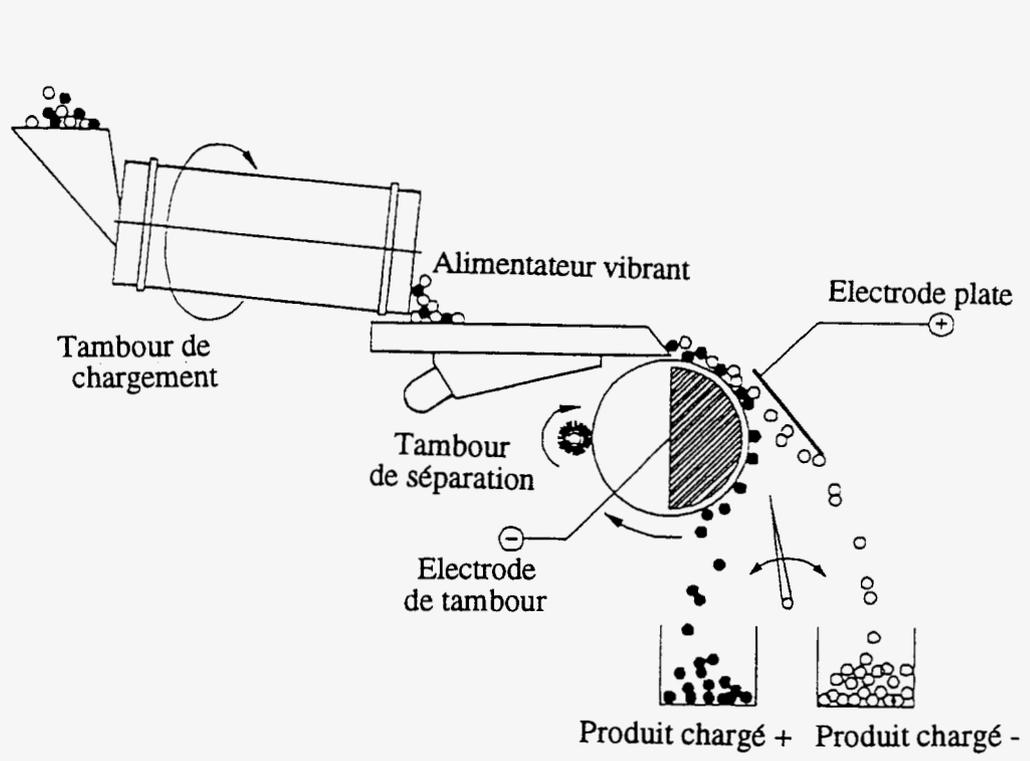


Figure n° 29 : Séparateur électrostatique Hamos

### **Procédés particuliers de tri électrostatique**

La société allemande **Hamos GmbH** <sup>(24)</sup> propose un procédé de tri électrostatique mettant en oeuvre une mise en charge par triboélectricité. Elle développe actuellement des applications dans le secteur automobile (séparation ABS/PC du PVC), dans le domaine des bouteilles (séparation PVC,PET). A partir de gisements de matières de granulométrie homogène comprise entre 0,1 et 6 mm, les taux de pureté des matières séparées peuvent atteindre 99 %, avec une efficacité de séparation de l'ordre de 98 %. L'appareil proposé est donné sur la figure n° 29.

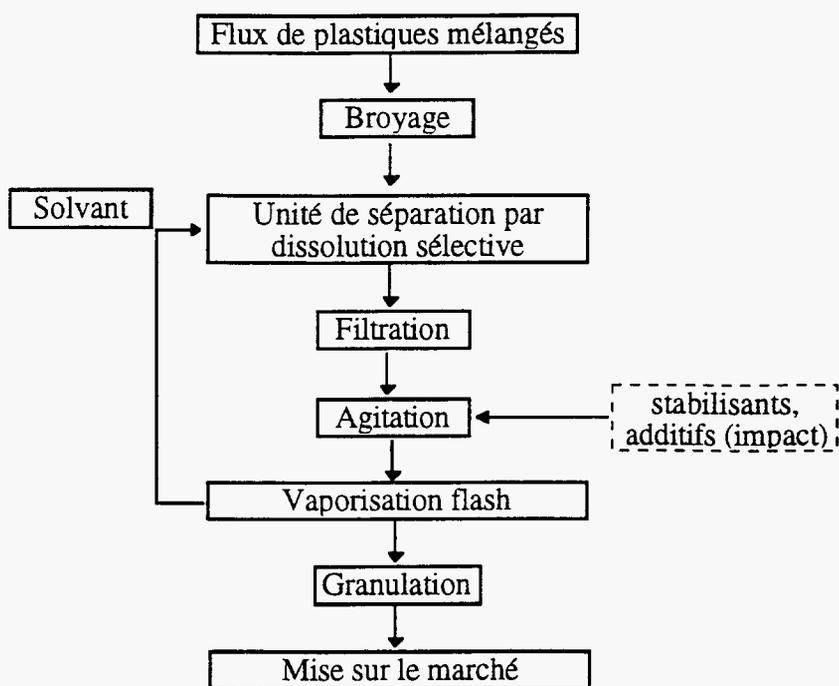
L'investissement matériel de ce procédé varie de 1 MioF à 3 MioF, selon le nombre de séparations à effectuer et les capacités à traiter.

Les sociétés **Kali und Salz** et **Carpco** proposent des procédés similaires, déjà appliqués au niveau industriel pour la séparation des corps creux ménagers : se reporter au chapitre "Applications : Déchets ménagers".

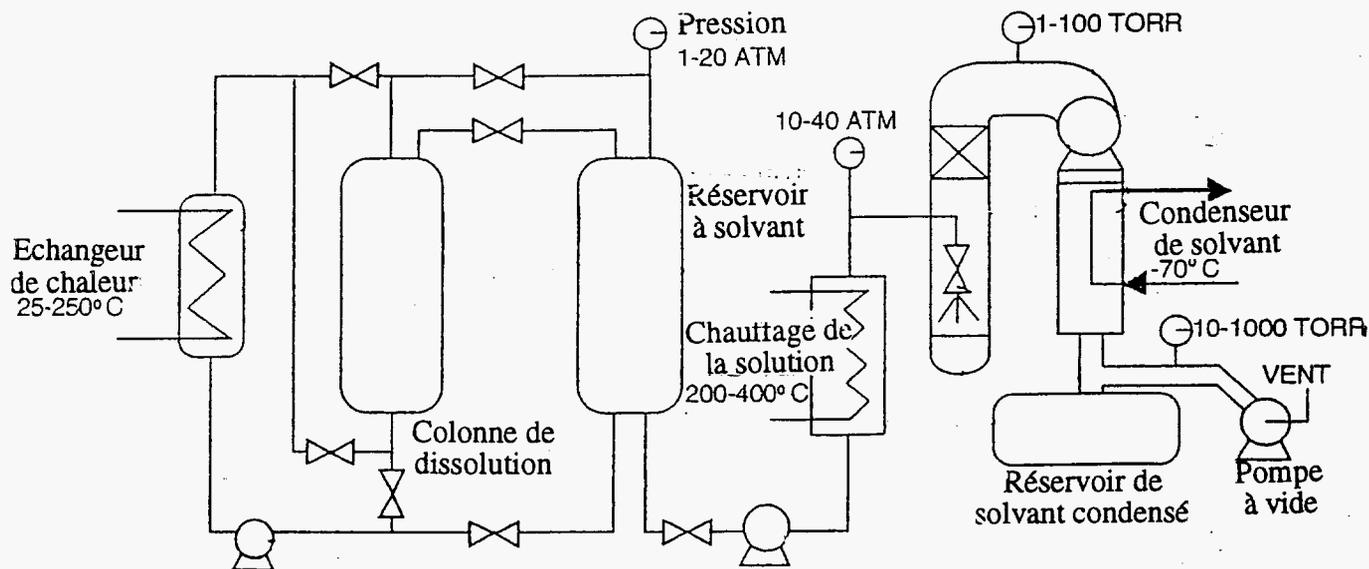
Un institut suisse <sup>(25)</sup> a réalisé des travaux sur la séparation de mélange PE/PVC sous forme de poudre ( $\varnothing$  150  $\mu$ m) par tri électrostatique utilisant aussi la mise en charge par triboélectricité. Les particules sont mises en suspension dans un flux d'air et l'ensemble particules - air est envoyé dans la chambre de chargement par triboélectricité (cyclone) ; puis les particules chargées sont soumises à un champ électrique non uniforme et séparées.

Les études menées tendent à montrer que le PE peut être récupéré avec une pureté supérieure à 97 %, mais les paramètres tels que la force du champ électrique, le taux d'humidité relative et l'accélération du flux d'air ont une influence très importante sur la séparation et doivent encore être optimisés.

**Schéma de traitement**



**Figure n° 30 (a) : Traitement par dissolution sélective (RPI)**



**Figure n° 30 (b) : Pilote de traitement par dissolution sélective (RPI)**

**10 - Dissolution sélective <sup>(2, 26-36)</sup>**

<i>Matières entrantes</i>	<i>Caractéristique du procédé</i>	<i>Matières sortantes</i>	<i>Stade d'avancement</i>	<i>Gamme de débits</i>	<i>Prix</i>	<i>Réf. adresse</i>
déchets broyés fins (<10 mm), secs et propres	- efficacité : > 95% - limites d'utilisation : manipulation de solvants	- pureté : jusqu'à 99 %	Laboratoire et R&D	—	Investissement et fonctionnement assez onéreux	5, 27, 82

Propriétés utilisées : dissolution des polymères dans des solvants spécifiques

Définition : La technique de séparation des matières plastiques par dissolution sélective s'appuie sur les possibilités de mise en solution de ces matières dans des solvants organiques et à des températures spécifiques pour chacune d'elles. *Développement de procédés de tri et sur-tri.*

Cette technique permet de séparer progressivement chacune des matières plastiques composant un mélange par dissolution sélective d'un de ces composants suivant les étapes suivantes <sup>(2, 26)</sup> :

- 1) broyage fin et lavage (si nécessaire) des matières plastiques à séparer
- 2) dissolution d'un des composants dans un minimum de solvant A, avec un maximum d'efficacité
- 3) filtration sous pression de la solution pour séparer les composants insolubles
- 4) récupération du composant extrait soit par évaporation du solvant A, soit par précipitation de ce dernier en présence d'un non-solvant B
- 5) filtration, lavage et séchage du composant précipité

Ce cycle est à renouveler autant de fois qu'il y a de matières plastiques différentes dans le mélange. Le taux de pureté peut atteindre plus de 99 % par fraction.

La difficulté de cette technique réside dans les critères suivants :

- le choix du solvant permettant l'extraction sélective d'un des composants des matériaux
- la précipitation du polymère extrait sous une forme acceptable (poudre, par exemple)
- la récupération totale à la fois du polymère extrait, mais aussi des solvants et non-

### solvants utilisés

De nombreux travaux à l'échelle du laboratoire ont permis de sélectionner des couples solvant / non solvant spécifiques à certaines matières <sup>(27)</sup>, comme ceux proposés dans le tableau suivant :

Matières	Solvant/Non solvant	Température
PVC	cyclohexanone / n-hexane	75 °C
PS	toluène / eau	35 °C
PEbd	toluène / acétone	85 °C
PEhd	toluène / acétone	110 °C
PP	xylène / acétone	135 °C
PMMA	toluène / n-hexane	50 °C

### Tableau représentant les couples solvant / non-solvant de certaines matières plastiques

La séparation des matières plastiques présentes dans un mélange peut donc s'effectuer soit en utilisant un solvant spécifique par type de matière à extraire (exemple : tableau ci-dessus), soit en utilisant le même solvant à des températures différentes <sup>(28-30)</sup>, par exemple le THF.

Des étapes de dissolution sélective peuvent aussi être réalisées en aval d'un traitement classique (ex. : flottation, classificateur à air) afin d'enrichir chacune des fractions à séparer de manière à utiliser la technique de la dissolution sélective dans le seul intérêt d'enlever les impuretés résiduelles <sup>(31, 32)</sup>.

Des études ont aussi été menées en Suède <sup>(33)</sup> utilisant des systèmes de dissolution / reprécipitation avec un couple de solvants immiscibles (ex. : solvant chloré, hydrocarbures aliphatiques et eau froide). La reprécipitation du polymère extrait est réalisée dans l'eau, ce qui permet d'obtenir des granulés facilement récupérables et séchés, sans résidu de solvant organique.

Le **Rensselaer Polytechnic Institute** (R.P.I.) <sup>(28-30, 34, 35)</sup>, qui a initié de nombreuses recherches dans ce domaine, propose, dans un brevet de 1994 <sup>(34)</sup>, l'organigramme de traitement par dissolution sélective général (figure n° 30a), incluant une proposition de pilote industriel (figure n° 30b).

**Cornell University**, aux USA, mène aussi de nombreuses études sur la dissolution sélective <sup>(36)</sup>.

Cependant, toutes ces techniques de dissolution sélective restent à ce jour à l'échelle semi-industrielle, essentiellement pour des raisons technique (difficulté à récupérer des polymères totalement exempts de solvant), financière (les coûts de traitement demeurent assez élevés) et environnementale (l'utilisation de solvant est de plus en plus réglementée et limitée dans le milieu industriel).

**11 - Tri par détection <sup>(37-69)</sup>**

<i>Matières entrantes</i>	<i>Caractéristique du procédé</i>	<i>Matières sortantes</i>	<i>Stade d'avancement</i>	<i>Gamme de débits</i>	<i>Prix</i>	<i>Réf. adresse</i>
Pièces entières ou broyées, état de surface propre	Identification par type de résine, par couleur, par forme, par présence d'halogénés	pureté : de 95 à 99,9 %	Industriel et R&D	De 100 Kg à 1 T/h	De 250 kF (manuel) à plusieurs MF (ligne automatisée)	1,2,7,16, 20,21,32, 37,40,56, 57,60,63, 66,69,70, 72,80,91, 93,94,102

Les techniques de séparation par détection se font en deux, voire trois étapes :

- 1<sup>ère</sup> étape : singulation (si nécessaire) des objets
- 2<sup>ème</sup> étape : détection
- 3<sup>ème</sup> étape : séparation / éjection

La détection n'est donc qu'une étape intermédiaire dans la séparation des matières plastiques. Elle peut intervenir en tant qu'aide au tri manuel (c'est le cas notamment dans les unités de démontage), mais les techniques de détection se sont surtout développées pour permettre l'automatisation des unités de tri.

En théorie, il paraît facile d'identifier les plastiques car chacun d'entre eux présente des caractéristiques qui lui sont propres. Cependant, dans la plupart des cas, les matières plastiques comportent des additifs et/ou charges qui modifient les réponses dans les différentes techniques de détection. Le tableau de la figure n° 31 rassemble les particularités de chaque technique, présentée plus en détail dans la suite du rapport.

Les technologies de détection qui ont été développées à ce jour s'applique dans le cadre de procédés de tri et de sur-tri.

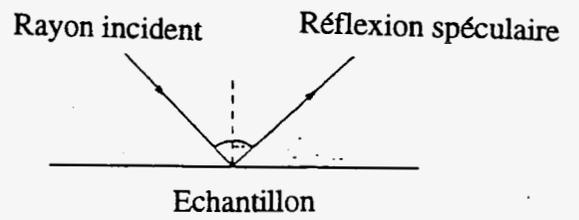
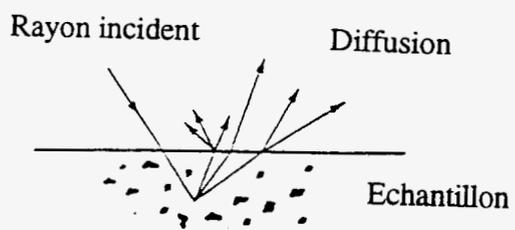


Figure n° 32 : Analyses Infrarouges

**Figure n° 31 : Tableau comparatif des principales techniques d'identification**

<b>Techniques d'identification</b>	<b>Pénétration dans l'échantillon</b>	<b>Sensibilité à la qualité de surface</b>	<b>Analyse d'échantillons noirs</b>	<b>Technique destructive</b>	<b>Stade d'avancement</b>
<b>FT NIR</b>	non	faible	non	non	commercial
<b>FT MIR</b>	non	importante	oui	non	commercial
<b>FT R</b>	faible (qqs nm)	importante	non	non	laboratoire
<b>Py - IR</b>	oui	non	oui	oui	laboratoire
<b>IRLT</b>	non	non	oui	non	développement
<b>LIESA (visible)</b>	oui	non	oui	oui	développement ?
<b>Sliding Spark Spectroscopy</b>	non	non	oui	non	développement (prototype)
<b>Py-MS</b>	oui	non	oui	oui	laboratoire
<b>Rayons X</b>	oui (?)	oui	?	non	commercial
<b>Ultrasons</b>	non (?)	non	oui	non	laboratoire
<b>Optique</b>	non	non	-	non	commercial
<b>Traceurs chimiques + UV</b>	non	non	oui	non	recherche (prototype)

Voici, présentées de façon plus détaillée, les techniques de détection les plus fréquemment impliquées dans la séparation des matières plastiques.

### **1) la spectroscopie Infrarouge (IR)<sup>(37-48)</sup>**

C'est la technique la plus couramment utilisée pour l'identification des plastiques. Elle est basée sur la détection des vibrations de certaines liaisons chimiques à des fréquences caractéristiques (présence de groupes fonctionnels spécifiques à chaque polymère), suite à une excitation par rayons IR. Le spectre IR obtenu est alors une empreinte spécifique à chaque type de polymères.

Ces analyses IR sont réalisées soit par transmission (analyse des rayons IR transmis par l'échantillon), soit par réflexion (analyse des rayons IR réfléchis par l'échantillon) qui peut être diffuse ou spéculaire (voir figure n° 32).

Selon les longueurs d'ondes balayées par le spectromètre IR, on distingue les techniques suivantes :

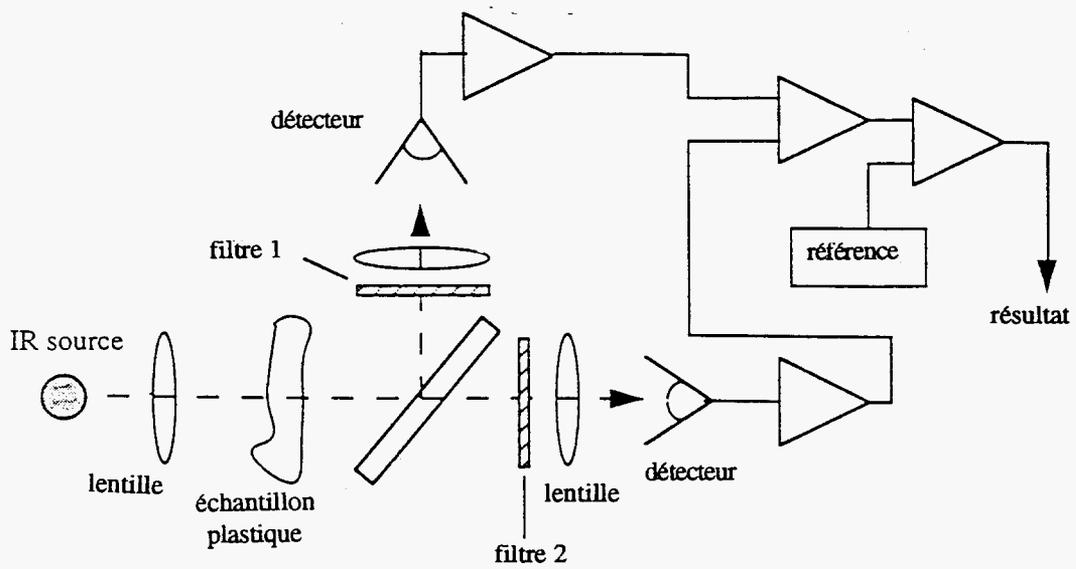


Figure n° 33 : Principe de détection IR (transmission)

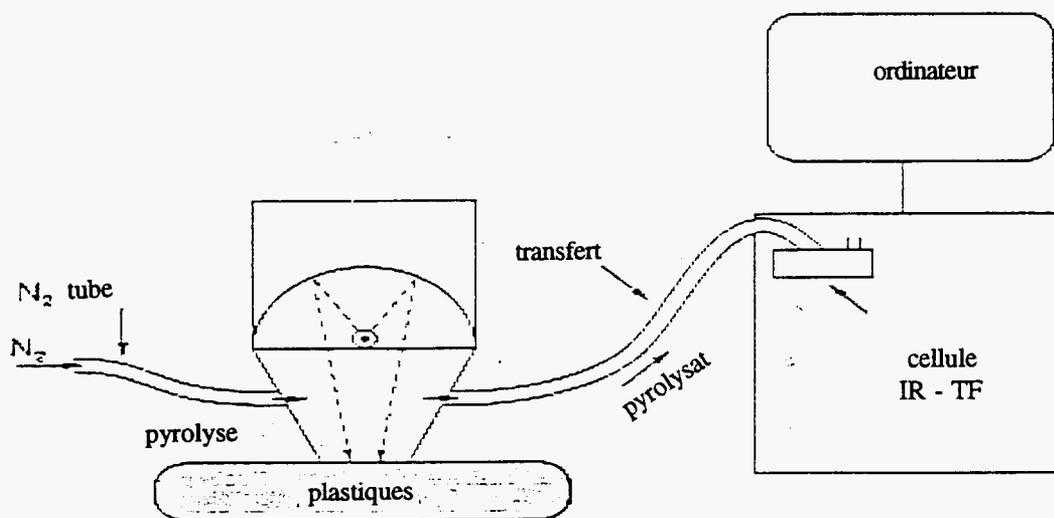


Figure n° 34 : Pyrolyse IR

- Infrarouge (**IR**) de 14 000 à 400  $\text{cm}^{-1}$  (= 0,7 à 25  $\mu\text{m}$ )
- Proche Infrarouge (Near-Infrared - **NIR**) : de 12 500 à 4 000  $\text{cm}^{-1}$  (= 0,8 à 2,5  $\mu\text{m}$ )
- Moyen Infrarouge (Mid-Infrared - **MIR**) : de 4 000 à 400  $\text{cm}^{-1}$  (= 2,5 à 25  $\mu\text{m}$ )

Les systèmes d'exploitation du signal sont basés sur des calculs mathématiques complexes, et on parle alors d'Infrarouge à Transformée de Fourier (**IRTF**).

La figure n° 33 illustre le principe de fonctionnement par détection IR en transmission, de façon générale <sup>(49)</sup>.

#### \* Limites de détection en transmission / réflexion diffuse / réflexion spéculaire

⇒ IRTF en réflexion diffuse <sup>(37, 39, 40)</sup> : c'est une analyse de surface très utilisée pour les échantillons opaques (surfaces légèrement abrasées pour retirer les pellicules de surface). Ces analyses sont réalisées soit sur une poudre déposée sur un papier abrasif, soit à partir de films fins ou de fibres. Les surfaces analysées doivent être planes et lisses (pénétration du rayon de quelques nanomètres).

⇒ IRTF en réflexion spéculaire <sup>(37, 39)</sup> : cette technique permet l'analyse de tous types de polymères et alliages de polymères, et reste la plus répandue pour l'identification des matières plastiques. Les surfaces analysées doivent être abrasées (si des vernis ou peintures sont présents), et plus ou moins lisses.

⇒ IRTF en transmission <sup>(37)</sup> : cette technique s'applique pour des échantillons de matières plastiques très fins (épaisseurs de l'ordre du micromètre), faiblement chargés et colorés, afin que les rayons IR puissent être transmis à travers l'échantillon. Cette technique demeure très efficace mais elle ne peut être utilisée qu'au niveau laboratoire, de par les contraintes d'échantillonnage et de préparation qu'elle nécessite.

#### \* Limites de détection NIR / MIR

⇒ MIR <sup>(39, 41, 42)</sup> : cette technique permet d'analyser les polymères et les alliages de polymères de toutes les couleurs (même noirs), les polymères chargés, les surfaces analysées peuvent être rugueuses. Cette technique est plus facile d'utilisation et moins coûteuse que la spectroscopie NIR. Cependant, les temps de réponse sont plus longs qu'en NIR.

⇒ NIR <sup>(42, 49)</sup> : cette technique permet d'analyser les échantillons colorés et opaques (sauf les noirs), à partir de tous types de surfaces. Cette technique demeure moins sensible aux pollutions de surface que le MIR, les rayons X et la pyrolyse IR (ces deux techniques sont décrites ci-après).

## **2) La pyrolyse Infrarouge (Py-IR)** <sup>(38)</sup>

Cette technique utilise un laser (ou toute autre source d'énergie concentrée) pour produire un gaz, par pyrolyse de la matière plastique. Ce gaz, caractéristique de la matière plastique, est ensuite analysé par spectroscopie infrarouge. La figure n° 34 illustre le principe de cette technologie de détection.

Cette technique permet l'analyse des revêtements de surface. Elle nécessite donc, dans le cas de l'identification de matières plastiques ayant un revêtement, soit une étape d'abrasion de surface (afin d'analyser la matière plastique et non pas le dépôt), soit une seconde pyrolyse localisée sur le même point de l'échantillon (pour analyser la résine ayant perdu le revêtement lors de la première pyrolyse).

## **3) La spectroscopie Raman** <sup>(38, 41, 50, 51)</sup>

Cette technique est très proche de l'IR, mais elle permet la détection de liaisons chimiques différentes, et donc de groupes fonctionnels différents.

Cette technique de détection permet l'analyse d'échantillons plus ou moins volumineux (plastiques broyés, par exemple), faiblement colorés (les fortement colorés donnant des résultats insatisfaisants), les échantillons noirs ne pouvant pas être analysés. Cette technique est moins sensible à l'état de surface des échantillons que la technologie MIR (pénétration des rayons de quelques mm en profondeur).

Cependant, la spectroscopie Raman est peu appliquée dans le cadre de la séparation des matières plastiques car elle demeure très onéreuse et ne permet pas à ce jour l'analyse rapide des pièces plastiques.

## **4) La spectroscopie dans le visible (VIS)** <sup>(38, 53, 54)</sup>

Cette technique est basée sur l'exposition de produits à des radiations dont les longueurs d'ondes se situent dans le domaine des UV ou du visible (entre 200 et 800  $\mu\text{m}$ ), génère l'excitation d'électrons, donnant ainsi une réponse caractéristique de chaque matériau (un signal lumineux est récupéré et analysé par un réseau d'analyseurs optiques).

Cette excitation peut être provoquée soit par un rayon-laser, on parle alors de "Laser Induce Emission Spectroscopy - LIESA" <sup>(53)</sup>, soit par ionisation ou "Sliding Spark Spectroscopy" <sup>(54)</sup>.

## **5) La fluorescence X** <sup>(38, 55)</sup>

L'analyse par fluorescence X permet la détection particulière d'atomes présentant l'aptitude à fluorescer. Cette technique met en évidence la présence d'halogènes (Cl, Br, F, I) à l'échelle de l'atome, et non plus de la molécule comme l'IR. La séparation basée sur cette technologie est alors du type chloré/non chloré.

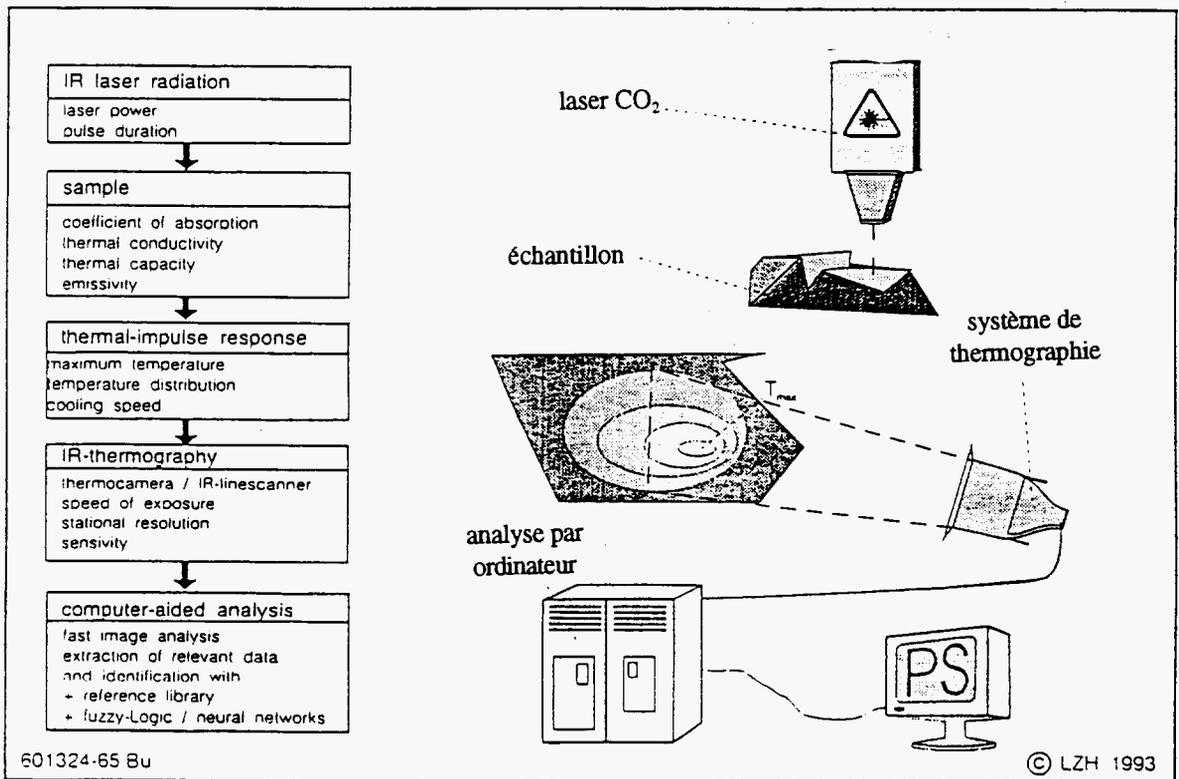
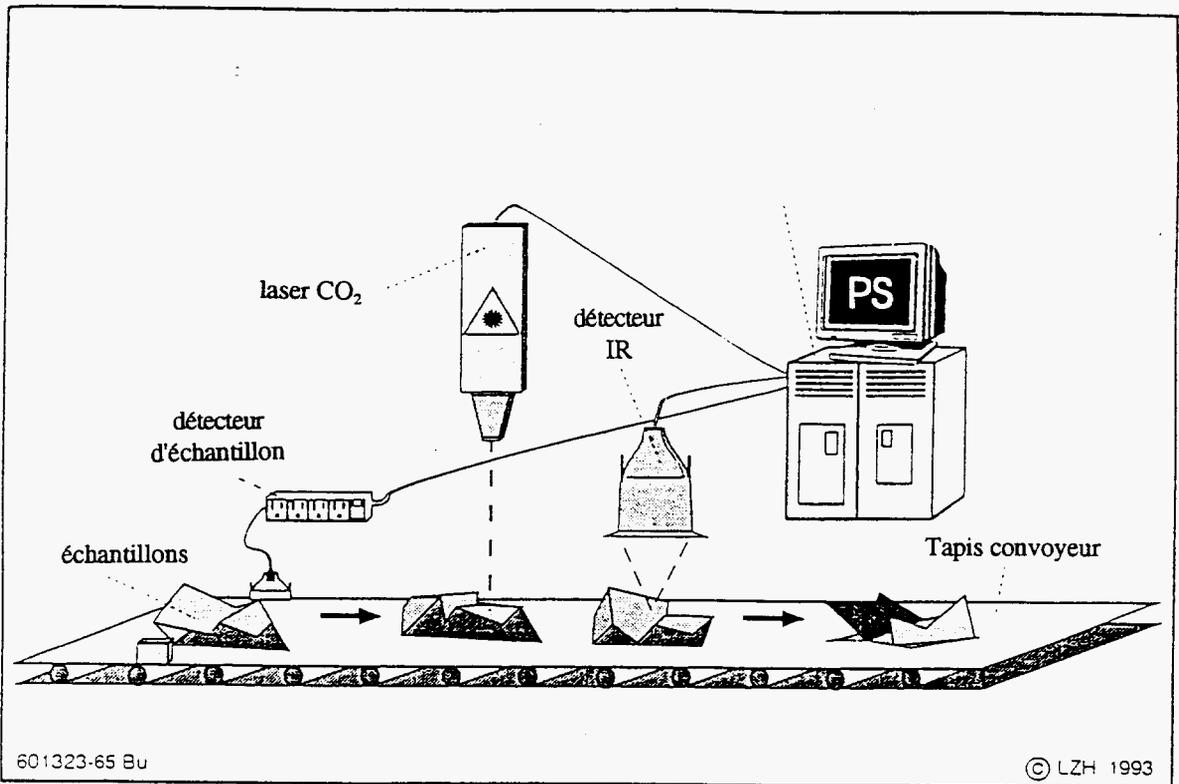


Figure n° 35 : Principe de détection IRLT

## **6) La thermographie IR par impulsion à laser (IRLT) <sup>(38, 56, 57)</sup>**

Cette technique se base sur les propriétés thermiques et optiques des plastiques lors d'une élévation de température. Les plastiques sont chauffés par des rayons laser à CO<sub>2</sub> et il y a émission d'un gradient de température caractéristique de chaque type de plastique. Le principe de la détection IRLT est schématisé sur la figure n° 35.

## **7) L'analyse par ultrasons <sup>(58)</sup>**

Cette technique est basée sur la mesure de l'atténuation des ultrasons sur une plage donnée de fréquences sonores (calquée sur les appareils de diagnostic médical). L'analyse de ces propriétés aux ultrasons est assurée par un système totalement informatisé, avec comparaison des spectres obtenus à des banques de données spectrales. Cela correspond à une analyse de l'écho renvoyé par la matière, signal qui est donc caractéristique de chaque matière.

Mais cette technique demeure au stade de l'étude en laboratoire, car l'explication, et de ce fait l'exploitation, des signaux obtenus est très difficile.

## **8) Le tri optique <sup>(59-61)</sup>**

Le tri optique est basé sur la reconnaissance des pièces plastiques par leur forme, leur couleur, leur transparence ou encore leur opacité. Une caméra saisit l'image de chaque objet et le compare à sa banque de donnée pour le conserver ou l'extraire. Cette analyse nécessite aussi la singulation des objets et est toujours couplé à une éjection pneumatique des parties analysées (tri binaire).

Plusieurs lectures sont possibles :

- \* caméra optique : reconnaissance de forme
- \* lumière monochromatique : détection d'une seule couleur, éjection ou conservation de tout le reste (ex. : éjection de points noirs, séparation transparent / non transparent)
- \* lumière multichromatique : différenciation des couleurs par l'utilisation d'un ensemble de détecteurs optiques
- \* lumière polarisée : cette technique permet la séparation des plastiques amorphes / cristallins. A travers les filtres de polarisation, les plastiques cristallins apparaissent opaques et les plastiques amorphes, transparents.

Le tri optique est très utilisé dans le secteur de l'agro-alimentaire et n'est pas, à ce jour, spécialisé dans celui des matières plastiques. Bien que les trois premiers types de lectures décrites ci-dessus aient débouchées sur des applications industrielles, la dernière nécessite encore des optimisations. Des développements techniques, adaptés aux déchets de matières plastiques à traiter, seront intéressants à réaliser.

### 9) La pyrolyse couplée spectroscopie de masse (Py - Ms) <sup>(38)</sup>

Cette technique est basée sur l'ionisation des molécules, par rupture de ces dernières en fragments identifiables. Un laser est alors utilisé pour pyrolyser la surface du polymère et les fragments ainsi obtenus sont analysés par spectrométrie de masse.

### 10) La détection couplée aux systèmes neuronaux <sup>(62-64)</sup>

Un cas particulier de séparation mettant en oeuvre plusieurs unités d'identification est la méthode utilisant des réseaux de neurones artificiels couplés à la spectrométrie.

Ces systèmes sont constitués de plusieurs "neurones" qui se passent les informations entre eux et ainsi identifient une matière sur une série de mesures d'une ou de plusieurs de leurs propriétés intrinsèques. Ces systèmes ne sont pas figés car ils ont la possibilité "d'apprendre" à trier en fonction de la séparation à réaliser.

Le principal avantage des systèmes neuronaux est qu'ils permettent une analyse plus rapide des matières plastiques.

Selon les caractéristiques des plastiques à analyser (transparent - opaque, coloré - incolore, ...) et la forme sous laquelle ils se présentent (pièces entières, broyats, granulés), on utilise préférentiellement l'une des techniques énoncées précédemment (une ou plusieurs détections), ou bien une combinaison de ces techniques, afin d'accroître les performances des unités de tri automatisées (Voir tableau comparatif ci-après).

Dans le choix des techniques de détection, les critères suivants sont à considérer <sup>(65)</sup> de façon systématique :

- sélectivité de la technique par rapport aux matières recherchées (possibilité d'ajouter des additifs permettant une meilleure différenciation, pièces transparentes ou opaques, pièces noires,...)
- taux de réponse = fiabilité de l'identification
- épaisseur de pénétration des rayons
- sensibilité aux facteurs pouvant perturber l'analyse (humidité, poussières, types de surface, souillures externes,...)
- facilité d'utilisation dans des unités de tri automatique

*Tous ces systèmes s'appuient sur des logiciels d'exploitation des signaux très complexes et nécessitent la mise en place de banque de données spectrales performantes et adaptées à chaque secteur d'application des polymères (les spectres références des produits automobiles seront différents de ceux des produits électriques / électroniques, eux-mêmes différents des produits ménagers,...).*

## 11) Cas particulier de détection : utilisation de marqueurs chimiques et de code barre <sup>(67-69)</sup>

**Continental Container Corporation** <sup>(67)</sup> proposait dès 1992, le concept du marquage des emballages par l'apposition d'un "étiquetage" utilisant une encre invisible détectable en spectrométrie (technique non précisée sur l'article). Ce marquage permettrait de séparer les matières par types de résines, par couleurs, par type d'additifs incorporés, ou encore par type de conteneurs. Cependant, il semblerait que cette technique apporte des investissements lourds sur chaque ligne de production d'emballages, et elle n'a pas abouti au niveau industriel.

Un brevet a été déposé par la **British Petroleum Company** <sup>(68)</sup> et concerne le marquage des polymères par l'incorporation de marqueurs chimiques fluorescents détectables dans le proche ou dans le lointain infrarouge. Les composés fluorescents peuvent être des colorants ou des terres rares, et sont additivés aux polymères avec des teneurs de l'ordre de 0,001 à 1 ppm. Le brevet préconise l'emploi d'un mélange de 2 composés fluorescents présentant des réponses avec IR différentes afin d'accroître l'efficacité de détection. Mais le couplage de deux (voire plus) composés fluorescents peuvent aussi de détecter les alliages et mélanges de polymères, en déterminant en plus la teneur en chacun des polymères. L'utilisation de filtres adaptés lors de l'acquisition du signal conduit à la reconnaissance de ces composés fluorescents et donc de la résine.

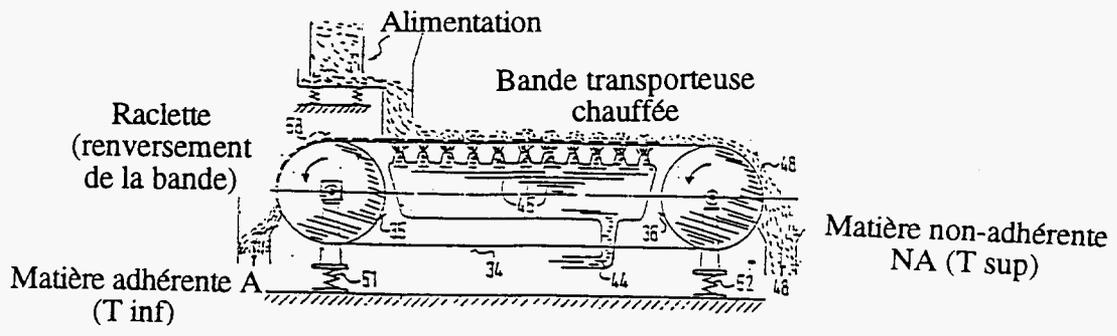
Des groupes chimiques et des laboratoires universitaires mènent des travaux de recherche sur l'incorporation de produits chimiques pouvant être détectés par spectrométrie, directement lors de la formulation des résines. Les investissements nécessaires se limitent alors aux producteurs de résines, sans engager les transformateurs finaux et les fabricants de produits finis. Cette approche semble être économiquement plus envisageable <sup>(66)</sup>.

Ces différentes études, concernant les déchets plastiques futurs, visent à démontrer la possibilité d'incorporation de traceurs chimiques ou de code barre, lors de la fabrication des pièces plastiques, qui permettraient leur reconnaissance rapide.

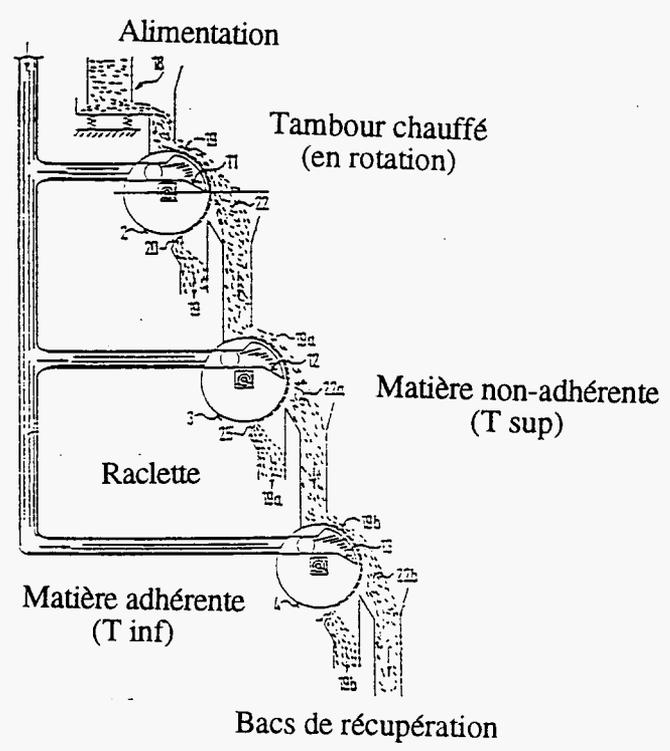
Un programme européen Brite-Euram <sup>(69)</sup>, qui s'est terminé fin 1997, explore la faisabilité de l'incorporation de colorants fluorescents comme traceurs chimiques, pendant la production de la résine, dans le but de faciliter l'identification ultérieure par spectroscopie UV. Le projet comprend en outre l'addition d'une combinaison de colorants fluorescents qui peuvent être détecté par un système binaire. Ainsi, sept colorants permettraient d'obtenir 63 combinaisons détectable dans la lumière non visible. Dans le cadre de cette étude était prévue la mise en place d'une unité pilote de détection + éjection des résines analysées. Nous ne possédons pas encore les conclusions de cette étude.

Des études de faisabilité sur l'ajout de code barre sur les produits automobiles et informatiques / bureautique sont aussi développées<sup>(67)</sup>. Cette évolution est destinée à faire le tri après démontage des pièces, et reste donc très liée à la notion de rentabilité économique du démontage.

Sous réserve de parvenir à uniformiser tout un chacun (producteurs de résines et compoundeurs pour les traceurs chimiques, transformateurs pour les codes barre), ces technologies demeurent une voie intéressante à explorer pour la séparation par identification rapide de nos futurs déchets plastiques.



(a)



(b)

Figure n° 36 (a, b) : Séparation à chaud par adhésion des particules

**12 - Tri par différence de comportement à la chaleur** <sup>(70-94)</sup>

<i>Matières entrantes</i>	<i>Caractéristique du procédé</i>	<i>Matières sortantes</i>	<i>Stade d'avancement</i>	<i>Gamme de débits</i>	<i>Prix</i>	<i>Réf. adresse</i>
déchets broyés (< 10mm), état de surface propre	différence de T <sub>transformation</sub> entre matières > à 15-20°C	pureté > à 99 %	R&D et industriel	inférieurs à 1T/h	De 250 à 500 kF (pour des débits de 0,5T/h en extrusion-filtration)	9, 10, 12, 14, 35, 41, 42, 45, 52, 54, 95, 104

Différentes techniques de séparation se basent sur la différence de tenue à la chaleur des matières plastiques. Chaque matière plastique présente sa propre plage de température de mise en oeuvre. Si un mélange de déchets de matières plastiques se compose de matières ayant des températures de transformation suffisamment distinctes (de l'ordre de quelques dizaines de °C), elles peuvent être séparées par un procédé thermique. On trouve ainsi plusieurs procédés :

1) procédé par bande transporteuse chauffée <sup>(70-72)</sup> (ou par adhésion des particules sur une bande chauffante). *Sur-tri*.

Ce procédé est basé sur le passage des mélanges de matières plastiques sur une bande transporteuse chauffée qui provoque le ramollissement du composé ayant la plus faible température de mise en oeuvre et son adhérence sur cette même bande. Le second composé restant intact, il est simplement récupéré par un renversement de la bande.

Le schéma de fonctionnement est présenté sur les figures n° 36 a/b.

2) procédé par auto-échauffement et agglomération <sup>(73, 74)</sup>. *Tri et sur-tri*.

Le mélange de plastiques subit un auto-échauffement jusqu'à une température suffisante pour agglomérer le plastique ayant la plus faible température de mise en oeuvre. La taille des particules du plastique aggloméré augmentant, une opération de tamisage après refroidissement permet la séparation des composants.

3) procédé par extrusion-filtration <sup>(75-81, 84-94)</sup>. *Sur-tri*.

Ce procédé ne peut être appliqué que dans le cas de gisements de matières plastiques peu souillés (moins de 1 %). Lors de l'élévation de température en extrusion, la matière plastique ayant la plus faible température de mise en oeuvre se plastifie. Les autres plastiques ou contaminants présents restant intacts sont alors retenus sur un filtre métallique d'ouverture

de maille plus ou moins fine et éliminés, tandis que la matière plastique filtrée est récupérée en sortie de filière.

Différentes technologies de filtration existent, allant des systèmes manuels simples discontinus aux systèmes continus, autonettoyants, automatiques et régulés par la pression en tête de vis. Ces différentes techniques seront traitées ultérieurement.

#### 4) procédé par séparation centrifuge à l'état fondu <sup>(82)</sup>

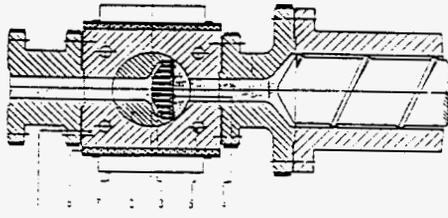
Ce procédé est basé sur les différences de températures de transition vitreuse ( $T_g$ ) et de température de fusion ( $T_f$ ) pour les polymères cristallins, entre les matières plastiques, ainsi que leur différence de viscosité à l'état fondu.

Un mélange de polymères est chauffé à une température supérieure aux  $T_g$  et  $T_f$  correspondantes au polymère pour lequel ces températures sont les plus hautes, mais inférieures à la température de dégradation de chacun des polymères présents. Le mélange "fondu" est soumis à une force gravitationnelle importante (par exemple par centrifugation), ce qui permet d'obtenir les polymères séparés par couches, sans adhésion entre elles. En effet, les polymères ayant une viscosité à l'état fondu qui leur est propre, la force centrifuge va entraîner la migration plus ou moins rapide de ces derniers, d'où une structure finale en "strates" ou couches séparées.

Cette technique peut être appliquée aux divers polymères courants et techniques tels les PE, PET, PP, PVC, Nylon, Polyesters, ...

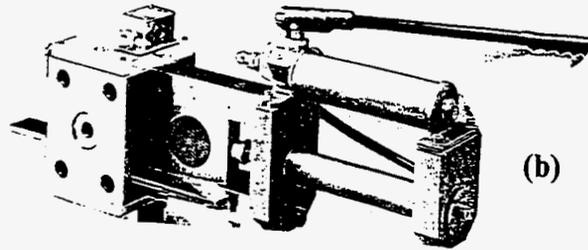
#### 5) procédé d'extrusion mettant en application la différence de viscosité à l'état fondu <sup>(83)</sup>

Ce procédé s'appuie sur la séparation de phase à l'état fondu qui s'opère lors des transformations par extrusion monovis lorsque deux polymères (ou plus) en mélange ont des viscosités à l'état fondu différentes. Le composé le plus fluide migre sur les bords du jonc extrudé et forme une "enveloppe", tandis que le composé le plus visqueux se concentre au "cœur" du jonc. Il se crée alors une structure enveloppe / noyau qui peut être séparée en deux fractions par l'utilisation d'une filière spéciale (voir Chapitre "Applications - Moquettes"). Cela peut aussi conduire à la fabrication de fibres bicomposants avec un composant au cœur enveloppé d'un second composant à l'extérieur.



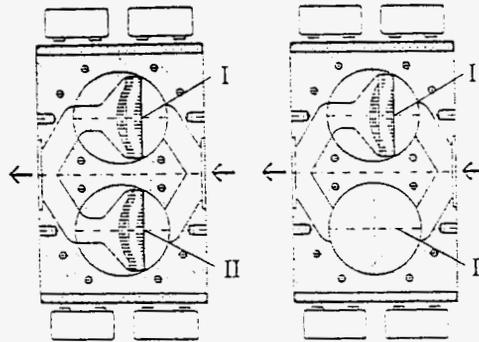
1 bâti ou Changeur de n°s; 2 piston d'arrêt; 3 blocs support portées; 4 jeu de tôles de filtration; 5 cartouche de charge; 6 blocs isolants; 7 colle de jonction électrique

(a)

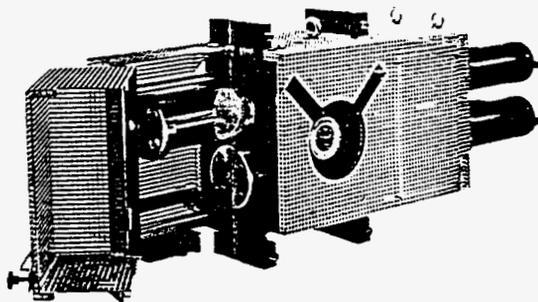


(b)

Figure n° 37 (a,b) : Filtres traditionnels à tiroir coulissant



(a)



(b)

Figure n° 38 (a, b) : Filtres continus à double tiroir coulissant WILMAN

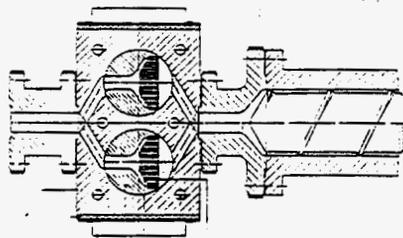


Figure n° 39 : Filtres continus à double tiroir coulissant KREYENBORG

→ **Cas particuliers : l'extrusion / filtration** <sup>(84-94)</sup>

Les procédés de filtration appliqués en extrusion connaissent des développements techniques importants, car cette opération permet de produire des granulés de matières plastiques régénérées de haute pureté <sup>(84, 85, 94)</sup>.

Il faut cependant noter que cette opération, facteur limitatif de la cadence de production, n'est utilisée que dans le cas de la granulation de produit de haute qualité, ayant un taux d'impuretés inférieur à 0,5 - 1 %.

L'extrusion / filtration est une étape de purification ultime de la matière, qui n'est justifiée que pour des débouchés nécessitant de très hauts degrés de pureté. Outre la séparation de matières plastiques, présentant des différences de température de transformation satisfaisantes, entre elles, elle permet l'extraction de résidus de papier, d'aluminium, pouvant être présents dans divers gisements.

Il existe de multiples techniques de filtration à l'état fondu, et de nombreux fournisseurs se sont spécialisés dans ce domaine. Les principaux systèmes de filtration actuellement utilisés en milieu industriel sont :

1) les filtres traditionnels à tiroir coulissant (Axon AB, Beringer, BD Plast, Gemini) <sup>(86, 87)</sup>

La matière passe à travers un bloc de filtration, en sortie d'extrudeuse, qui est muni d'un tiroir coulissant avec deux grilles supportant les filtres métalliques. Quand un filtre est colmaté, le tiroir coulisse et le filtre métallique souillé est changé manuellement. Cette technique de filtration est discontinue et n'est pas applicable pour des gisements très souillés qui nécessitent une fréquence de changement de filtre élevée. Les figures n° 37 a/b illustrent cette catégorie de filtres.

2) les filtres continus à double tiroir (Kreyenborg, Trendelkamp, Wil-Man) <sup>(88-90)</sup>

Basée sur un principe similaire à la filtration traditionnelle, cette technique a l'avantage de permettre une filtration en continu de la matière fondue par un changement de filtre sans arrêt de l'extrusion. Dans certain cas, l'autonettoyage du filtre est possible, par envoi d'une petite quantité de matière à reflux et extraction des impuretés (= changeur de filtre à reflux). Ces filtres sont représentés sur les figures n° 38 a/b et n° 39.

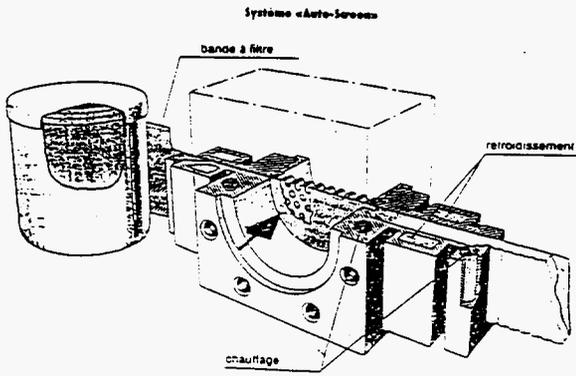
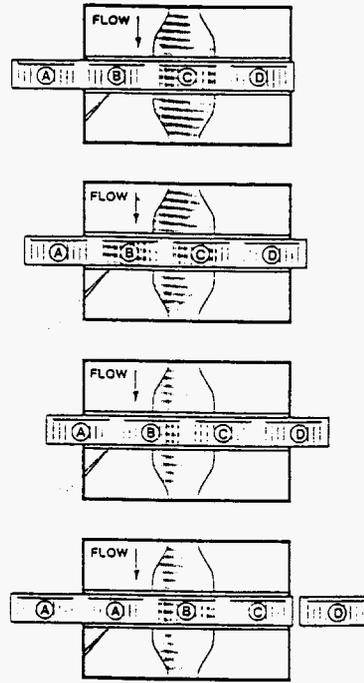


Figure n° 40 : Filtre continu à bandeau déroulant Autoscreen



1 Unit in Normal Mode.  
 "A" Block is in ready position.  
 "B" Block is in pre-heat position.  
 "C" Block is in filtering position.  
 "D" Block is in dirty position.

Figure n° 41 : Filtre continu à bloc Gemini

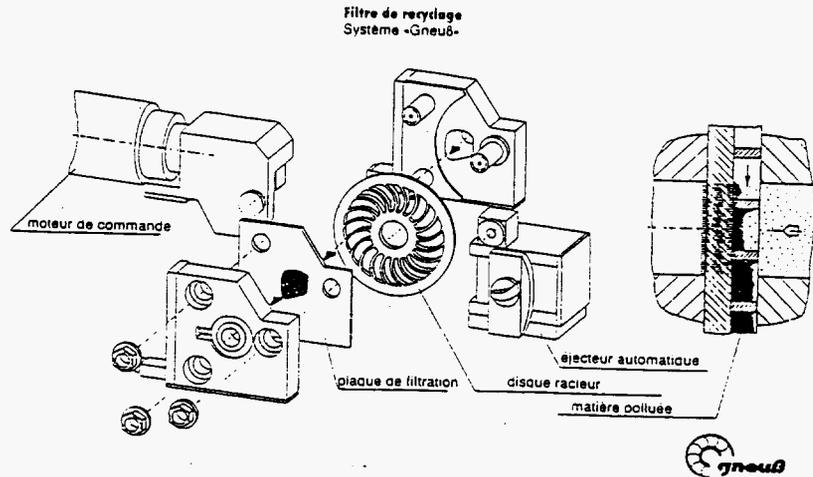
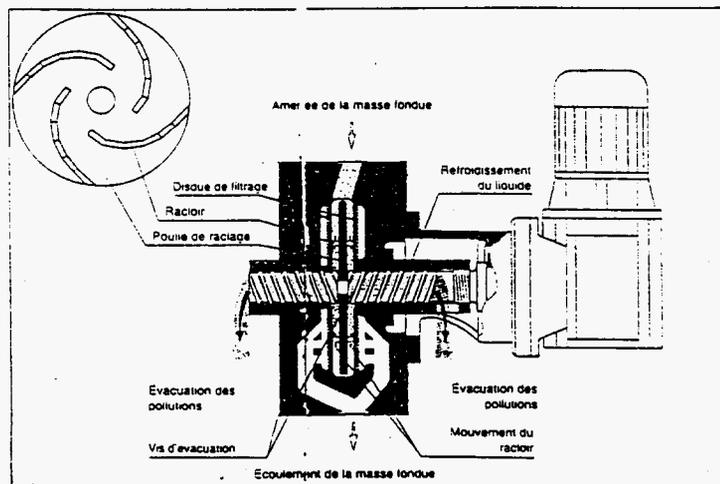


Figure n° 42 : Filtre continu à racloir Gneuß



Filtres nettoyés par raclage continu, schéma de fonctionnement d'un changeur de filtres Laser.

Figure n° 43 : Filtre continu à racloir Erema

3) les filtres continus à bandeau déroulant (Autoscreen, Hitech, Key-Filters) <sup>(91)</sup>

Un bandeau métallique filtrant, placé en sortie d'extrudeuse, se déroule en continu. Les impuretés retenues restent collées sur le filtre et sont extraites avec le filtre usé. Un exemple de filtre à bandeau déroulant est donné sur la figure n° 40.

4) filtres continus à blocs (Gemini) <sup>(87)</sup>

La matière fondue passe à travers un des filtres positionnés sur des blocs distincts. Ces blocs couissent lentement et permettent le changement des filtres dès le colmatage, en intégrant une phase de pré-remplissage qui évite l'arrêt de l'extrusion. Cette technique est schématisée sur la figure n° 41.

5) filtres continus à racloir (Erema, Gneuß) <sup>(92, 93)</sup>

La matière fondue passe à travers un filtre fixe. Un racleur rotatif vient ôter les impuretés déposées à la surface du filtre et les évacue en continu. Cette technique est adaptée pour la filtration des matières présentant de grosses impuretés ou un taux d'impuretés élevé.

Les deux technologies Gneuß et Erema sont illustrées sur les figures n° 42 et n° 43.

Le filtre à laser Erema admet jusqu'à 5 % de souillures ; il convient donc aux matières fortement souillées (notamment par des fibres de papier, de bois, des résidus d'aluminium, de cuivre)

6) filtres continus rotatifs ( Beringer, Gneuß) <sup>(86, 92, 93)</sup>

La matière fondue passe à travers un filtre métallique en rotation lente. Une portion du disque est positionnée dans une zone de purge où une faible quantité de matière propre est envoyée à reflux. Le filtre est ainsi nettoyé en continu. Ce sont des changeurs de filtres à reflux (voir figures n° 44 et n° 45 a/b).

Dans le cas particulier du système de filtration Gneuß (figures n° 45 a/b), le disque filtrant est divisé en portions qui peuvent être enlevées et remplacées sans arrêt de l'extrusion (il n'est ici pas nécessaire de retirer tout le filtre).

NB : l'utilisation de filtres à reflux implique une perte de matière de l'ordre de 3 % lors de l'extrusion / filtration, utilisés pour le reflux.

Le coût moyen d'une opération de filtration à l'état fondu est de l'ordre de 35 à 50 centimes du kilo.

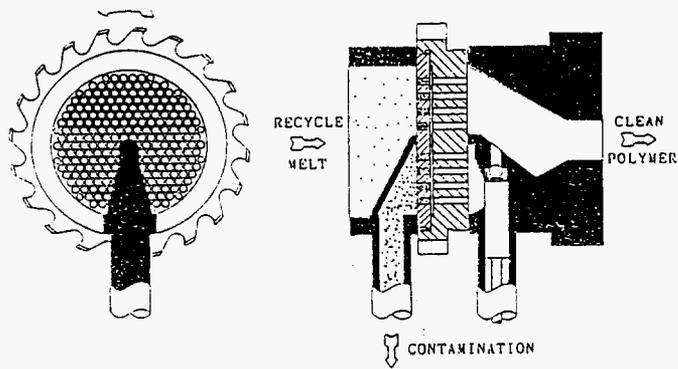


Figure n° 44 : Filtre continu rotatif Beringer

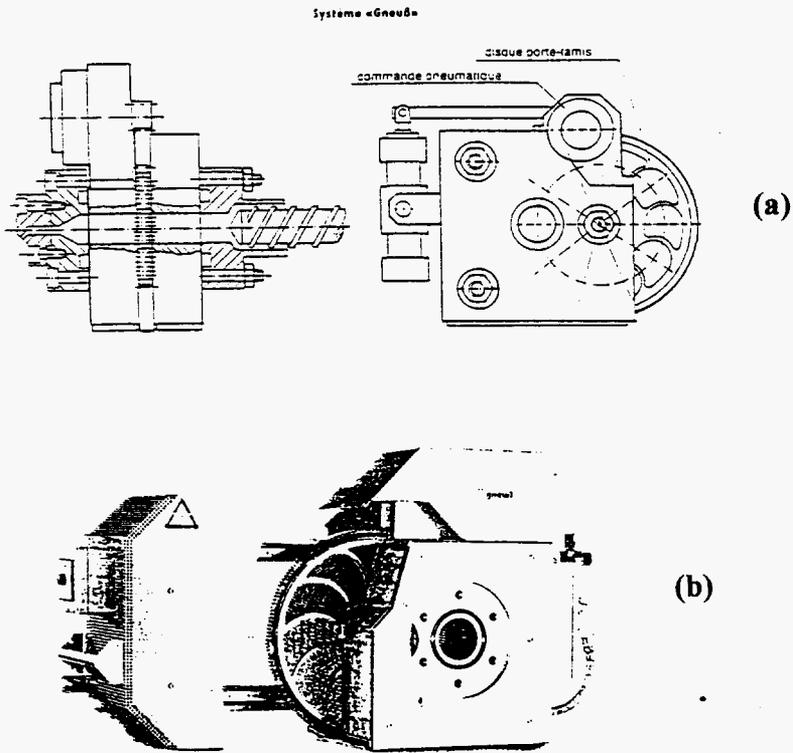


Figure n° 45 (a,b) : Filtre continu rotatif Gneuß

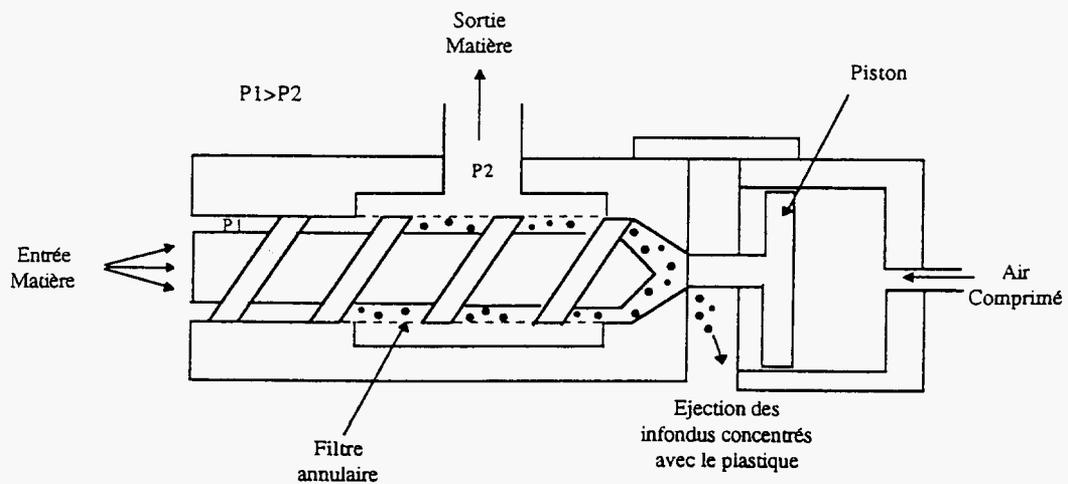


Figure n° 45 bis : Principe de filtration SCAMIA

Remarque : dans de nombreux cas, l'extrusion de matières souillées nécessite une double filtration, la première permettant de retirer les contaminants les plus importants et la seconde les plus fins (notamment les pigments, les encres). Une pompe à engrenage intermédiaire est alors souvent nécessaire. Industriellement, les filtrations sont réalisées le plus souvent à 80 µm.

7) cas particulier d'extrusion-filtration : le procédé Scamia <sup>(93bis)</sup>

La sortie de l'extrudeuse peut être équipée d'un séparateur de solides qui fonctionne en continu, ce qui permet d'extraire du mélange les infondus, les métaux, les corps étrangers... , de taille supérieure à 2 mm.

Un filtre annulaire est positionné sur le dernier tronçon de la vis d'extrusion. La matière plastique fondue passe à travers ce filtre pour sortir perpendiculairement à la vis d'extrusion, les infondus restant piégés au niveau de la vis avant d'être éjectés ponctuellement par une purge en tête de vis. Le schéma n° 45 bis illustre ce procédé.

A ce jour, seulement deux unités d'extrusion-filtration Scamia ont été commercialisées.

**APPLICATION :**

**A -DECHETS MENAGERS / CORPS CREUX**

<b>APPLICATION :</b> <b>A -DECHETS MENAGERS / CORPS CREUX</b>
--

La valorisation des emballages plastiques issus des déchets ménagers fait toujours l'objet de développements, et reste le secteur le plus étudié dans le cadre de la valorisation matière des plastiques, incluant des étapes de séparation de plus en plus sophistiquées.

Dans la présentation de ces techniques de séparation, il est intéressant de les classer selon trois catégories de procédés :

- la macro-séparation : le procédé intervient sur des éléments de tailles et de volumes importants (exemple : bouteilles, pièces démontées, ...)
- la micro-séparation : le procédé intervient sur des matières plastiques broyées
- la séparation moléculaire : le procédé intervient sur les propriétés des macromolécules constituant les plastiques (exemple : dissolution sélective).

Il est nécessaire de mentionner que l'ensemble des technologies citées s'appliquent à des gisements de déchets de plastiques ménagers issus de la collecte sélective (un premier tri à la source est effectué par les consommateurs), qui ont de plus subi pour la plupart une opération de tri (manuel ou automatique) par grande famille de corps creux.

De plus, les technologies de séparation sont optimisées sur des gisements particuliers (américains, ou allemands, ou français, ou autres), et ne sont pas immédiatement transposables au niveau international. En effet, la nature même des corps creux utilisés par chaque pays dénote de leurs habitudes de consommation et diffèrent d'un pays à l'autre.

Ainsi, chaque pays présente sa spécificité de gisements de corps creux et nécessite une adaptation des procédés.

Par exemple, aux USA, le PET est transparent et le PEhd est naturel, tandis qu'en France, ces deux matières plastiques sont colorées : les contraintes de tri ne sont donc pas les mêmes, et les procédés de séparation devront être optimisés en fonction de ces paramètres.

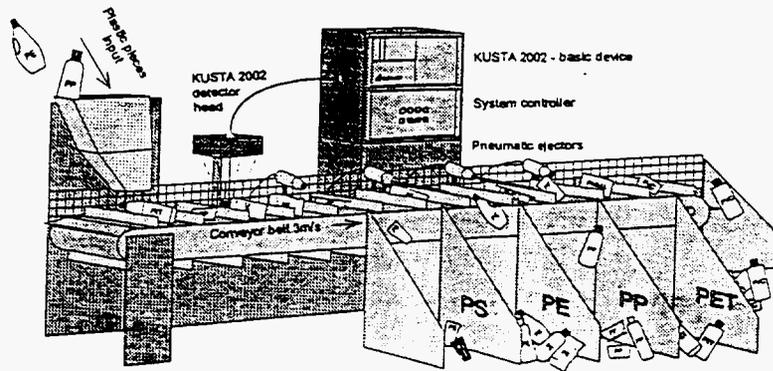


Figure n° 46 (a) : Techniques de tri filaire

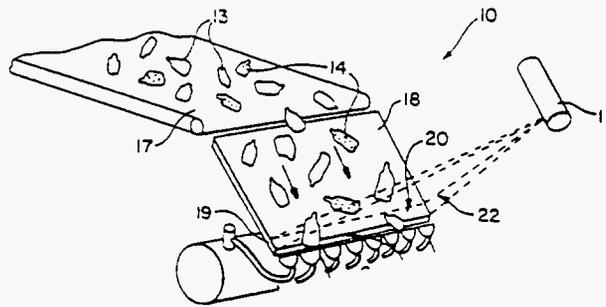


Figure n° 46 (b) : Techniques de tri planaire

### **A.1 - Séparation par détection** <sup>(67-95)</sup>

La macro-séparation a été le premier type de procédé qui a été automatisé pour le traitement des corps creux issus des déchets ménagers. On la retrouve dans la plupart des procédés de tri impliquant une séparation par détection <sup>(67, 95-97)</sup>.

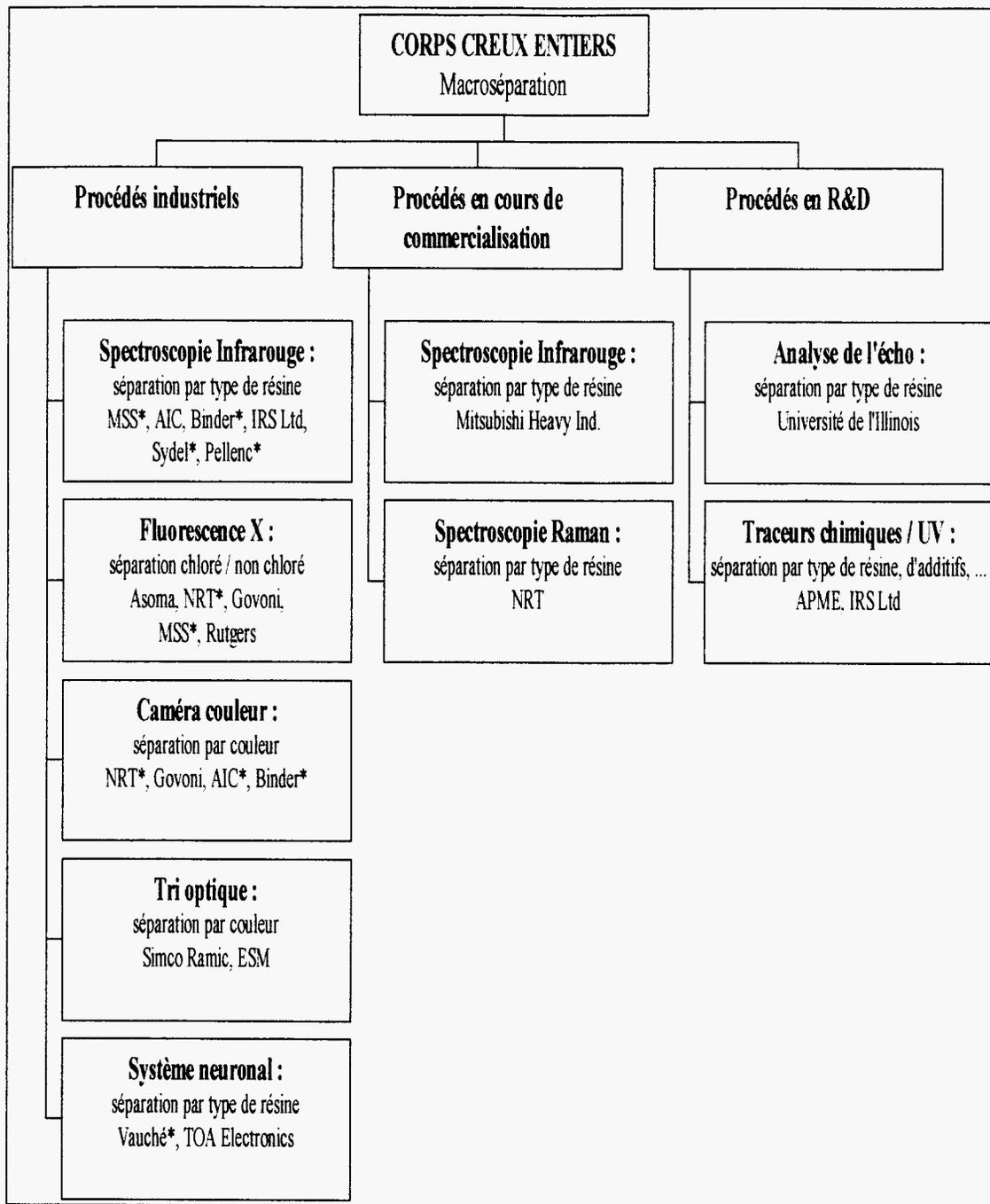
Notons aussi que les tris mettant en oeuvre des techniques de détection nécessitent un mode de circulation des déchets, qui doivent être présentés correctement devant le(s) détecteur(s), organisé :

- soit en présentation filaire : les déchets sont présentés l'un à la suite l'autre, sur une bande transporteuse étroite. Cette méthode simplifie les étapes de détection et d'éjection, mais complique l'étape de singulation.
- soit en présentation planaire : les déchets défilent sur une large bande transporteuse, les uns à côté des autres. Cette méthode simplifie la singulation des déchets mais complique les étapes de détection et d'éjection.

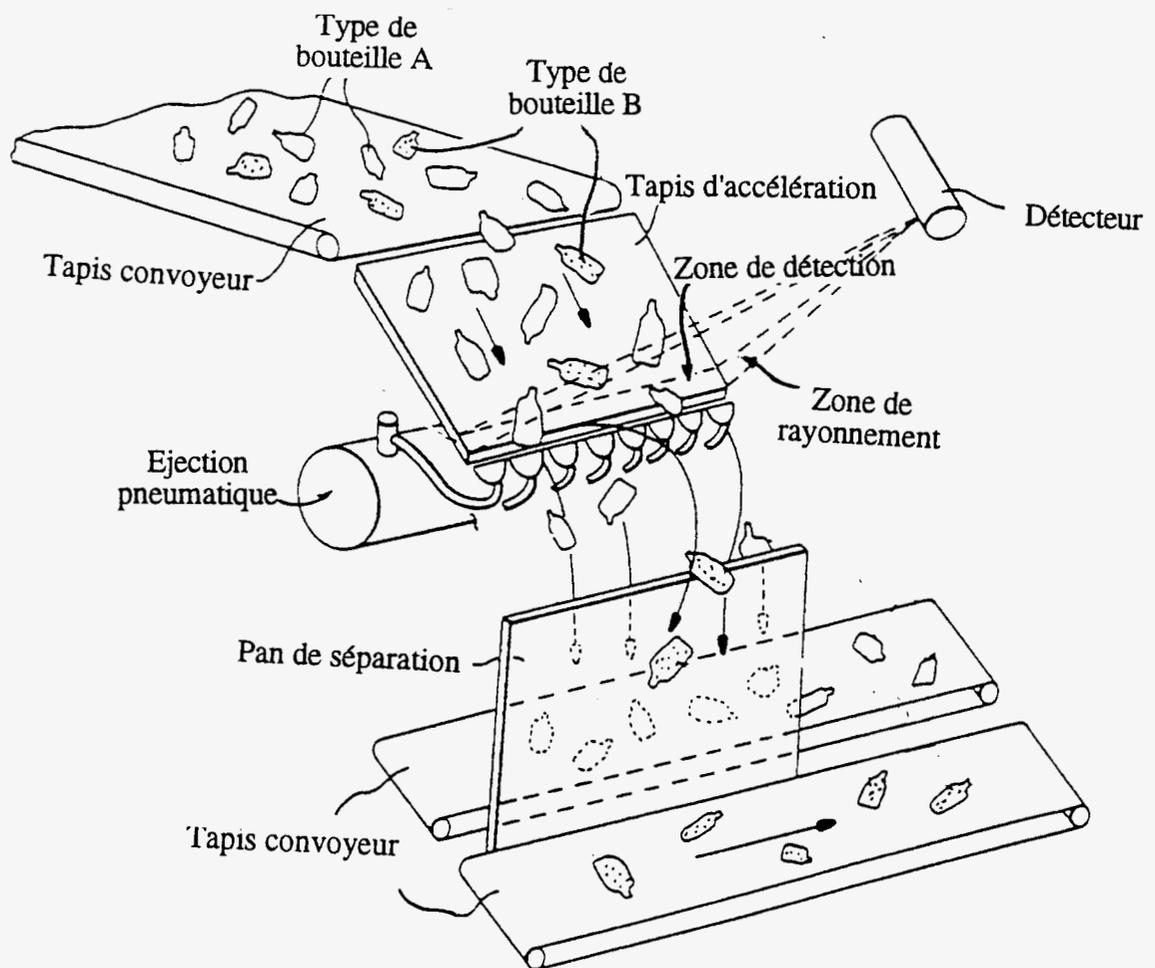
Ces deux types de présentation des corps creux devant les détecteurs sont illustrés sur les figures n° 46 A (a et b).

A ce jour, de nombreux développements techniques ont donné naissance à des technologies d'identification des matières plastiques très fiables et opérationnelles. Un frein persiste cependant quant au débit et à l'efficacité des séparations par détection, non pas limités par les capteurs (qui fonctionnent encore en sous-capacité), mais par la « mécanique » de tri mise en oeuvre lors du déballage des déchets, de leur présentation devant les capteurs et de leur éjection / non-éjection. Cette « mécanique » de tri pose encore de nombreux problèmes à l'échelle industrielle.

L'organigramme représenté sur la figure n° 46 B donne un résumé des technologies par détection employées à ce jour au niveau industriel ou en R&D pour le traitement des corps creux issus des déchets ménagers.



**Figure 46 B : Tableau récapitulatif des procédés de séparation de corps creux entiers**



**Figure n° 47 : Procédé de séparation NRT**

*\* C.P.R.R. / ASOMA : fluorescence X et tri couleur (modules commerciaux)*

Le Professeur H. Frankel, du **Center for Plastic Recycling Research (CPRR)** de l'université de Rutgers, a été le pionnier dans ces méthodes de tri automatisées <sup>(67, 98-100)</sup>. Il a développé un procédé permettant de séparer les PET clairs et verts, les PEhd incolores et colorés et le PVC, par l'utilisation couplée de la transmission de la lumière et de la fluorescence X.

Le pilote de séparation PVC / PET intègre un détecteur "ASOMA" en fluorescence X, par réflectance. Une lecture du code universel UPC, donnant la matière plastique, a aussi été développée. C'est un tri filaire, la mise en place automatique des bouteilles se faisant mécaniquement par un singulateur. Ils annoncent un débit de l'ordre de 200 bouteilles par minutes.

*\* N.R.T. : fluorescence X, tri couleur (unité commerciale) et détection Raman (R&D)*

**National Recovery Technologies Inc. (NRT)** <sup>(67, 96, 101-103)</sup> a développé un procédé de séparation PET / PVC, appelé Vinyl Cycle <sup>®</sup>, basé sur le principe de la détection par fluorescence X en transmission. Cette séparation est effectuée par tri planaire, ce qui ne nécessite pas la présentation en file indienne de chaque bouteille avant passage devant les détecteurs. Les capacités de traitement vont de 700 kg/h à 2 T/h, selon le dimensionnement de l'unité.

NRT assure une efficacité de 99,5 % sur des gisements contenant de l'ordre de 1 % de contamination PVC sur un gisement PET.

En parallèle, NRT a développé le procédé Autosort <sup>®</sup> qui permet de séparer les bouteilles par type de matières plastiques et par couleur (séparation PET clair / PET vert et PEhd non coloré / PEhd coloré). Ce procédé peut être couplé avec le Vinyl Cycle <sup>®</sup> afin de séparer en plus le PVC présent dans le flux de PET. Les capacités de traitement sont de l'ordre de 2 T/h.

Le schéma général des procédés de séparation NRT est donné sur la figure n° 47.

Au total, plus de trente machines Vinyl Cycle <sup>®</sup> et cinq machines Autosort <sup>®</sup> fonctionnent en milieu industriel aujourd'hui.

NRT développe actuellement des unités de tri automatique par spectroscopie Raman. Ce choix a été pris après les constatations suivantes :

- le MIR est trop lent pour permettre une automatisation du tri,
- le NIR est suffisamment rapide mais il est incapable d'analyser les échantillons noirs,

→ les développements technologiques en spectroscopie Raman rendent aujourd'hui possible son utilisation pour le tri automatique des plastiques, notamment en ce qui concerne la rapidité de l'analyse (200 m/sec. --> 50 m/sec.), et la capacité à analyser des échantillons noirs. De plus, la spectroscopie Raman permet la différenciation et, donc, la séparation, entre le PET et le PEN.

Des essais de séparation par spectroscopie Raman ont été réalisés sur des prototypes, mais deux unités industrielles sont en cours de production pour équiper des "Material Recycling Facilities" (MRF) en début 1998.

Enfin, NRT a mis au point le Robosort ® qui intervient après l'utilisation d'une caméra vidéo, afin d'automatiser la séparation : un opérateur visionne les corps creux sur un écran, corps creux ayant des aspects différents selon les matières. Des touches sensibles permettent alors à l'opérateur de sélectionner les corps creux à éjecter, sans contact direct avec les déchets.

NRT prévoit de développer cette automatisation après une détection par spectroscopie IR, Raman ou par fluorescence X : la matière identifiée serait alors pointée par un opérateur, directement sur l'écran de visualisation, et séparée du flux de matière. Leur objectif de cadence d'identification est de 10 pièces /sec.

\* Govoni : fluorescence X et tri couleur (unité commerciale)

Parallèlement, **Govoni** <sup>(96, 97, 104, 105)</sup> a développé une ligne de traitement permettant la séparation des corps creux par type de résine et par couleur pour former les fractions suivantes : PVC / PET clair / PET coloré / PEhd.

Pour cela, elle utilise deux types de détection qui sont la fluorescence X par transmission, pour la séparation du PVC, et la détection couleur (constituée par une source de lumière qui éclaire par transparence, les bouteilles transportées : la lumière transmise est captée, filtrée et interprétée).

La ligne a une capacité de 1 T/h et peut atteindre une efficacité de 99,8 % sur un gisement entrant de PET souillé par 2 % de PVC.

\* M.S.S. : fluorescence X et IR (unité commerciale)

**Magnetic Separation System (MSS)** <sup>(67, 96, 97, 106-111)</sup> a breveté le système Bottlesort ® qui utilise essentiellement les détections par fluorescence X et par lumière infrarouge pour la séparation PVC / PET coloré / PET naturel / PEhd non coloré / PP.

Le tri des corps creux entiers passe par les étapes représentées sur le schéma suivant :

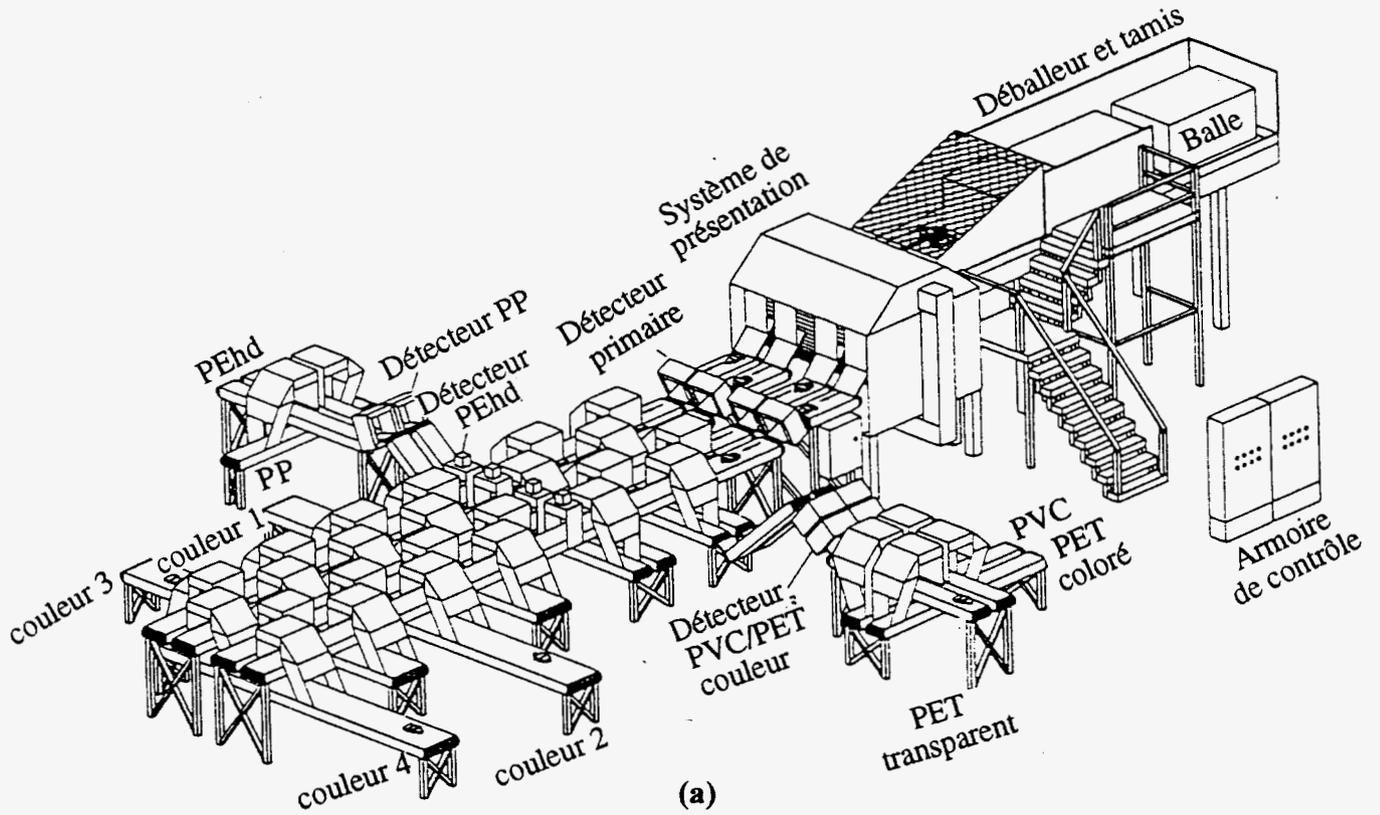
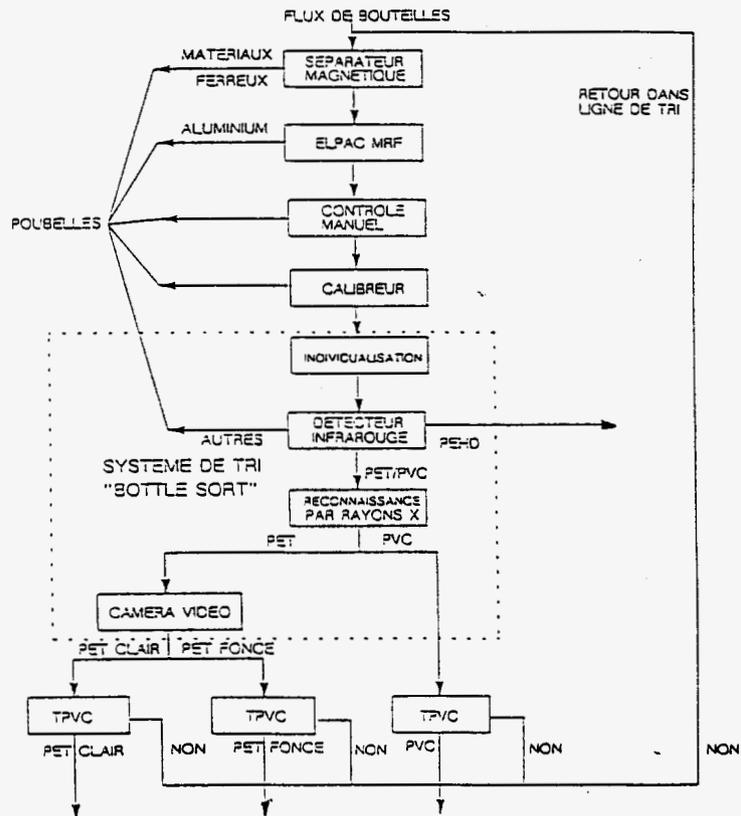


Figure n° 48 (a,b) : Ligne de traitement MSS



(b)



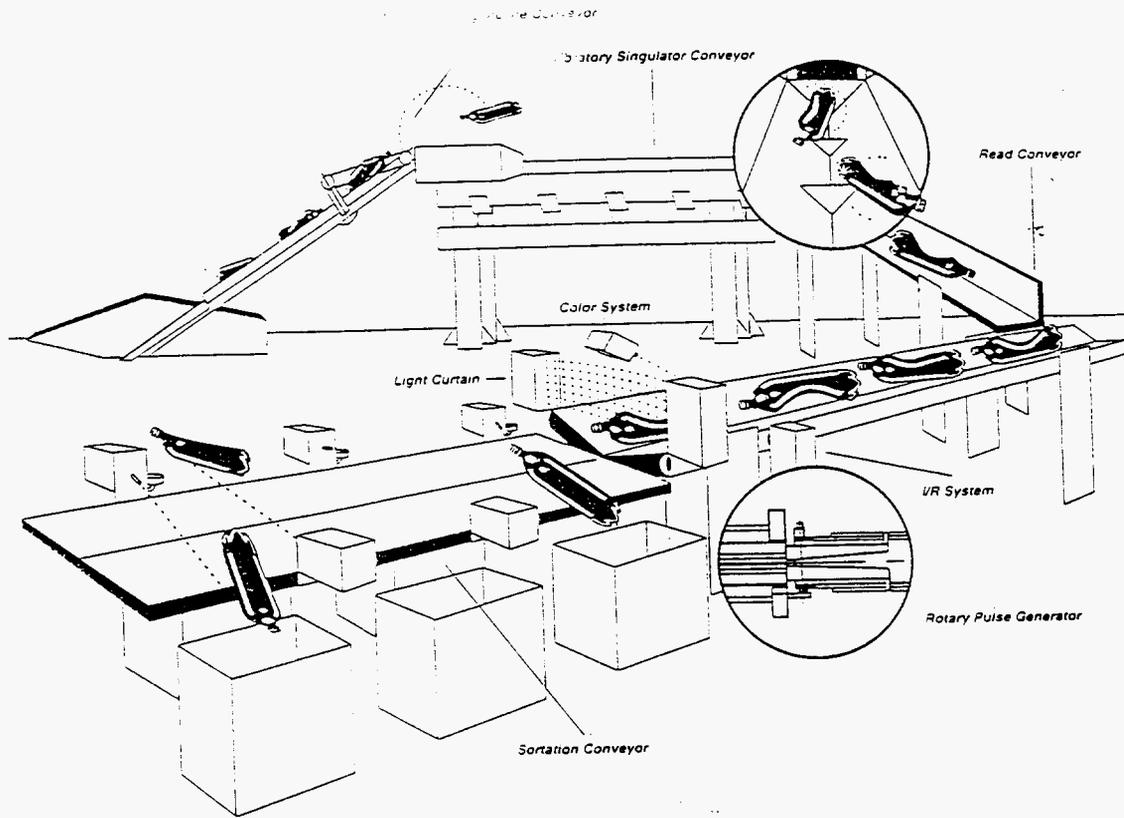


Figure n° 49 : Ligne de traitement AIC

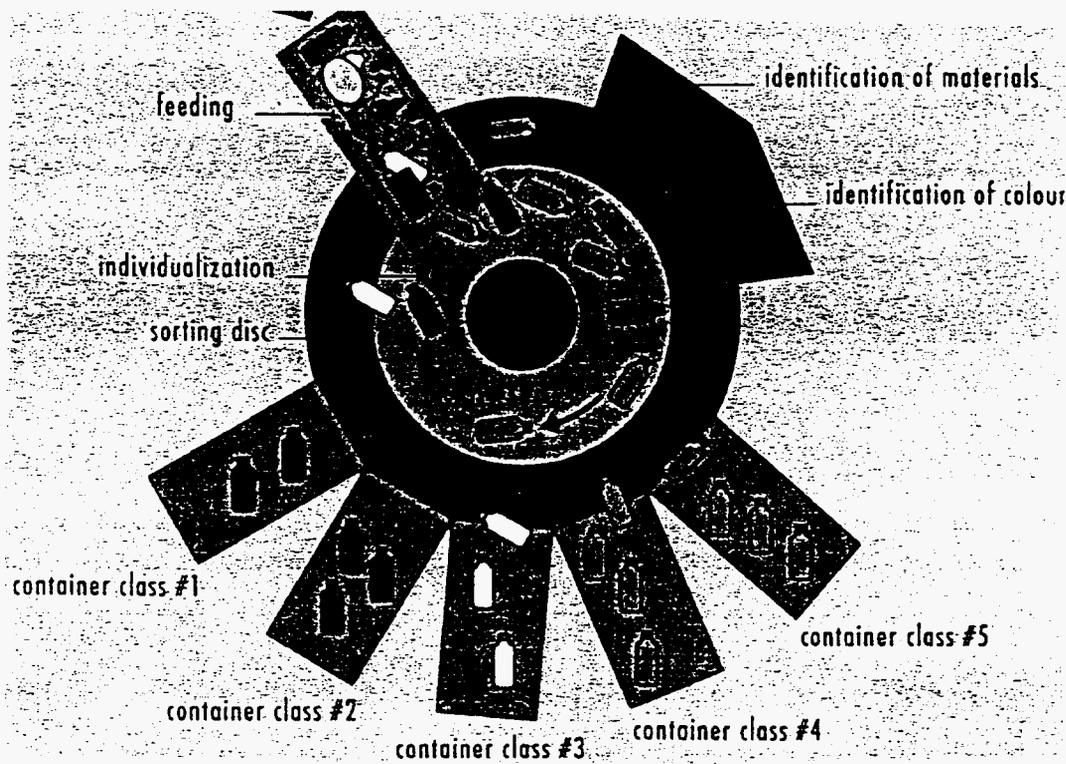


Figure n° 50 : Module de tri CRITERION

\* A.I.C. : tri couleur et IR (modules commerciaux)

L'**Automation Industrial Control (AIC)** <sup>(67, 112)</sup>, de Baltimore, propose aussi des modules de détection permettant le tri sur corps creux par type de résine et par couleurs, nommé "Poly-Sort System". Il y a essentiellement deux modules de détection : une première détection par NIR en transmission et une seconde détection couleur. Un assemblage de modules de détection est schématisé sur la figure n° 49.

\* Binder + Co / M.M.V.S. : IR et tri couleur (unité commerciale)

La société autrichienne **Binder + Co AG** <sup>(96, 97, 113-115)</sup> a développé, en collaboration avec la société **Massen-Machine Vision Systems GmbH**, un procédé de séparation appelé **Criterion**, capable d'identifier et de séparer par couleur, par forme et par matière, des corps creux entiers ou des flakes avec un débit d'entrée de l'ordre de 1 T/h. Ce module de tri est schématisé sur la figure n° 50.

Ce procédé utilise trois détections couplées qui sont :

- la détection couleur par réflexion,
- la détection couleur par transmission,
- la détection par spectroscopie NIR.

Le tri peut être réalisé suivant les critères opaque / transparent, coloré / non coloré, et inclue l'identification de plastiques tels les PE, PP, PS, PVC, PET, ..., avec des taux d'efficacité de séparation de 99,9 %, selon Binder. L'étape de singulation est réalisée par le passage des bouteilles sur une table tournante où, de par la force centrifuge, les bouteilles se présentent aux détecteurs en périphérie de la table tournante.

Le **Plastisort®**, intégré dans l'unité de tri **CRITERION**, combine donc la détection par caméra couleur et par proche IR. Il possède un système de communication inter-détecteurs : par exemple, si la caméra voit une étiquette ou le culot de la bouteille, elle peut gérer le point de mesure de l'IR pour que ce second capteur ne prenne pas en mesure l'étiquette ou le culot.

A titre d'exemple, le traitement du PET cristal conduit aux taux de contaminants résiduels suivants :

- PVC < 20 ppm (indépendant de la salissure)
- PET non transparent ou sombre < 0,01 %
- PET légèrement colorés < 2 - 5 % (dépendant du niveau de salissure et du taux de rejet accepté).

Les capacités de la ligne sont de 1 m linéaire/h, soit environ 5 400 T/an. Le coût de traitement est de 800 F/Tonne, pour un investissement de l'ordre de 7 millions de francs.

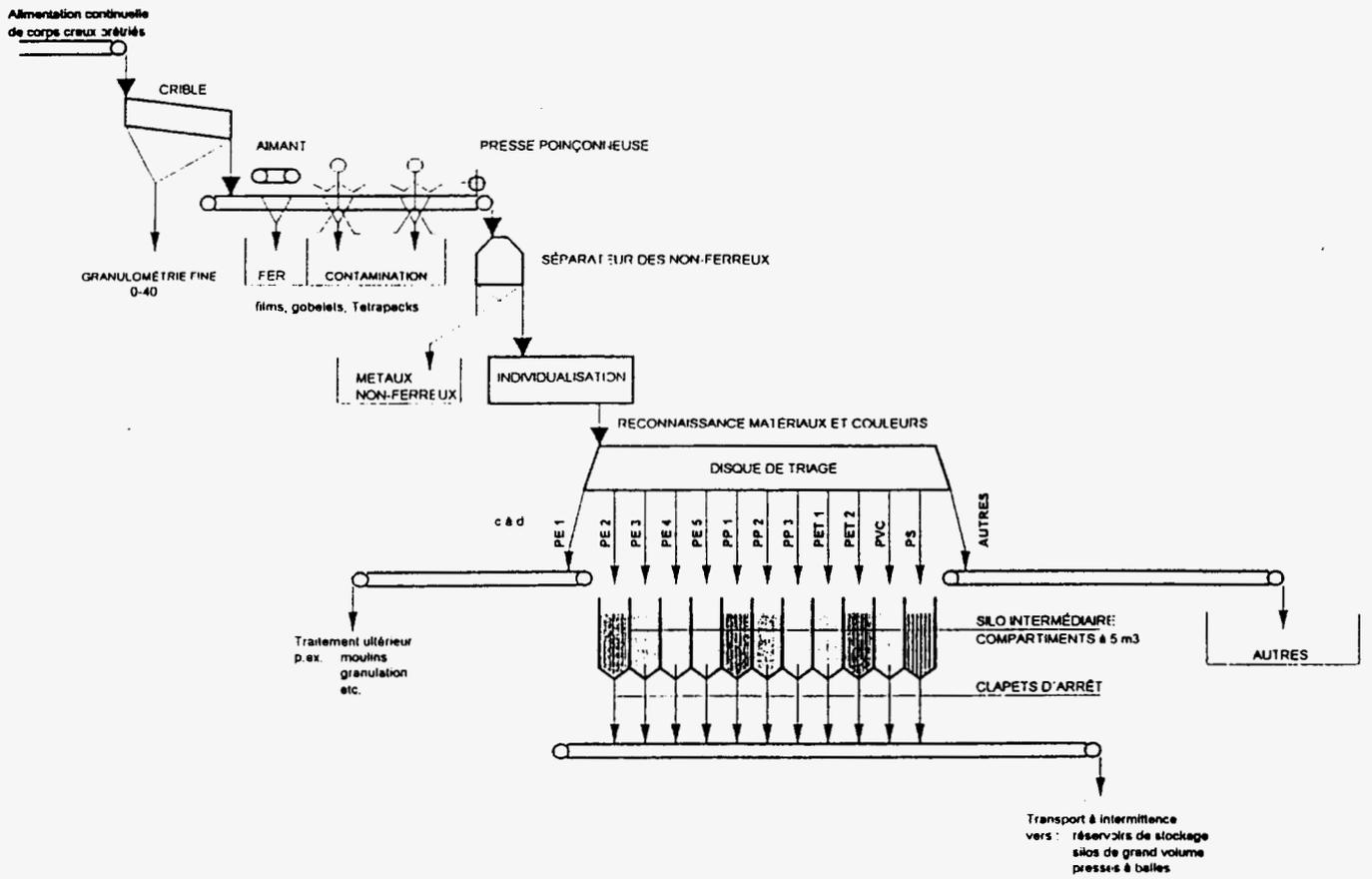


Figure n° 51 : Ligne de traitement Binder + Co (intégrant le CRITERION)

La figure n° 51 montre une ligne complète de traitement des corps creux, intégrant le module de détection Critérian.

*Remarque* : le détecteur NIR utilisé par MMVS intégré dans l'unité Plastisort, est l'appareil mis au point par le LLA (Berlin) analyseur plus connu sous le nom de KUSTA 2000. MMVS a, plus particulièrement, développé le module de détection par caméra couleur.

\* *IRS Ltd / Bühler* : IR (commercial)

**IRS Ltd** <sup>(116)</sup> a commercialisé deux unités MRF (Material Recycling Facilities) qui traitent, avec un débit de 10 T/h, les mélanges de déchets ménagers corps creux plastiques + papier + canettes alu, selon le schéma suivant :

- 1) Trommel ==> papier + films (18 %)
- 2) Séparateur Eddy current ==> alu  
==> métaux ferreux  
==> plastiques
- 3) Tri automatique, utilisant le NIR (Niriks Sensor de **Bühler**), avec un débit de 1T/h.

Les fractions en sortie ont une pureté de 99 %.

\* *Simco Ramic* : tri optique (unité commerciale)

**Simco Ramic Corporation (SRC)** <sup>(117)</sup> a développé un procédé qui s'applique à la séparation de paillettes de bouteilles par détection couleur, en lumière polarisée ou non (procédé de micro-séparation). La machine "VHS Optisort" permet, notamment, la séparation de paillettes PET colorées / paillettes PET claires, avec un débit d'entrée de 2 T/h environ et une efficacité de séparation de l'ordre de 98 %.

Ce procédé peut aussi être utilisé pour la séparation PVC / PET. Pour cela, il propose d'insérer en amont de la détection couleur, une étape de chauffage léger des paillettes qui va alors provoquer une coloration plus foncée des paillettes PVC qui pourront ainsi être éliminées. Cette détection peut aussi être couplée avec un analyseur IR.

Simco Ramic propose aussi une unité de tri sur corps creux entiers permettant la séparation PVC / PET, par détection couleur en lumière polarisée. Notons aussi que cette société étudie des développements dans le proche et le moyen IR.

\* *ESM Satake* : tri optique (module commercial)

**ESM International Inc.** <sup>(60, 118)</sup>, initialement spécialisé dans le secteur de l'agro-alimentaire, a transféré une technologie de séparation par tri optique couleur (UV) au traitement de paillettes de bouteilles (procédé de micro-séparation).

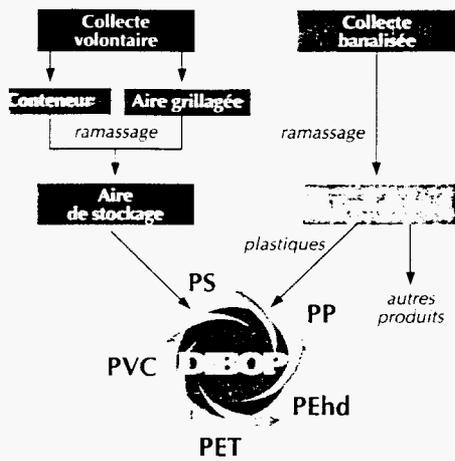


Figure n° 52 : Procédé de séparation Sydel (DIBOP)

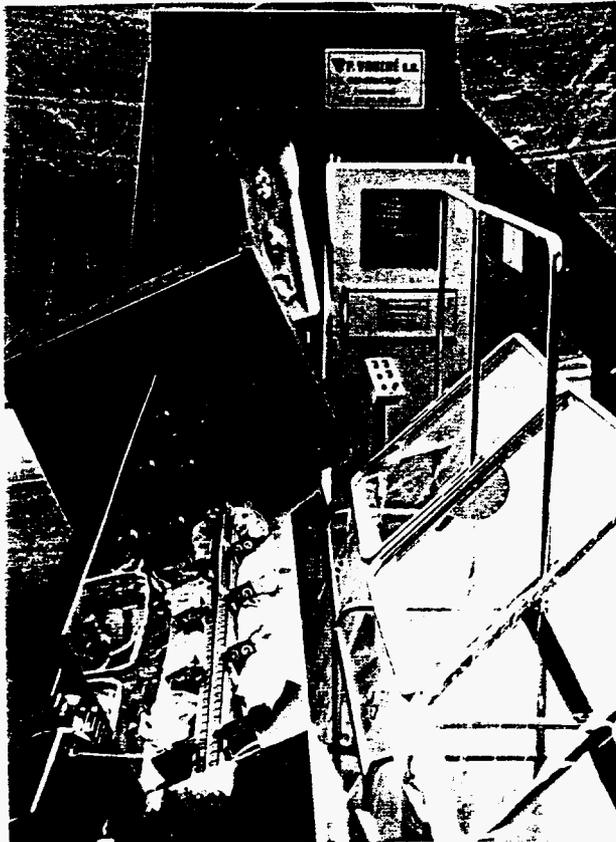


Figure n° 53 : Procédé de séparation Vauché (NEUROPLAST)

Ce procédé, appelé ScanMaster, est appliqué au stade industriel (notamment pour la séparation PET naturel / PET coloré). Il met en oeuvre un nombre important de canaux (40, 80 ou 160) et permet le tri couleur en binaire, de granulés ou broyats de plastiques avec des débits compris entre 1 et 2 T/h. L'utilisation d'un filtre monochromatique permet d'identifier la couleur du flux principal et de détecter toute anomalie de couleur dans le gisement.

Pour cela, les matières, parfaitement sèches divisées et exemptes de fines, tombent verticalement sur un large plan incliné équipé des multiples canaux. La détection d'une partie de couleur indésirable est immédiatement suivie d'une éjection pneumatique.

Les rendements et taux de pureté obtenus sont très dépendants de la forme, de la taille des particules, du taux de contamination et du taux de fines créées lors du broyage. Ce procédé peut conduire à des teneurs résiduelles d'impuretés inférieures à 1 %. Il s'applique essentiellement aux fractions majoritaires en PET ou en PEhd.

\* Sydel : IR (unité commerciale)

**Sydel** <sup>(97, 119)</sup> propose un procédé de tri automatique des corps creux mettant en application le détecteur en proche infrarouge Niriks, développé par la société suisse Bühler <sup>(96)</sup>.

Ce procédé, appelé DIBOP<sup>®</sup>, passe par la singulation en ligne des corps creux sur une table circulaire, leur identification par proche NIR et leur éjection pneumatique dans des bacs appropriés. Ce procédé permet de reconstituer des balles conformes aux prescriptions techniques minimales (PTM) de Valorplast.

La capacité de traitement est de 500 kg/h. Selon Bühler, l'identification est réalisée sur la base de 200 lectures par containers, avec une capacité de 5 bouteilles par seconde, soit 1 T/h. Le problème du débit revient alors aux difficultés mécaniques de singulation et d'éjection. Le module de séparation est représenté sur la figure n° 52.

NB : Il n'a pas été possible de visiter le seul centre de tri français ayant acquis récemment une unité de tri Sydel, pour des problèmes de mise au point non résolus en Décembre 1997.

\* Vauché : tri neuronal (commercial)

La société française **Vauché** <sup>(120)</sup> commercialise un procédé de tri neuronal des corps creux, le Neuroplast<sup>®</sup>, qui permet, tout comme le Dibop<sup>®</sup>, de constituer des balles aux PTM Valorplast.

La machine est équipée d'un convoyeur alimentateur, d'un tambour de mise en filaire qui assure la singulation en ligne des bouteilles, d'un double système de détection basé sur les identifications optiques, et d'un système d'éjection pneumatique linéaire.

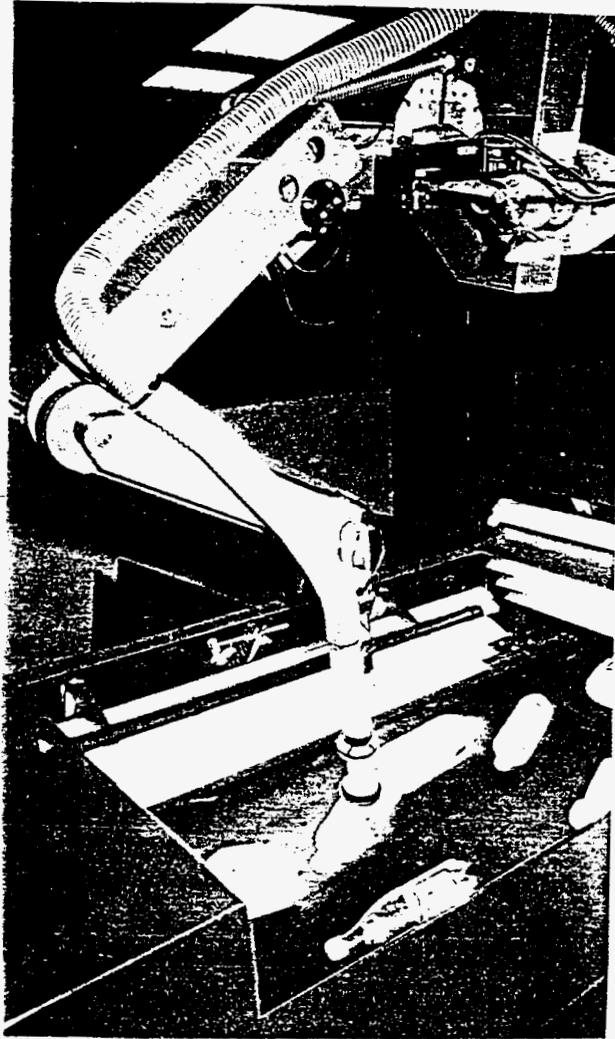
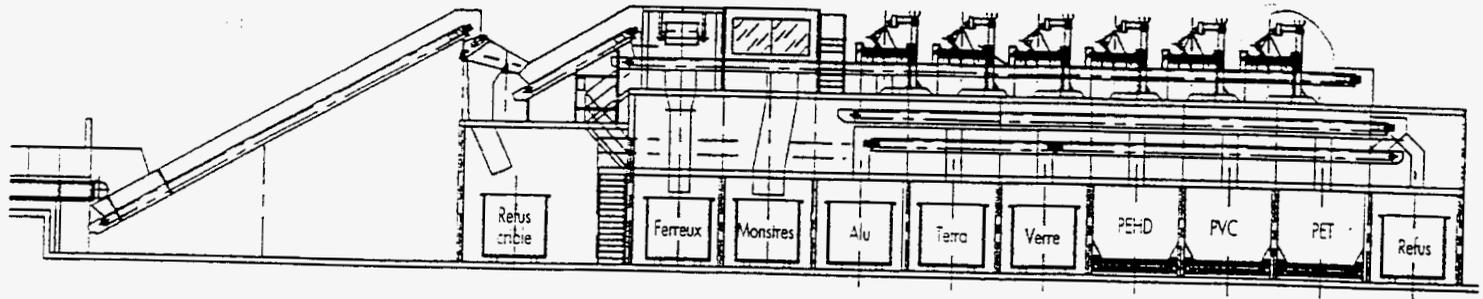


Figure n° 54 : Procédé de séparation Pellenc (PLANECO)

Les avantages de ce procédé consistent en une analyse par réseaux de neurones (efficace et rapide) et en une éjection linéaire horizontale des containers triés (par opposition à Sydel où les containers sont éjectés en hauteur avant de tomber dans le réceptacle approprié). Les capacités de traitement sont semblables au procédé Dibop<sup>®</sup>. Ce procédé est représenté sur la figure n° 53.

NB : Pour des raisons identiques à celles évoquées chez Sydel, il n'a pas été possible de visiter l'unité de tri Vauché, en cours de réglages, sur le centre de tri de Romainville, en Décembre 1997.

*\* Pellenc / Dragon : tri par caméra couleur et NIR (commercial)*

La société Pellenc <sup>(121)</sup>, initialement spécialisée dans la cueillette de fruits par bras articulés, a mis au point, en collaboration avec la société Dragon, un processus de reconnaissance et de manutention intégrée des déchets issus de la collecte sélective. Le procédé fait intervenir une détection couleur (caméra vidéo) et une détection NIR directement actives sur un bras articulé qui vient prendre les corps creux un par un (tri planaire). Cette technique permet la séparation des corps creux aluminium / tétrapack / verre / PET / PVC / PEhd, avec un débit de l'ordre de 1 500 bouteilles / h, pour sortir des balles de corps creux aux PTM de Valorplast. A ce jour, seul un prototype est opérationnel, mais des unités ont d'ores et déjà été commandées pour l'exportation. Une illustration du prototype « PLANECO » est donné sur la figure n° 54.

*\* Université de l'Illinois : analyse de l'écho (R&D)*

L'Université de l'Illinois <sup>(122)</sup> a étudié un procédé de tri automatique utilisant l'intelligence artificielle. La détection utilise deux paramètres qui sont la lumière (analyse de la couleur), le son (analyse de l'écho).

La réponse de chacune des matières plastiques à chacune des deux stimulations est enregistrée dans un système informatique qui fonctionne avec des réseaux de neurones. La combinaison des deux résultats définit une zone de réponses en deux dimensions propres à chaque matière.

Cette technique permet ainsi de différencier PET clair / PET vert / PEhd naturel / plastiques opaques. Les taux d'efficacité et de pureté obtenus ne sont pas explicitement donnés. Le débit est de l'ordre d'une bouteille par seconde.

*\* Mitsubishi Heavy Industries Ltd : IR (R&D - unité pilote)*

Mitsubishi Heavy Ind. <sup>(123)</sup> a développé, lors d'une étude démarrée en 95, un appareil automatique de détection NIR en transmission. Cette technologie permet l'analyse de plastiques transparents, elle est donc utilisée dans le cas de séparation PVC/PET/ plastiques opaques (autres).

Les balles de corps creux sont délitées par un appareil rotatif à secousses et les bouteilles sont présentées, en position filaire, devant le détecteur, à une vitesse de 3 bouteilles/sec. (vitesse de la bande transporteuse d'environ 1 minute/sec.). Les matières identifiées sont extraites par un système d'éjection pneumatique.

Mitsubishi annonce un taux d'efficacité compris entre 90 et 100 %, ceci à l'échelle du laboratoire. Le procédé est actuellement en cours de validation industrielle.

*\* APME / IRS Ltd : utilisation de traceurs chimiques (R&D)*

Un programme européen BRITE <sup>(69)</sup>, sur l'utilisation de traceurs chimiques couplée à une détection UV pour l'identification des matières plastiques, a conduit à des résultats intéressants. Sept produits organiques, qui ont un agrément pour l'alimentaire, ont été développés et un prototype de détection UV a permis de valider le système de reconnaissance.

Cette technologie permet :

- l'identification (en tri positif) de différents types et grades de polymères,
- la reconnaissance de structures multicouches,
- la reconnaissance de matière pour un recyclage en boucle fermée,
- la reconnaissance de matériaux à exclure de la filière.

Les traceurs sont utilisés à hauteur de 5 - 7 ppm. La détection UV est réalisée entre 440 et 640 nm, avec l'utilisation de filtres adaptés à la réponse du traceur (la détection est possible par l'excitation des traceurs sous le rayonnement UV, sans modification de la couleur de la résine après analyse).

Le coût global de l'installation de tri a été estimé à 2 millions de francs, pour un coût de base de l'incorporation de traceurs de 30 à 100 F/tonne de polymères (à partir du stade de la granulation ou de la transformation)

Cette technologie est toujours en développement pour une évaluation commerciale.

A titre d'exemple, Coca-Cola utilise cette technologie afin de reconnaître leurs propres bouteilles PET et de ne pas polluer leur gisement avec des bouteilles en PET extérieures (les additifs, plastifiants, colorants, etc..., utilisés dans la fabrication de bouteilles PET dans d'autres industries, ne sont pas forcément compatibles avec les leurs, ce qui entraînerait une baisse de la qualité de leur PET). L'objectif est donc la valorisation en boucle fermée.

\* Institut des sciences et techniques des polymères espagnol : traceurs chimiques (R&D)

L'institut des sciences et techniques des polymères espagnol <sup>(124)</sup> teste les possibilités de greffage sur les polymères, par extrusion réactive, de sels de sodium détectables sous UV.

L'étude se base sur la modification du PVC qui peut ensuite être clairement identifié par UV. Cependant, cette technique est limitée par les nombreux ajouts d'additifs dans le PVC, tels les plastifiants, qui peuvent provoquer des interférences avec les composés chimiques greffés.

L'institut précise, en outre, que cette technique est très sensible à l'épaisseur des pièces, au degré de propreté et à la présence d'étiquettes qui limitent la détection UV.

**N.B. : De nombreuses unités industrielles utilisent des techniques de détection en combinaison avec des procédés en voie humide (hydrocyclonage, flottation-moussage, flottaison) ou en voie sèche (criblage, micronisation).**

#### **A.2 - Séparation électrostatique** <sup>(24, 95, 97, 125-129)</sup>

La séparation électrostatique se situe dans les procédés de microséparation et interviennent sur des paillettes de corps creux de granulométries inférieures à une dizaine de millimètres.

Elle ne peut être appliquée seule, mais intervient dans des étapes de purification après traitement de fractions plastiques par les procédés de flottaison, de tri par détection, ou autres, afin d'affiner la séparation.

En ce qui concerne les déchets de corps creux ménagers, cette technologie est appliquée au niveau industriel en sur-tri, afin d'extraire une fraction PVC résiduelle, polluant un gisement de PET (3 unités américaines et 2 unités européennes fonctionnent à ce jour sur ce principe).

\* Séparateur électrostatique Hamos GmbH (R&D → commercial)

La société **Hamos** <sup>(24)</sup> propose un procédé de traitement, le système EKS, mettant en oeuvre le tri électrostatique par triboélectricité pour affiner la séparation PET / PVC des corps creux. Les gisements de PET sont souvent contaminés par du PVC. Un gisement de PET contenant 9100 ppm de PVC a été traité selon le procédé Hamos et a conduit, après deux séparations successives à un taux d'efficacité de 98 %, ce qui signifie que le gisement de PET ne contient plus que 180 ppm de PVC résiduel. Ces équipements ont un coût approximatif de 1,5 MF, pour un débit de 1 T/h.

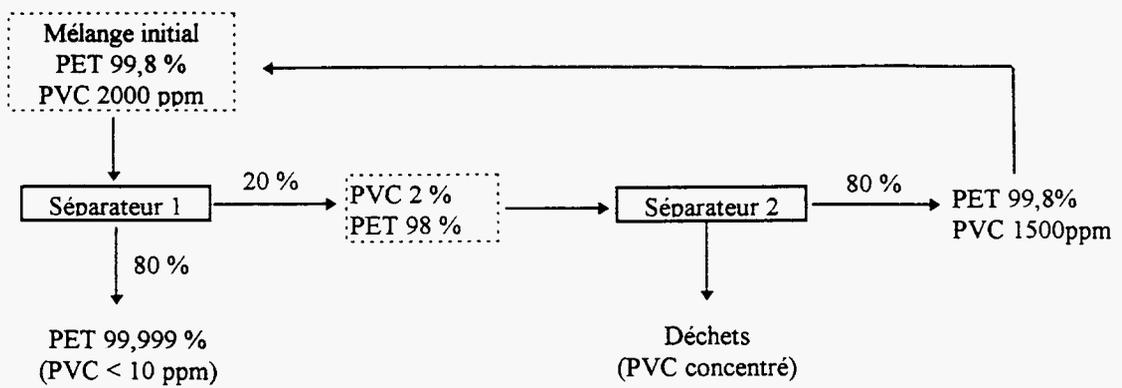


Figure n° 55 : Schéma de traitement CARPCO

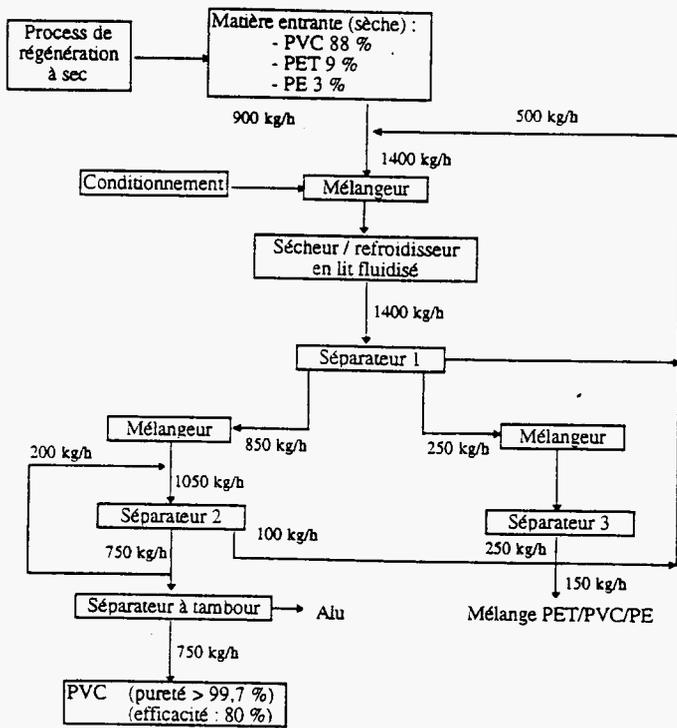


Figure n° 56 : Schéma de traitement

### Kali und Salz

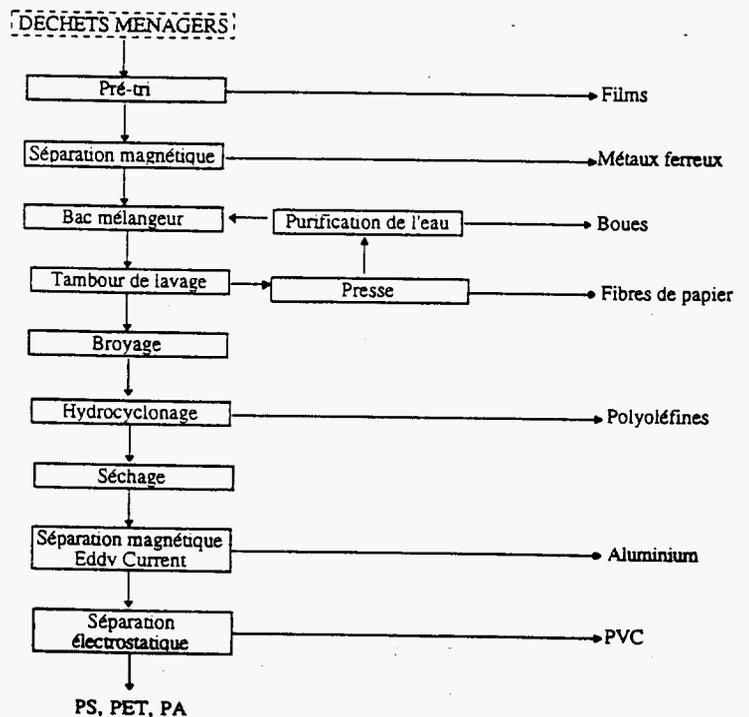


Figure n° 56 (bis) : Schéma de traitement Systec

\* Séparateur électrostatique Carpco (commercial)

**Carpco** <sup>(95, 125, 126)</sup>, sous une licence exclusive DevTech Labs, dispose d'un séparateur électrostatique par triboélectricité, et étudie aussi la séparation PVC / PET. Deux unités industrielles sont opérationnelles en Europe, dans la purification du PET (extraction du PVC résiduel).

Cependant, le laboratoire de recherche DevTech Labs, et le TU Delft (qui utilise un équipement Carpco), ont mis en évidence les problèmes liés à la séparation électrostatique, qui diminuent l'efficacité du tri :

- les grosses paillettes se chargent trop lentement, et les fines collent,
- la taille optimale semble être de l'ordre de 6 mm, et doit être homogène,
- les matériaux doivent être parfaitement secs et propres en surface,
- pour atteindre des taux de pureté satisfaisants, entre 10 et 20 % du gisement entrant peuvent être perdus, ou bien il faut mettre en place au moins deux (voire trois) séparateurs électrostatiques en série. Un exemple de schéma de traitement est donné sur la figure n° 55.

Carpco préconise alors un lavage à chaud avec soude caustique en amont du tri électrostatique.

\* Séparateur électrostatique Kali und Salz (commercial)

La société allemande **Kali und Salz** <sup>(97, 127, 128)</sup> propose un procédé de séparation PVC / PET en deux étapes, faisant intervenir :

- une première étape en voie humide, par flottation ou hydrocyclonage, afin de séparer les fractions plus denses/moins dense que l'eau et d'éliminer les indésirables tels papier, verre, terre, ...), suivi d'une étape de séchage,
- une seconde étape en voie sèche par séparation électrostatique. Le chargement des particules est réalisé par triboélectricité. Le principe de cette séparation est donné sur la figure n° 56.

\* Systec GmbH (prototype)

**Systec GmbH** <sup>(129)</sup>, entité de R&D mise en place par le DSD allemand, a développé une ligne de traitement, au stade de prototype : une combinaison d'opérations de flottaison et de séparation électrostatique est appliquée au traitement des déchets ménagers allemands. Le schéma de traitement est présenté sur la figure n° 56bis .

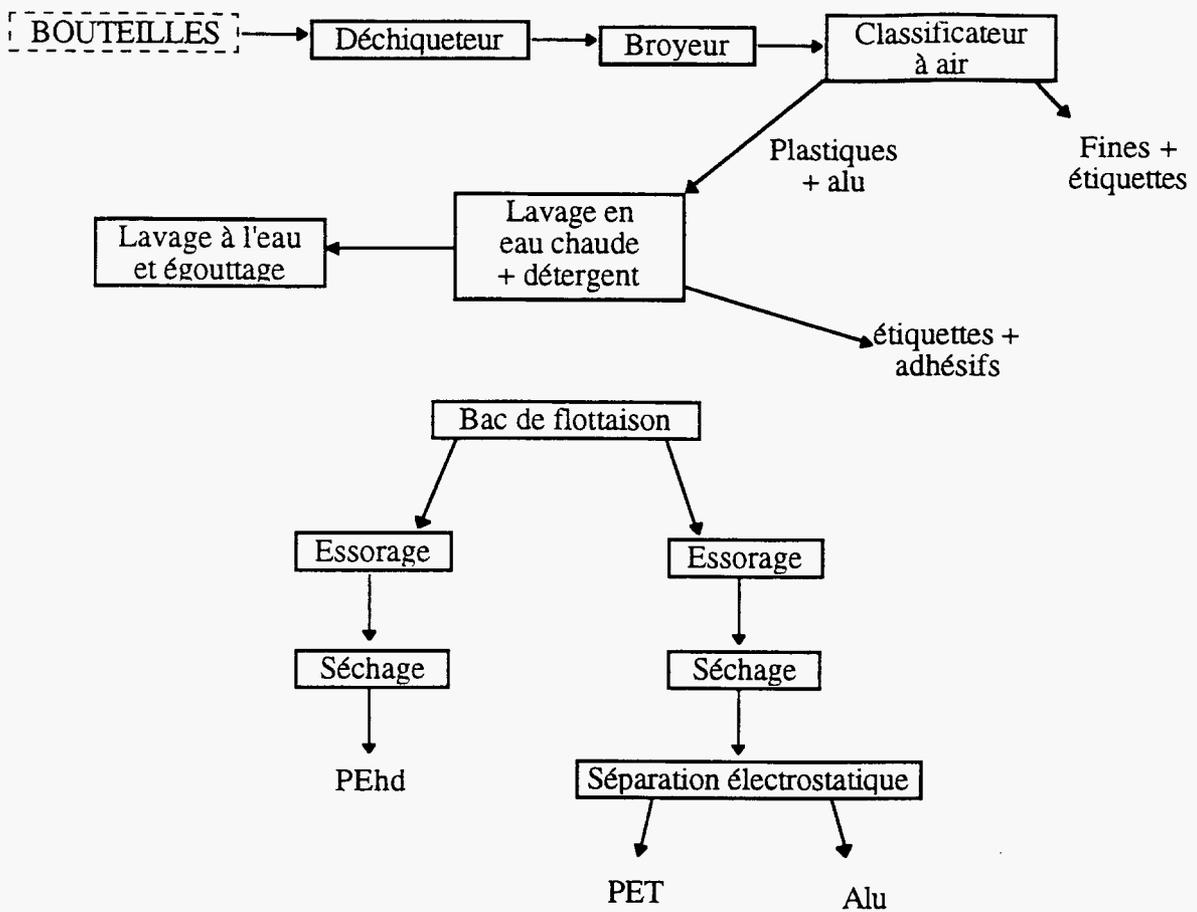


Figure n° 57 : Procédé de séparation par flottaison Rutgers

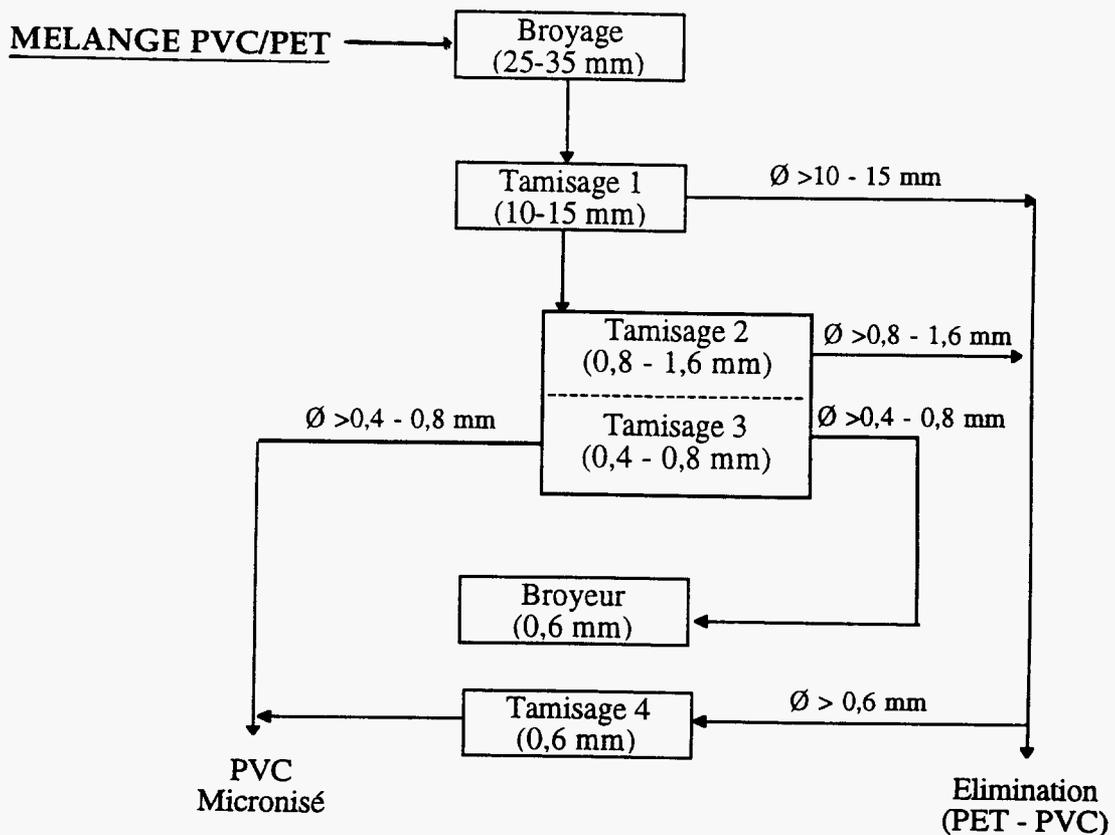


Figure n° 58 : Procédé de séparation par micronisation Micronyl

Bien que cela conduise à des résultats intéressants, le DSD reste sceptique quant à l'utilisation du tri électrostatique pour le traitement des déchets ménagers, qui sont très souillés, rarement secs, et qui demandent donc des opérations de préparation fort importantes et contraignantes sur le plan économique.

\* Université de Gannon (études, R&D)

Dr. Bill Gregory, de l'**université de Gannon** <sup>(95)</sup>, a réalisé des études sur la séparation électrostatique. Il a développé des détecteurs qui permettent la lecture de la constante diélectrique de différentes matières plastiques. Ces essais ont été réalisés sur des corps creux entiers, mais l'analyse de paillettes semble aussi réalisable avec l'utilisation de détecteurs appropriés.

A. 3 - Autres procédés <sup>(11-15, 18-20, 28-30, 34,35,130 - 134)</sup>

\* Séparation par flottaison, Rutgers (commercial)

**Rutgers** <sup>(130)</sup> propose un procédé de séparation densimétrique des mélanges PEhd/PET par une technique classique et simple, utilisée fréquemment dès lors que les plastiques mélangés ont une différence de densité supérieure à 0,2 g/cm<sup>3</sup>.

La figure n° 57 reprend les différentes étapes de leur procédé.

\* Séparation par broyage différentiel / micronisation, Micronyl (industriel)

**Micronyl Wedco** <sup>(131-133)</sup> a développé un procédé de séparation PVC/PET par broyage différentiel, basé sur la micronisation de ces matières, dans le cas d'une fraction majoritaire en PVC. Le PVC étant plus fragile que le PET, il est broyé plus finement et cette différence rend la séparation possible. Le mélange suit le traitement donné sur la figure n° 58.

A chaque "étage", il intervient donc un broyage et une ségrégation de matières, suivi d'un tamisage permettant un acheminement sélectif des matières séparées vers un autre "étage". A chaque "étage", on provoque un enrichissement en PVC. Cependant, cette purification ne peut intervenir que sur un lot de matières plastiques contenant déjà plus de 85 % de PVC.

\* Broyage cryogénique, Modern Machinery Inc. (commercial)

**Modern Machinery Inc.** <sup>(134)</sup> utilise le broyage cryogénique pour séparer le PVC et d'autres contaminants présents dans le PET (le PET reste broyé sous forme de particules de granulométrie moyenne alors que le PVC se transforme en poudre).

Ainsi, Modern Machinery commercialise une ligne complète comprenant une première étape de broyage, suivi d'un broyage cryogénique, d'un dépoussiérage, d'une flottaison et d'un séchage par centrifugation.

La capacité de traitement est de l'ordre de 900 kg/h. Ce procédé est utilisé en milieu industriel aux USA mais demeure coûteux de par la mise en oeuvre du broyage cryogénique, plutôt "énergivore".

*\* Autres procédés, en R&D*

D'autres procédés demeurent à l'état de recherche et développement laboratoire ou semi-pilote. C'est notamment le cas :

- des procédés de flottation-moussage : travaux en cours chez **Recovery Process International**, à l'**US Bureau of Mines** <sup>(18)</sup>, au **Colorado School of Mines** (USA), au **BRGM** <sup>(20)</sup> (France), au **TU Delft** <sup>(19)</sup> (Pays-Bas),
- des séparations densimétriques par fluide supercritique : de nombreuses études sont menées par l'**Université de Pittsburgh** <sup>(11-15)</sup>
- des procédés de dissolution sélective : sujet traité par le **Rensselaer Polytechnic Institute** <sup>(28-30, 34, 35)</sup>

Bien que conduisant à des taux de pureté et d'efficacité très satisfaisants, les coûts financiers et environnementaux de la mise en place de tels procédés ne permettent pas de développer à ce jour une activité rentable pour le traitement des corps creux. Mais les résultats de séparation obtenus à l'échelle semi-pilote n'en demeure pas moins intéressants.

**APPLICATION :**

**B - FILMS PHOTOGRAPHIQUES / RADIOGRAPHIQUES**

<b>APPLICATION :</b> <b>B - FILMS PHOTOGRAPHIQUES / RADIOGRAPHIQUES</b>
--

Il existe différents types de films polyesters utilisés dans les secteurs de la photographie, du cinéma, de la radiographie,...., et il est nécessaire de les trier entre eux avant toute autre opération. Ainsi, il convient de séparer :

- les films PET, des films en triacétate de cellulose
- les films bleus (radiographie), des films transparents (cinématographie)
- les films avec argent, des films sans argent

avant d'appliquer un procédé de régénération, propre à chaque catégorie citée ci-dessus.

Cependant, le développement, depuis les années 70, de la valorisation des films photographiques et radiographiques repose essentiellement sur la récupération de l'argent présent sur ces films, récupération qui rend la séparation des polyesters possible économiquement. C'est pour cette raison que nombre de procédés font intervenir des traitements chimiques des films photographiques et radiographiques, la séparation de l'argent et du support (PET ou triacétate de cellulose) étant indissociable du recyclage de ces films.

### **B.1 - Traitement par voie chimique**

→ en solution alcaline

#### *\* Procédé Agfa (industriel)*

**Agfa-Gevaert**<sup>(135,136)</sup> a développé un procédé de traitement des films photographiques, mettant en jeu un lavage par une solution alcaline des films, ce qui permet de récupérer, après filtration, l'argent et le PET. Le principe de ce traitement est donné sur la figure n° 59.

Mais ce traitement s'applique, chez Agfa, sur des gisements de films constitués de 98 % de rebuts de production et seulement 2 % de déchets de films PET post-consommation.

Cela vient du fait que seuls les fabricants de films photographiques cherchent à valoriser ces produits, essentiellement pour la récupération de l'argent, et cette valorisation doit être, pour Agfa, en boucle fermée (films PET --> films PET). Les films PET post-consommation présentent souvent de fortes contaminations, inacceptables dans le cadre d'une valorisation en boucle fermée.

#### *\* Procédé Du Pont De Nemours*

**Du Pont de Nemours**<sup>(137, 138)</sup> travaille depuis de nombreuses années sur le sujet de la récupération de l'argent et des supports en PET ou triacétate de cellulose qui constituent les films photographiques et radiographiques.

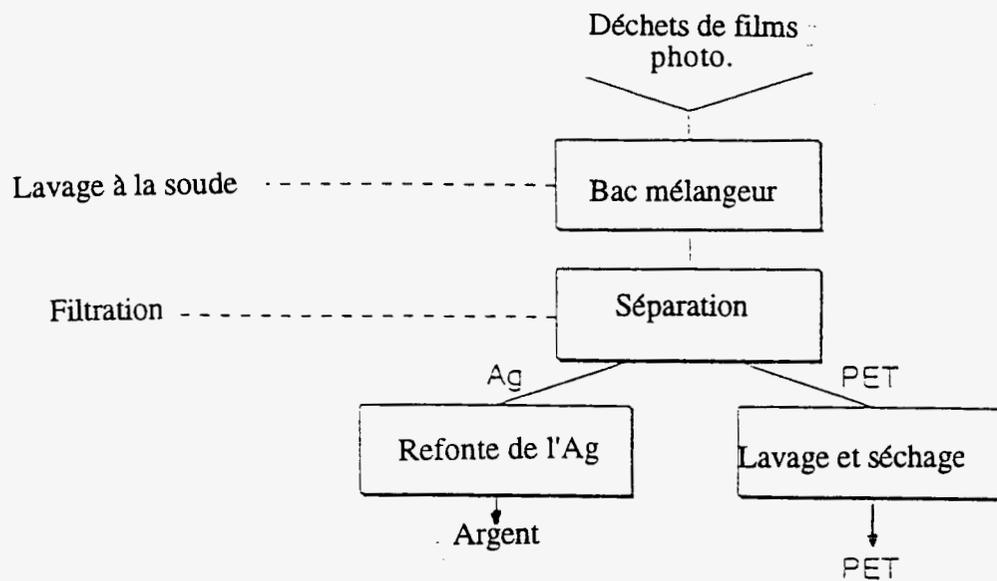


Figure n° 59 : Schéma de traitement Agfa

Le brevet récent <sup>(137)</sup> concernant le recyclage des films photographiques et radiographiques met en oeuvre :

- 1) le broyage des films en flakes
- 2) l'immersion de ces flakes dans une solution aqueuse alcaline additivée d'un surfactant (qui facilite la séparation gélatine / support).
- 3) le rinçage des flakes ainsi dénudés qui présentent alors une contamination de surface inférieure à 50 ppm.
- 4) la récupération des flakes en polyester pour un recyclage en boucle.

L'ajout de surfactant (ou d'un mélange de surfactants) a pour rôle de stabiliser la disposition des particules de gélatine formées, ce qui permet ensuite une séparation efficace et nette entre les flakes de PET et cette dispersion.

*\* Procédé Fuji*

Un brevet déposé par Fuji <sup>(142)</sup> concerne aussi le traitement des films photographiques en milieu basique (NaOH ou KOH), en présence de surfactant, afin d'extraire les supports polyesters.

**→ par réaction d'oxydo-réduction**

*\* Procédé Fuji*

**Fuji** <sup>(139, 140)</sup> a plutôt développé des procédés de traitement de films photographiques et radiographiques mettant en oeuvre des réactions d'oxydation afin de séparer les gélatines des supports en triacétate de cellulose.

Pour cela, Fuji a breveté plusieurs procédés. Le plus récent <sup>(139)</sup> consiste à oxyder les films photographiques dans une solution aqueuse contenant des peroxydes ou des oxydes d'halogénures, puis à les traiter par des solvants organiques. Les esters de cellulose ainsi obtenus permettent de fabriquer des films transparents ayant une bonne résistance au jaunissement thermique.

*\* Procédé Eastman Kodak (industriel)*

**Eastman Kodak** <sup>(152)</sup> a ainsi breveté un procédé de récupération de triacétate de cellulose issu de films photographiques mettant aussi en oeuvre des réactions d'oxydation.

Leur traitement comprend :

- 1) le broyage des films,
- 2) une première étape d'oxydation des films par un permanganate alcalin, en présence d'un acide fort,
- 3) une seconde étape d'oxydation avec un hypochlorite métallique,
- 4) le blanchissement en milieu acide des films obtenus précédemment,

afin de récupérer un triacétate de cellulose, présentant les mêmes propriétés spectrales que la résine vierge, qui peut être utilisée par la fabrication de nouveaux films.

#### *\* Procédé Partek*

Parallèlement aux procédés intégrant des traitements chimiques par réactions d'oxydation, Partek <sup>(153)</sup> a étudié le traitement chimique par réduction de films photographiques, constitués en particulier d'un support polyester revêtu d'une émulsion comprenant les composés argentés et qui adhère au support par l'intermédiaire de PVDC ou de PVC. Le traitement consiste à nettoyer les films polyesters dans une solution basique, en présence de  $\text{NaBH}_4$ , afin de retirer les halogénures métalliques liés aux films par l'adhésif PVDC ou PVC.

→ en milieu acide

#### *\* Procédé russe*

Enfin, les Russes <sup>(155, 156)</sup> ont étudié le traitement des films cinématographiques en PET ou en triacétate de cellulose en présence d'acide sulfurique, pour retirer en premier lieu la gélatine contenant les dérivés d'argent, ce qui conduit à la récupération des supports.

### **B.2 Procédés par voie enzymatique**

Un procédé développé par Fuji <sup>(140, 141)</sup> concerne le traitement par voie enzymatique des films cinématographiques qui sont constitués d'un support cellulosique, d'un apprêt de nitrocellulose et de gélatine.

Après broyage, ces films sont chauffés dans une solution aqueuse (mélange de polyéthylène glycol alkyl éther, de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  et d'une enzyme protéolytique) afin de séparer la gélatine des supports. Les flakes de support sont ensuite traités dans un milieu oxydant, blanchis, lavés et séchés pour donner de l'acétate de cellulose de couleur claire.

De nombreuses autres équipes ont appliqué ces procédés faisant intervenir un traitement en milieu alcalin, et/ou en milieu oxydant, pouvant être réalisés en présence de surfactants ou d'enzymes <sup>(143, 150)</sup>. Un procédé à l'échelle semi-industrielle a été proposé par une équipe japonaise <sup>(151)</sup> qui a développé un système continu, en présence d'enzyme protéolytique, pouvant traiter 1 000 kg/j de films.

### **B.3 Procédés par voie mécanique**

#### **\* Procédé Du Pont de Nemours**

Dès 1986, Du Pont de Nemours <sup>(138)</sup> a breveté un autre procédé permettant de séparer les supports des films photographiques en PET des autres matières (notamment PVDC et gélatine contenant les composés photosensibles) par application de forces de cisaillement au mélange.

Pour cela, les films sont broyés (2 - 20 mm) et mis en agitation dans une solution alcaline qui facilite la séparation entre la gélatine et le support. Le tout est mis sous forte agitation, à une température de l'ordre de 90°C, afin de créer des forces de cisaillement importantes dans le milieu. Ces forces de cisaillement provoquent la réduction de la taille des particules de gélatine et de PVDC, sans modifier celle des flakes de PET. Ces derniers sont ensuite extraits de la solution par filtration, lavés et séchés. Le PET régénéré présente une pureté satisfaisante à la fabrication de fibres et de films.

#### **\* Procédé japonais**

Un procédé original, exempt de traitement chimique, a été breveté au Japon <sup>(154)</sup>. Les agents photosensibles déposés sur le support polyester avec la gélatine sont enlevés par projection de sable de silice sur les films préalablement étirés. Bien qu'intéressant, ce procédé semble difficilement industrialisable.

**APPLICATION :**

**C - SECTEUR AUTOMOBILE**

**APPLICATION :**  
**C - SECTEUR AUTOMOBILE**

La complexité du nombre de plastiques présents dans les véhicules automobiles, ainsi que les différentes formulations existantes, rendent difficiles les opérations de recyclage. La valorisation de ces matériaux peut suivre deux voies bien identifiées qui sont :

- 1) le démontage des pièces intéressantes. C'est ce qui se pratique notamment sur des éléments tels que certains pare-chocs, les batteries. Cela correspond à la filière des **pièces démontées**. Dans cette filière, on retrouve aussi une partie des déchets issus des rebuts de production ou des échanges standards réalisés sur les véhicules.
- 2) le broyage de tout le reste du véhicule. Les pièces plastiques non accessibles ou ne présentant pas d'intérêt majeur sur le plan économique, se retrouvent dans les résidus de broyage avec d'autres matériaux, bien que ces pièces puissent représenter une fraction non négligeable du poids total des matières plastiques. Cela correspond à la filière des **résidus de broyage (R.B.)**. Parmi les matières plastiques encore présentes dans ces R.B., on peut citer :

- les tableaux de bord (PVC, PU, PP)
- les mousses de sièges (PU)
- les moquettes (PP, mousses de PU,..)
- les optiques (PC, PMMA)
- les pare-chocs en ABS ainsi que certaines pièces de carrosserie.

Nous suivrons donc ces deux approches pour identifier les techniques de séparation appliquées au traitement des déchets issus du secteur automobile, qu'ils proviennent de rebuts de production ou bien de véhicules en fin de vie.

### **C.1 - Pièces démontées**

Les pièces issues du démontage sont parfois fortement complexes, car constituées de l'assemblage d'éléments en diverses matières, y compris des inserts métalliques. De ce fait, les techniques de séparation pour ce type de produits sont assez variées.

#### **1.1 - Séparation par procédés mécaniques, en voie sèche ou mixte**

\* Tri électrostatique Hamos (R&D)

La société **Hamos GmbH** <sup>(157)</sup> développe actuellement un procédé de traitement, mettant en application le tri électrostatique par triboélectricité et la séparation pneumatique, sur des déchets plastiques issus de tableaux de bords de voitures, qui sont des structures multicouches.

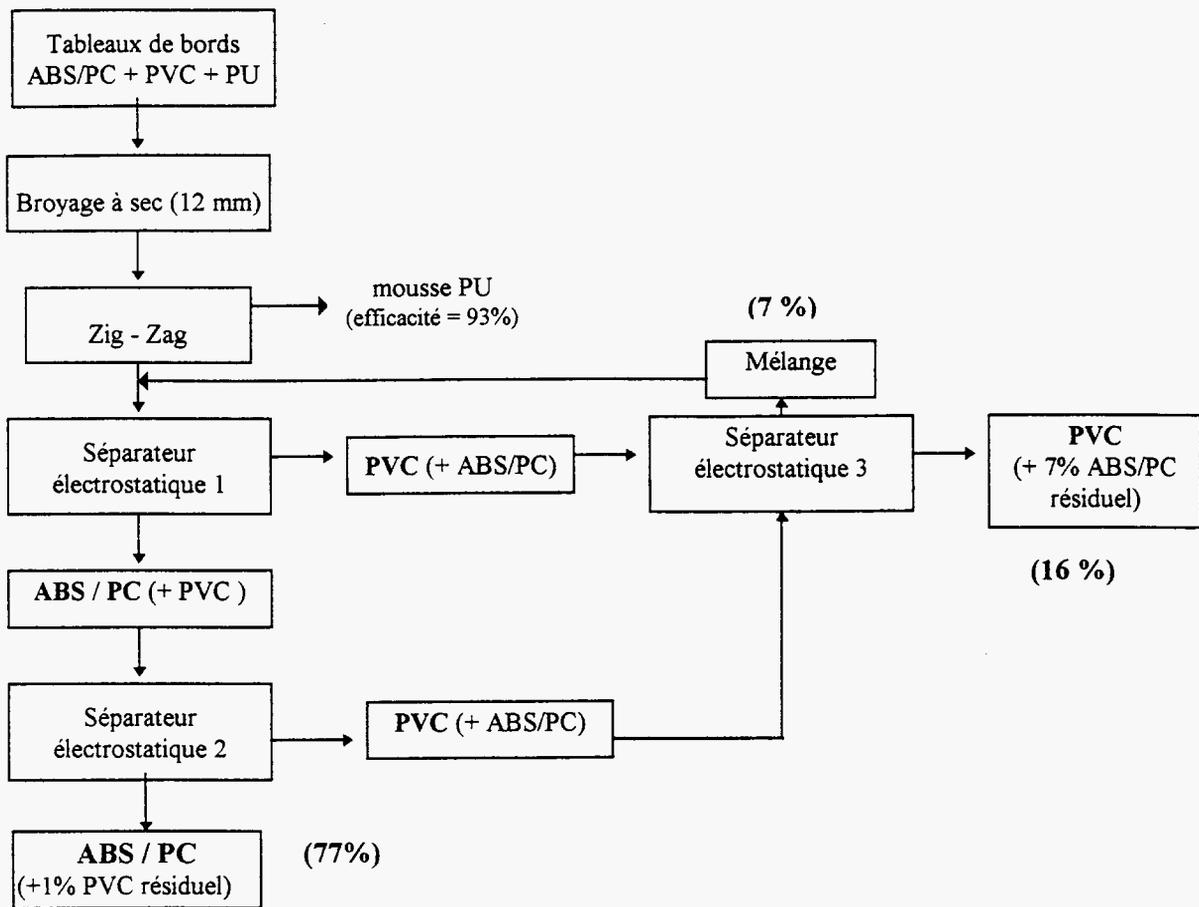


Figure n° 60 : Schéma de traitement Hamos

Un exemple est donné sur le traitement, à l'échelle du laboratoire, d'un mélange comprenant 85 % d'alliage ABS/PC, 7,5 % de peau PVC et 7,5 % de mousse PU, dont le but est la récupération de l'alliage ABS/PC. Le traitement est repris sur la figure n° 60.

Par ce procédé, l'alliage ABS / PC est récupéré avec un taux de pureté de 99 % et une efficacité de séparation de 84 %, annoncés par le constructeur.

Cependant, ces résultats, obtenus à l'échelle du laboratoire, à partir de déchets de production parfaitement identifiés et propres, nécessitent une validation à l'échelle industrielle. Des travaux de mise au point importants restent à réaliser avant l'industrialisation de cet équipement.

*\* Classification dimensionnelle / Classification pneumatique Davidson Textron (?)*

**Davidson Textron Inc.** <sup>(158)</sup> a breveté des procédés faisant intervenir des séparations mécaniques pour le traitement de pièces intérieures automobiles constituées de composants bicouches. Le procédé comprend les étapes suivantes, en prenant pour exemple le traitement d'un tableau de bord constitué d'une peau en PVC et de mousse PU :

- 1) broyage
- 2) séparation par cyclonage des fractions lourdes (PVC majoritaire) et légères (PU majoritaire)
- 3) tamisage de la fraction légère pour affiner la séparation des fines de mousses PU
- 4) séparation de la fraction lourde sur un second cyclone pour augmenter la pureté du PVC.

Les matières régénérées par ce procédé atteignent des taux de pureté de l'ordre de 95 % pour le PU et de 99 % pour le PVC.

Un second brevet <sup>(159)</sup> a notamment été déposé pour le traitement de matériaux bicouches ou tricouches. Il comprend les étapes suivantes :

- 1) broyage des pièces pour former un mélange de particules rigides et de particules de mousses séparées,
- 2) tamisage des particules broyées pour avoir une granulométrie homogène,
- 3) déchargement de l'électricité statique créée lors du broyage, notamment par pulvérisation d'un agent permettant de décharger l'électricité statique sur les particules mélangées,
- 4) séparation par lit fluidisé à air (vibrant).

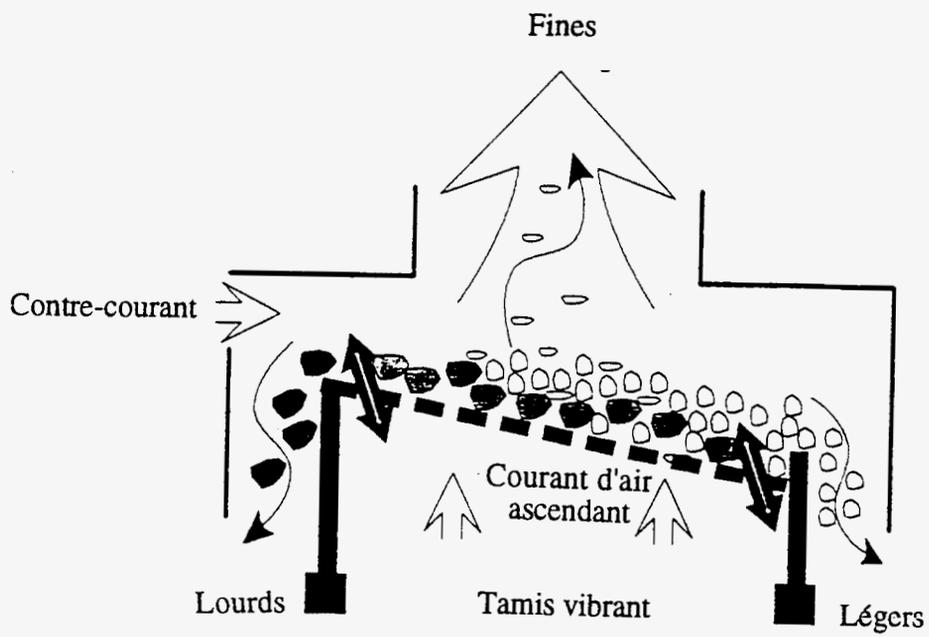


Figure n° 61 : Lit fluidisé Daimler-Benz

Dans le cas de composés bicouches de type PVC / PUR, le traitement ci-dessus permet d'obtenir une fraction PUR avec une pureté de 98 %, et une fraction PVC avec une pureté de 99 %.

Dans le cas de composés tricouches de type PVC / PS / PUR, une étape de compression des morceaux de PVC et de PS vient s'ajouter après le traitement par lit fluidisé. La pression appliquée au mélange PVC + PS modifie la forme des grains de PS (rigides) sans altérer la forme des grains de PVC (plus souple). Le mélange est aplati sur une surface gaufrée. Le mélange ainsi modifié subit à nouveau une étape de séparation par lit fluidisé à air, ce qui permet la séparation PVC / PS.

Si le composé tricouche comporte un film en résine ionomère à la place du PS, celui-ci va se retrouver avec la fraction PUR après la première étape de séparation par lit fluidisé. Le mélange PUR / film ionomère est alors traité par séparation électrostatique.

*\* Broyage / classification dimensionnelle Daimler-Benz (pilote industriel)*

**Daimler-Benz** <sup>(160, 161)</sup> a développé une unité pilote de traitement des structures multicouches des tableaux de bords, mettant en avant l'importance de la préparation des déchets lors de l'étape de broyage, en partenariat avec le constructeur de broyeur **Häpple**.

Par une application finement optimisée de pression, de forces de cisaillement et d'impact, l'étape de broyage conduit à la libération complète des trois matières constitutives des tableaux de bords : mousse PUR, peau et insert.

La mousse, divisée finement, est extraite par tamisage directement lors de l'opération de broyage, dont la durée est de plus optimisée pour la préparation des deux autres constituants. Le mélange peau/insert est ensuite séparé sur une table à lit fluidisé (Figure n° 61).

Ce traitement permet d'atteindre des taux de pureté très élevés :

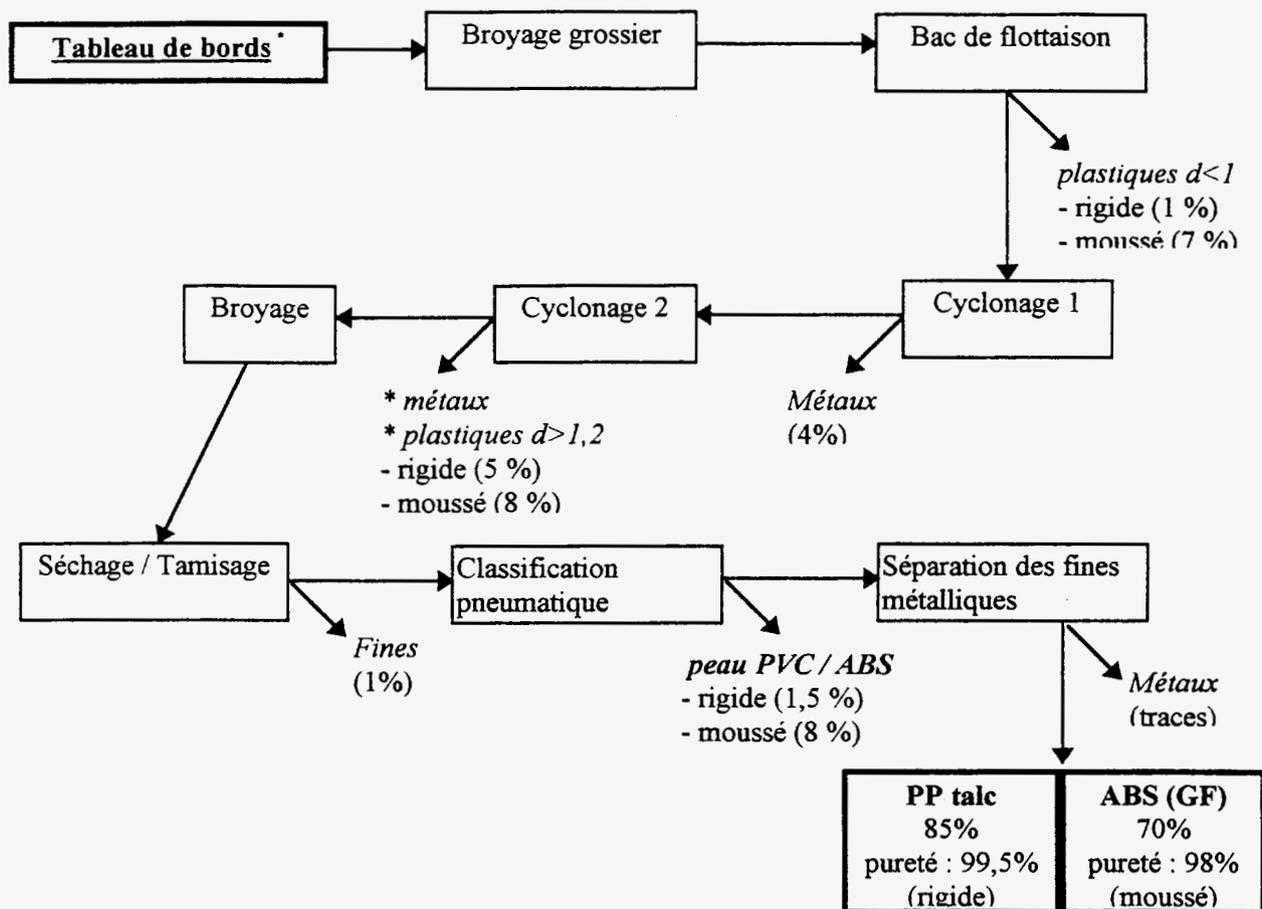
- pureté supérieure à 99,9 % pour l'insert (thermoplastique, souvent renforcé fibres de verre)
- pureté supérieure à 98 % pour la peau (ABS/PVC)

L'innovation du système de broyage est qu'il réduit avec une taille identique les particules de peau et d'insert, ce qui permet ensuite d'appliquer une séparation purement mécanique, fonction seulement de l'épaisseur (et donc du poids relatif) des particules.

**NB** : Une seconde société spécialisée dans le broyage, la société **WIPAG**, a aussi développé une catégorie de broyeur permettant la division optimisée des matières plastiques constitutives des produits multicouches, tels les tableaux de bords.

***Les deux technologies de broyage, Wipag et Häpple, sont actuellement les plus perfectionnées au niveau de la préparation des déchets multicouches.***

Automobile : I1, procédé RECAP



(\*) Tableaux de bords de différentes fabrications :

- (1)- classe de base : support PP , multimatères
- (2)- classe moyenne : support ABS + peau PVC
- (3)- classe moyenne + : support ABS (FV) + PUR semi-rigide + peau PVC
- (4)- classe haute : support ABS + PUR semi-rigide + peau PVC

Figure n° 62 : Ligne de traitement proposée par RECAP

*\* Association Autovinyle (R&D --> pilote industriel)*

En France, la problématique du traitement des structures multicouches utilisées dans le secteur automobile a débouché sur la création de **l'association Autovinyle** en Janvier 1997<sup>(162)</sup>, qui regroupe onze industriels de la filière automobile. Cette association a pour vocation de développer le recyclage des pièces en PVC des VHU, en particulier les revêtements dans l'habitacle, ainsi que des déchets PVC de fabrication de l'industrie automobile.

En application à cette volonté, plusieurs études sont en cours actuellement sur ces types de déchets de matières plastiques, notamment en partenariat avec la société de régénération de déchets PVC **RM Plast SA**, mais elles demeurent, à ce jour, confidentielles.

*\* Programme RECAP (R&D --> pilote industriel)*

Dans le cadre du **programme européen RECAP** (REcycling CAr Plastics)<sup>(163, 164)</sup>, un procédé efficace de séparation applicable aux pièces démontées a été développé.

Ce procédé exploite la différence de densité entre les matières plastiques considérées. Il comporte essentiellement deux étapes, une première en voie sèche et une seconde en voie humide, incluant notamment un bac de flottaison innovant et un procédé cyclonique. Il permet de recycler les différentes matières avec une efficacité de séparation supérieure à 80 %, dès lors que ces matières plastiques possèdent une différence de densité supérieure à 0,15 g/cm<sup>3</sup>.

La figure n° 62 précise les différentes étapes de ce traitement.

L'unité pilote mise en place pour la réalisation de ce traitement a une capacité de 200 à 400 Kg/h, en fonction du type et de la forme des déchets traités : tableaux de bords, pare-chocs.

Ce procédé permet de séparer le complexe ABS/PVC/PU issu des planches de bord avec une efficacité de 80 % et des taux de pureté de 99,7 % pour l'ABS et 97 % pour la peau PVC (la mousse PUR est éliminée). Des résultats similaires sont obtenus à partir de tableaux de bords à base de PP chargé talc (matière utilisée en substitution à l'ABS).

A partir de pare-chocs, le procédé décrit sur la figure n° 62 est simplifié et passe uniquement par les étapes de régénération en voie humide. Cela permet d'obtenir une fraction PP (ou PP + PE) présentant un degré de pureté supérieur à 99,5 %. Mais les pare-chocs peints présentent toujours le problème d'une perte de résistance à l'impact.

Enfin, la mousse PUR issue des sièges automobiles peut être récupérée sans la couverture textile qui l'entoure, les parties métalliques sont éliminées par broyage/déferrailage, et cela conduit à une fraction PUR pure. Des développements dans le broyage ( $\phi$  0,5 - 5 mm) et la micronisation ( $\phi$  100 - 200  $\mu$ m) de ces mousses PUR ont ouvert de nouvelles possibilités pour leur recyclage mécanique : incorporation de poudre PUR recyclée dans des formulations de PU, de broyats de PU dans la fabrication de moquettes,

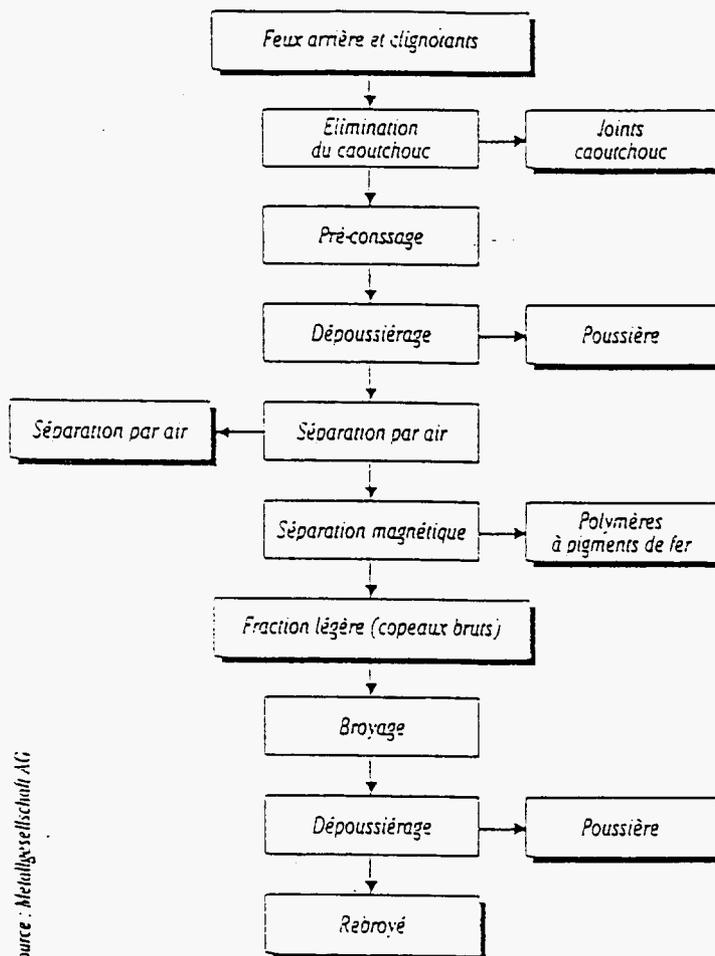


Figure n° 63 : Schéma de traitement d'appareils ménagers Metallgesellschaft

dans la fabrication de panneaux intérieurs automobiles. Cette technologie de broyage / micronisation a fait l'objet d'un dépôt de brevet.

D'un point de vue économique, il a été estimé qu'une unité industrielle rentable devra avoir les caractéristiques suivantes :

- capacité : 8 000 T/an, sur trois gisements (tableaux de bords rigides (40%) et moussés (40%), pare-chocs (20%))
- investissement : 1,3 M ECU (soit 8,5 M FF)
- coût de traitement : 240 ECU / T (soit 1 560 FF / T)

L'estimation de la marge, après revente, de différentes matières est de :

- \* + 220 ECU / T (soit 1 450 FF / T) pour l'ABS-FV
- \* + 168 ECU / T (soit 1 100 FF / T) pour le PP
- \* - 85 ECU / T (soit - 560 FF / T) pour le PP chargé talc

Remarque : le gisement potentiel de matières plastiques à recycler demeure supérieur en quantité aux besoins des constructeurs automobiles : le développement d'autres débouchés sera nécessaire.

*NB* : Les coûts de démantèlement, de prétraitement et de logistique ne sont pas compris dans le coût de traitement annoncé.

\* Röhm, Porsche et Metallgesellschaft : classification pneumatique (R&D)

En 1993, **Röhm, Porsche et Metallgesellschaft** <sup>(165)</sup> ont mené conjointement des études sur le recyclage du PMMA issu des feux arrières et clignotants de différents véhicules en fin de vie (pièces démontées) et rebuts de production. Le schéma de traitement proposé est donné sur la figure n° 63.

Le rebroyé subit en final une étape d'extrusion-filtration. L'ensemble du traitement, réalisé à l'échelle du laboratoire, conduit à un degré de pureté du PMMA satisfaisant pour un moulage par injection sans défaut. Dans ce cas précis, le PMMA recyclé a servi à la fabrication de logements de feux arrières.

Une collaboration a vu le jour pour transposer ces résultats à l'échelle technique des grandes séries, regroupant ainsi **Röhm, HM-Konsortium für Werkstoff-Recycling, Hüls AG, Metallgesellschaft AG** et des partenaires de l'industrie automobile. Nous ne disposons pas d'informations supplémentaires concernant le développement industriel de ce traitement.

\* Broyage / tamisage / extrusion-filtration (?)

Une PME d'ingénierie japonaise <sup>(166)</sup> a développé, en 1993, un système de recyclage basé sur l'utilisation d'un concasseur à microvibrations sans échauffement, qui a fait l'objet

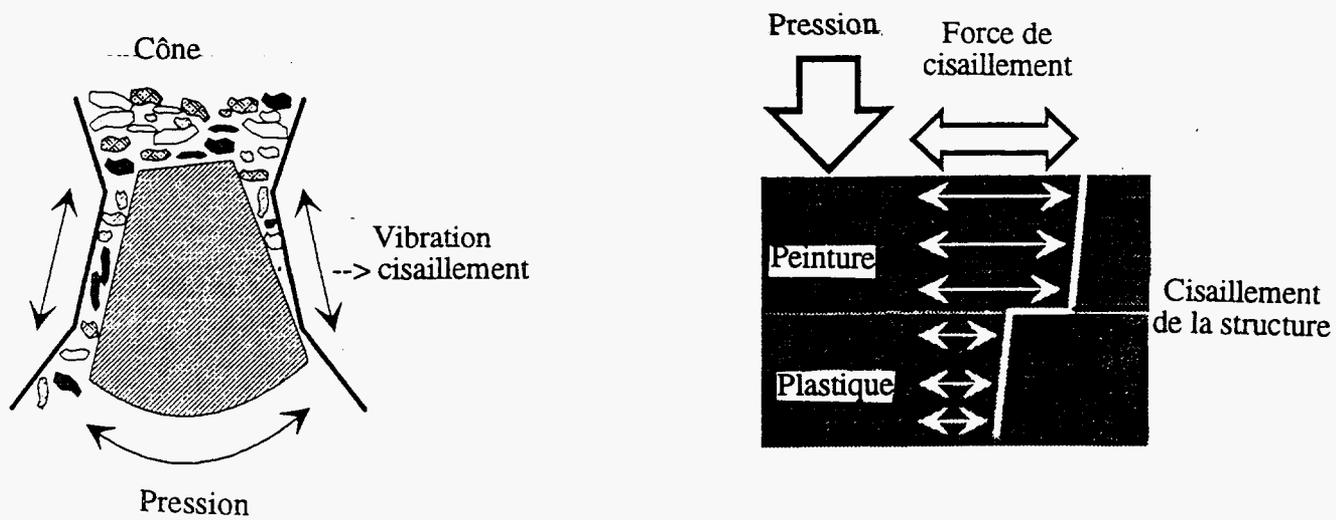


Figure n° 64 : Broyeur à cône Daimler-Benz

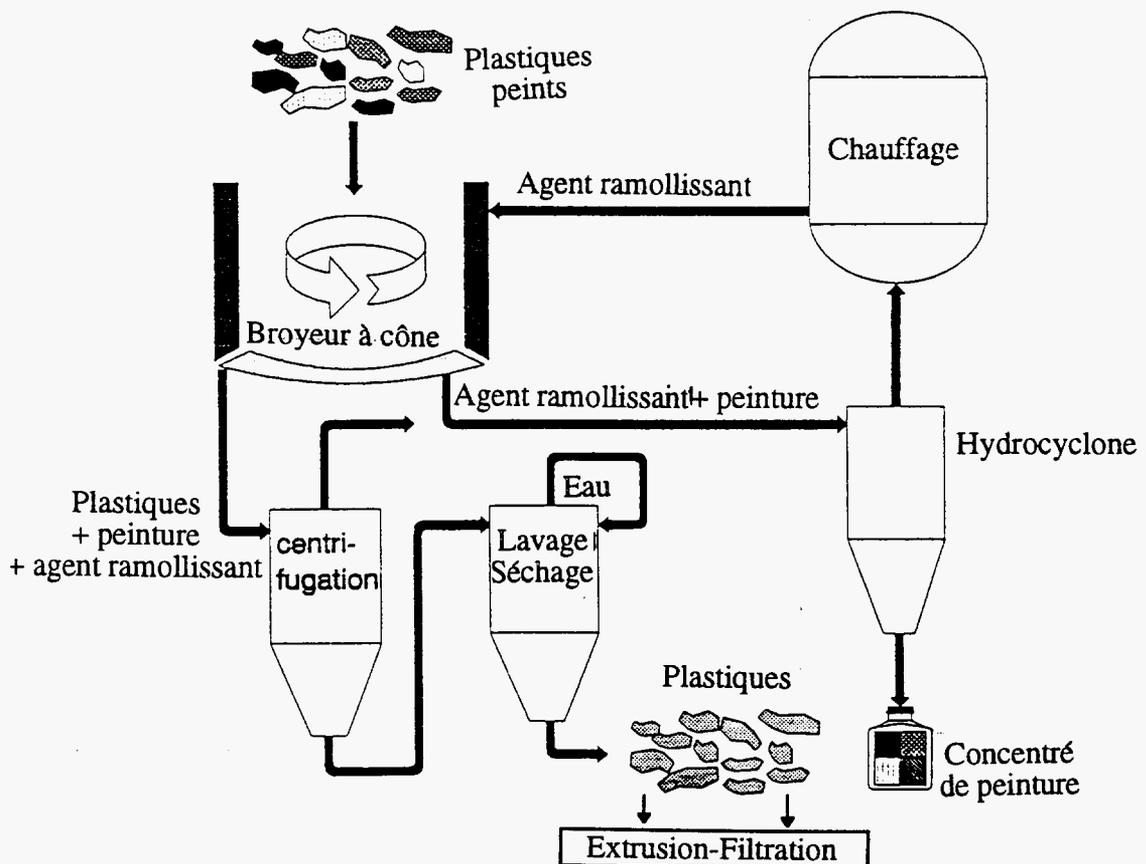


Figure n° 65 : Schéma de traitement des pare-chocs Daimler-Benz

d'un dépôt de brevet. Une dizaine d'installations sont déjà opérationnelles au Japon, notamment chez Mazda qui utilise de la matière recyclée pour les pare-chocs de certains de ces modèles.

Ce procédé convient pour séparer la peinture, le métal, le contre-plaqué, le verre, des matières plastiques et peut permettre de séparer des matières plastiques à deux couches.

Dans le cas particulier des pare-chocs, contenant environ 2,7 % de peinture, les pièces sont déchiquetées et concassées à 4 mm, puis elles sont traitées dans une presse conique qui retire la peinture par compression, vibration, polissage et concassage. La couche de peinture est détachée de la matière plastique qui est polie et transformée en flocons. A ce niveau, il reste environ 0,4-0,5 % de peinture qui est éliminée dans un broyeur tamiseur universel : la peinture résiduelle est éliminée par bombardement dans le système rotatif, cisaillement par production de chaleur et polissage. La peinture est alors transformée en particules et séparée de la résine plastique par un cyclotron. La séparation s'achève par une étape d'extrusion-filtration qui permet de retirer la pollution résiduelle en peinture (inférieure à 0,1 %).

*\* Daimler-Benz : broyage différentiel / centrifugation / extrusion-filtration (R&D ?)*

**Daimler-Benz** <sup>(160)</sup> a aussi travaillé sur la séparation plastiques / peintures par broyage différentiel, pouvant inclure l'ajout d'un agent chimique ayant pour rôle de ramollir la peinture (additifs tels les polyols ou les sels alcalins).

Le broyage s'effectue dans un broyeur à cône provoquant de fortes forces de cisaillement. Ces forces amorcent la séparation à l'interface plastiques / peinture, qui est moins résistante que les matériaux eux-mêmes (Voir Figure n° 64 ).

80 % de la peinture sont alors extraits par centrifugation, ce qui ramène la teneur en peinture dans la fraction plastique aux alentours de 0,4 - 0,5 %. La peinture résiduelle est retirée lors de l'étape de granulation de la matière plastique par extrusion-filtration.

La figure n° 65 présente l'unité de traitement proposée par Daimler-Benz.

Le coût du traitement des pare-chocs peints annoncé est de 12 FF / pare-chocs, coût incluant le démontage, le retrait des inserts métalliques et le procédé de régénération <sup>(161)</sup>.

*\* Nissan : classification pneumatique (industriel)*

**Nissan** <sup>(167)</sup> applique la séparation par zig-zag pour la séparation de complexes PVC / mousses de PUR issus de sièges automobiles usagés. Les taux de pureté et les rendements atteints ne sont pas précisés.

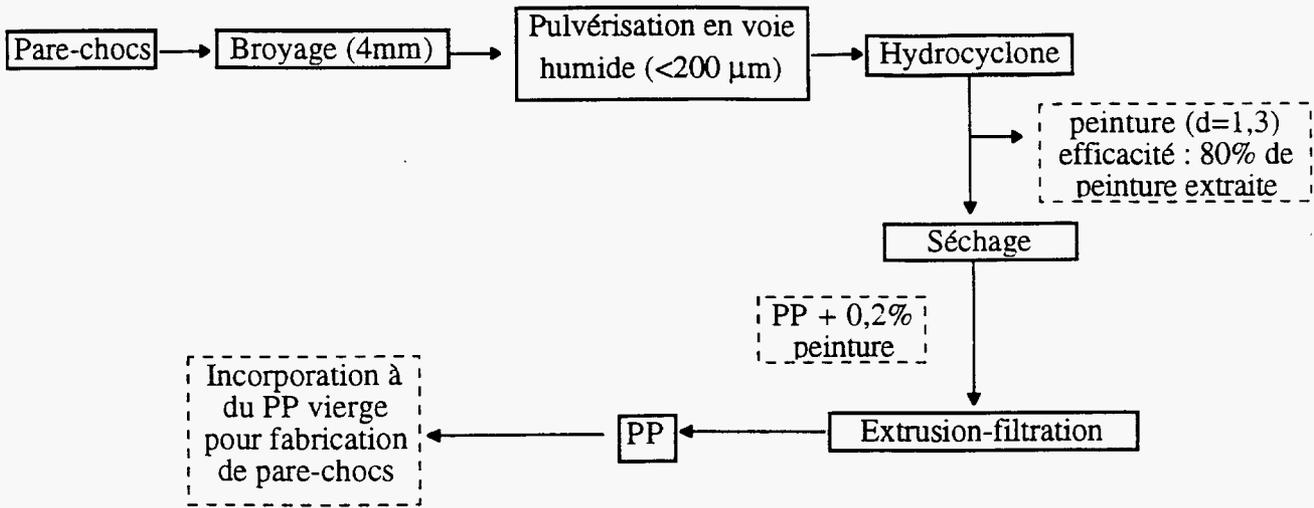


Figure n° 66 : Schéma de traitement des pare-chocs Sumitomo

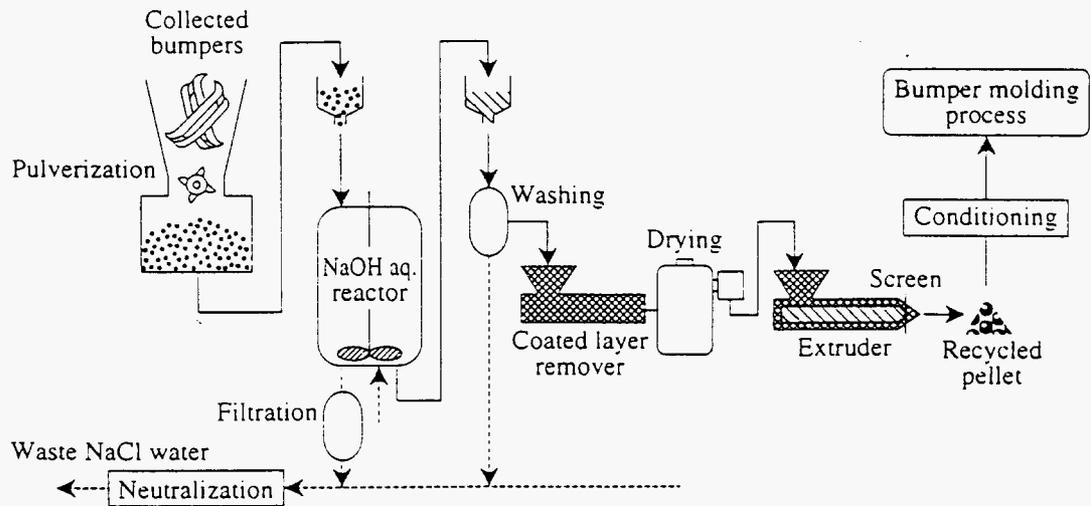


Figure n° 67 : Schéma de traitement des pare-chocs Nissan Motor

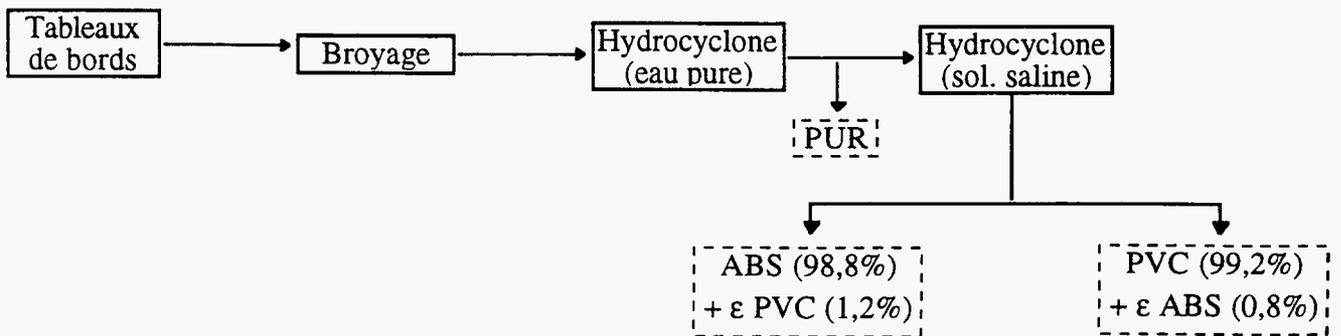


Figure n° 68 : Schéma de traitement par hydrocyclonage Teijin

*\* Broyage/pulvérisation de pare-chocs de Sumitomo Chemical Co., Ltd (industriel ?)*

Cette société japonaise propose une technologie de traitement des pare-chocs peints <sup>(168)</sup> incluant un broyage, une pulvérisation et une séparation des matériaux plastiques / peinture, finement divisés, par hydrocyclonage. Le schéma de traitement est donné sur la figure n° 66.

Ce procédé conduit à une qualité de PP ne contenant plus que des traces de peintures (taille des particules < à 30 µm) ce qui rend possible sa réincorporation à hauteur de 30 % massique dans la fabrication de nouveaux pare-chocs.

*\* Broyage/pulvérisation/modification chimique de pare-chocs de Nissan Motor (Industriel)*

**Nissan Motor** et **Mitsui Petrochemical** <sup>(169)</sup> ont développé un procédé de valorisation des pare-chocs incluant, en combinaison, un traitement mécanique par broyage et pulvérisation et un traitement chimique, en présence de soude aqueuse, permettant de diviser la peinture et le plastique plus efficacement.

Le schéma de traitement est donné sur la figure n° 67.

Ce procédé conduit à un PP de qualité suffisante pour sa réincorporation dans la fabrication de nouveaux pare-chocs.

## 1.2 - Séparation par procédés mécaniques, en voie humide

*\* Hydrocyclonage de Teijin Engineering Co., Ltd (pilote industriel)*

La société japonaise **Teijin Engineering** <sup>(168)</sup> a mis en place une unité pilote de traitement par hydrocyclonage des tableaux de bords multicouches (support ABS + mousse PUR + peau PVC), d'une capacité de 500 kg/h.

La mousse PUR ( $d = 0,18$ ) est séparée par un hydrocyclone utilisant de l'eau pure, tandis que la séparation ABS ( $d = 1,03$ ) et peau PVC ( $d = 1,22$ ) s'effectue par un hydrocyclone utilisant une solution saline.

Le schéma de traitement est représenté sur la figure n° 68.

**N. B.** : Rien n'est précisé en ce qui concerne l'étape de broyage, opération de préparation du déchet primordiale pour une séparation ultérieure efficace des différentes matières.

*\* Flottaison (R&D)*

Un brevet japonais <sup>(170)</sup> propose l'utilisation parallèle de tri densimétrique par bain de flottaison et de techniques acoustiques, telles que les ultrasons, pour augmenter les performances de séparation des opérations de tri. Nous n'avons pas obtenu de renseignements complémentaires concernant cette technologie, qui semble être restée dans le domaine de la R&D.

*\* Flottation-moussage de Ford (R & D)*

Ford <sup>(171)</sup> participe à un programme global sur la valorisation des VHU aux USA, intitulé "Vehicule Recycling Partner Ship" (VRP), associant notamment Chrysler, General Motors, l'APC, l'ANL, l'Institute of Scrap Recycling Industries, qui est géré par l'USCAR.

Dans le cadre de ce programme, les partenaires tentent actuellement de développer une technique de tri basée sur la séparation par densité des matières plastiques, par application du procédé de flottation-moussage aux pare-chocs et aux pièces d'habitacles intérieurs.

Ce programme de R & D intègre l'étude de l'incorporation de plastifiants et/ou d'agents dépressants lors de la flottation-moussage. A titre d'exemple, 99 % des caoutchoucs contenus dans des R.B. ont pu être extraits grâce à l'ajout d'un additif spécifique. Les résultats semblent être encourageants.

Cette mission fera l'objet de la rédaction d'un rapport en 1998, étant entendu que ce programme VRP sera reconduit jusqu'en 2001.

*\* Flottation-moussage de Daimler-Benz (R&D - pilote industriel)*

Daimler-Benz <sup>(172)</sup> a travaillé sur la séparation des matières plastiques par une technologie de flottation-moussage, faisant intervenir une étape de conditionnement des matières non plus par l'intermédiaire de réactifs chimiques mais par l'utilisation d'une activation des surfaces par plasma.

La modification des propriétés de surface des matériaux par plasma a déjà été développée pour optimiser les opérations de laquage, de peinture, de collage, etc..., et son utilisation pour la séparation des matières plastiques par flottation-moussage est tout à fait innovante, puisqu'elle permet de s'affranchir des problèmes de choix des réactifs chimiques et surtout de la pollution des eaux utilisées lors du traitement.

L'exposition des matières plastiques à un plasma faible pression a pour conséquence une diminution de la mouillabilité de leurs surfaces. Ce phénomène étant plus ou moins accentué selon les matières plastiques, il est donc possible d'augmenter sélectivement l'hydrophobicité d'un des constituants, afin de faciliter l'accrochage des bulles d'air à sa surface et de le faire flotter.

- 1 Vanne (de pression)
- 2 Manomètre
- 3 Vanne
- 4 Débit mètre
- 7 Filtre des fines particules
- 9 Pompe
- 10 Vanne de contrôle
- 11 Filtre des grosses particules
- 13 Bain d'eau (V = 150 l)

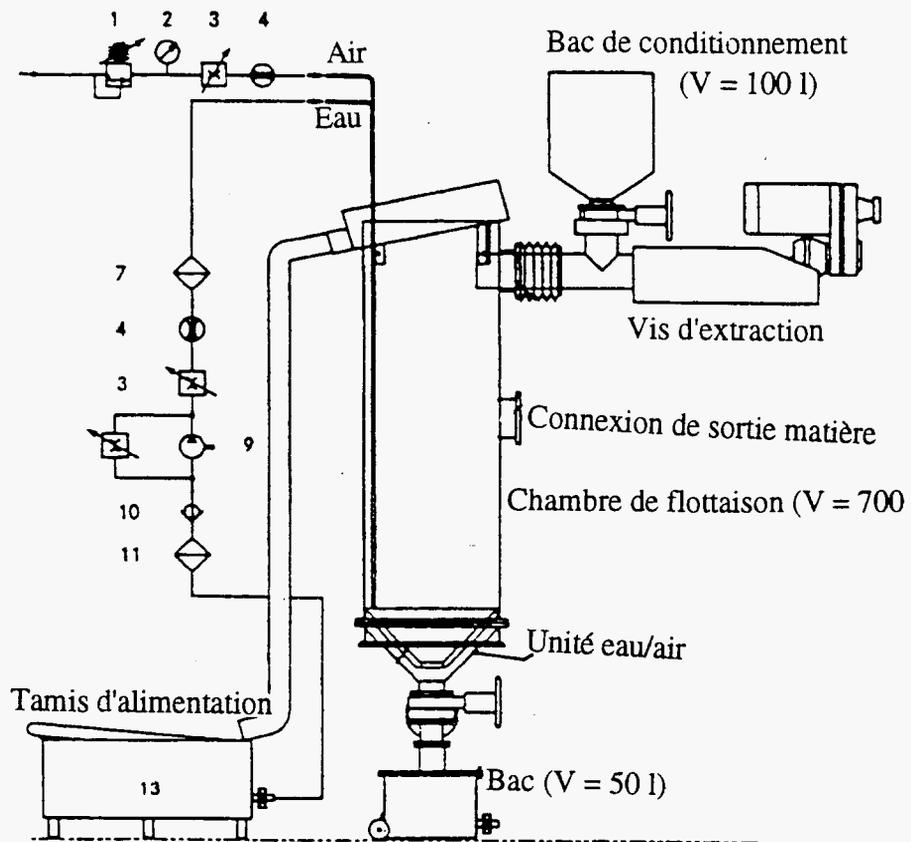


Figure n° 69 : Schéma de traitement par flottation-moussage Daimler-Benz

De nombreux essais ont été réalisés à l'échelle du laboratoire, sur des séparation de mélanges à deux composants et ont conduit aux résultats suivants :

Mélanges de matières plastiques	Rendement de séparation	Pureté
<b>ABS</b> / autres fractions plastiques (circuits de refroidissement)	95 %	99 %
<b>PC-PBT</b> / PE (pare-chocs)	97 %	99 %
<b>PP-FV</b> / PP (pièces intérieures)	80 %	99 %
<b>PA-PPO</b> / PP-FV (panneaux de portières)	99 %	99 %

Ces essais ont conduit à la réalisation d'une unité pilote qui est présentée sur la figure n° 69, qui a permis d'obtenir les résultats de séparation suivants :

Mélanges de matières plastiques	Rendement de séparation	Pureté
<b>ABS</b> / PC (4 - 6 mm)	98 %	99 %
<b>ABS</b> / PC (2 x 25 x 50 mm))	98 %	98 %

Ce nouveau procédé semble intéressant, mais il nécessite une validation industrielle sur déchets réels afin de confirmer l'efficacité de la séparation. Cependant, en l'état actuel des techniques, l'activation par plasma est une technologie encore très onéreuse et un frein économique pour son application dans la séparation des matières plastiques.

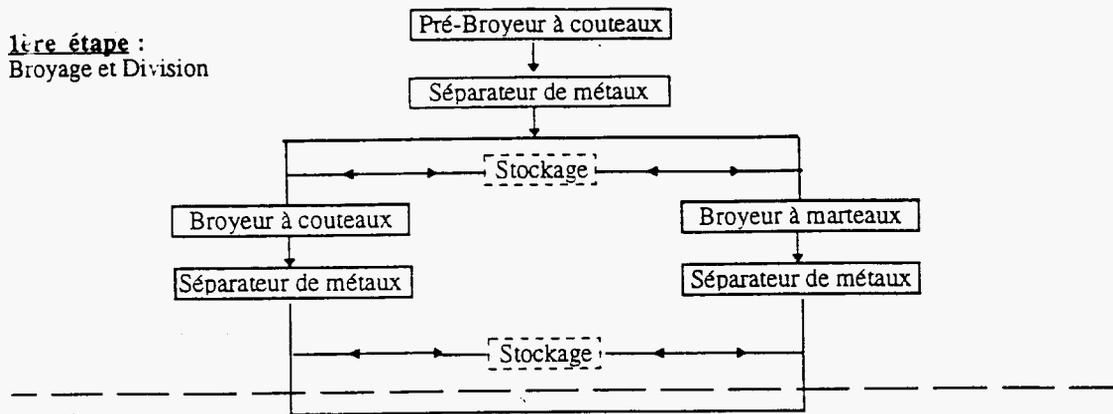
### **1.3 Comparaison générale des techniques en voie sèche / voie humide**

Graser et al. <sup>(173)</sup> résume, par un schéma général publié en 1995, le traitement des pièces démontées, en comparant les techniques en voie sèche et en voie humide. Cet état de l'art du traitement des plastiques issus de pièces démontées présente une approche selon 3 niveaux d'opération :

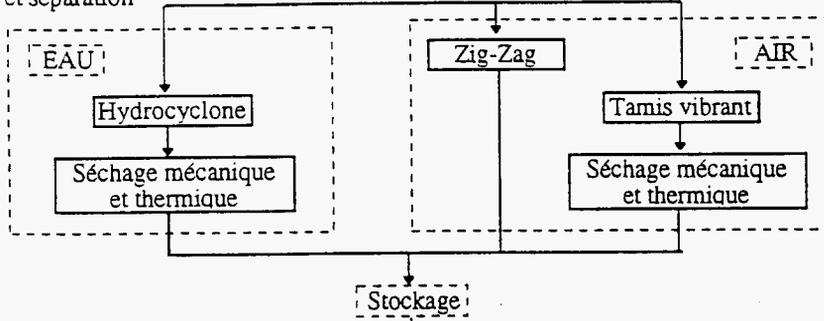
- 1<sup>ère</sup> étape : broyage et division, qui correspond à la préparation des déchets pour leur traitement ultérieur,
- 2<sup>ème</sup> étape : purification et séparation, où les matières sont effectivement triées,
- 3<sup>ème</sup> étape : recyclage, correspondant à la transformation des matières séparées sous des formes commercialisables.

On retrouve, sur la figure n° 70, toutes les techniques de séparation en voie sèche et humide les plus développées en milieu industriel.

**1<sup>ère</sup> étape :**  
Broyage et Division



**2<sup>nd</sup> étape :**  
Purification et séparation



**3<sup>ème</sup> étape :**  
Homogénéisation,  
Granulation,  
Formulation

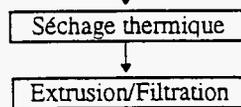


Figure n° 70 : Techniques de séparation voie humide/voie sèche

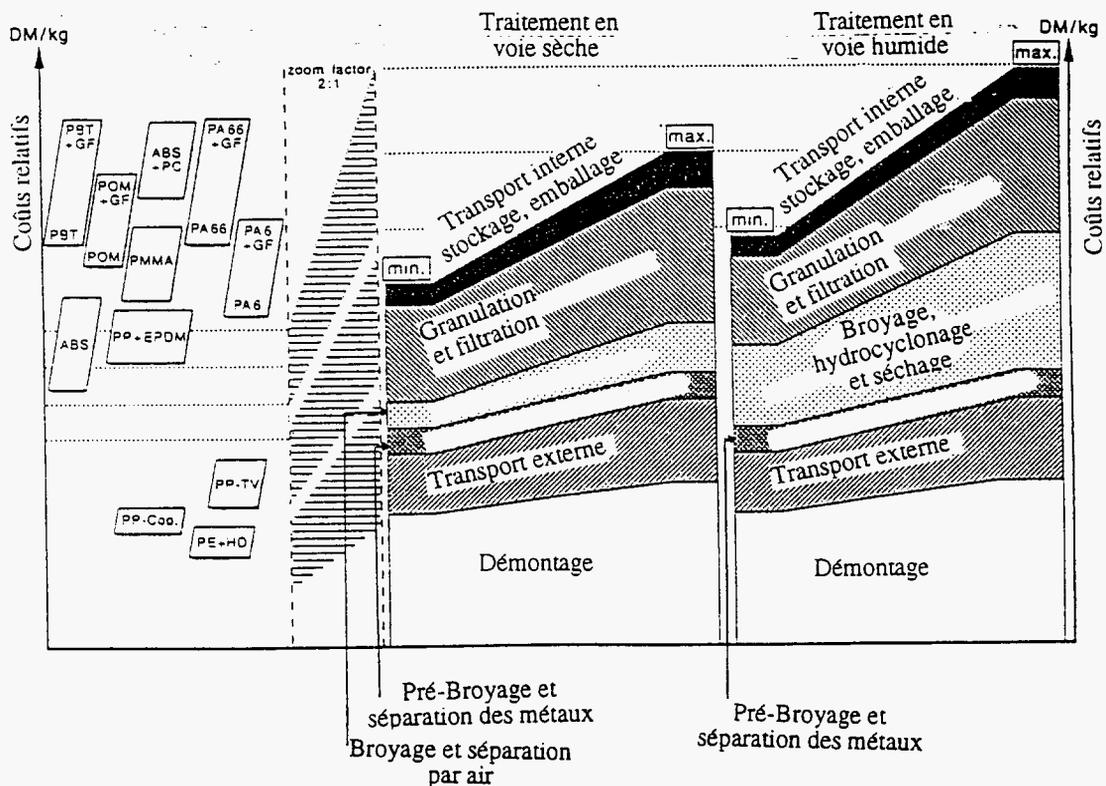


Figure n° 71 : Etude économique du traitement des matières plastiques

Une étude économique est réalisée pour chaque type de matière plastique, et permet de comparer les impacts des différents traitements par type de résines, en comparaison avec le coût des résines vierges. Ces valeurs sont rassemblées dans le graphique de la figure n° 71 et nous donnent une idée de l'aspect économique du recyclage des matières plastiques issues de pièces démontées.

**Légende : Echelle des coûts**

- traitement en voie sèche	: min. = 1,00 DM / Kg - MAX. = 1,40 DM / Kg
- traitement en voie humide	: min. = 1,30 DM / Kg - MAX. = 1,80 DM / Kg

#### 1.4 Procédés incluant des technologies de détection

*\* FORD : détection par chargement triboélectrique / détection par IR (R&D)*

L'Université de Southampton a développé, en collaboration avec le constructeur automobile Ford<sup>(174)</sup>, un appareil d'identification des matières plastiques, fonctionnant sur le principe du chargement spécifique des matières plastiques par triboélectricité. Les matières sont chargées par triboélectricité et les charges générées par les matières sont comparées à une banque de données.

Cet appareil est simple et facile d'utilisation. Cependant le temps d'analyse est de 2 secondes, ce qui demeure trop faible dans le cadre d'une intégration d'un tel module d'identification sur une unité de tri automatique.

Par contre, cet appareil demeure intéressant dans le cadre de l'identification de pièces plastiques issues de démontage. Une limitation demeure sur le nombre de matières plastiques reconnues, qui était de quatre en 1994 et devrait augmenter progressivement suite aux développements en cours.

Ford, toujours en partenariat avec l'Université de Southampton<sup>(175)</sup>, s'est de surcroît intéressé à la spectroscopie infrarouge par réflexion, et a développé un spectromètre de détection MIR, en réflexion, permettant d'analyser des produits tels que les pièces automobiles démontées, avec un temps d'analyse de l'ordre de 6 secondes. De nombreux essais, sur des matières telles que PP, PP/EPDM, PA, ABS, PMMA, PC, PDM, PBT, PVC, PE, PEEK, ... ont été réalisés, et ont démontré la viabilité de cette technique. L'appareil utilisé ressemble beaucoup au système développé par Brüker.

*\* BMW : détection MIR Brüker (industriel)*

BMW a travaillé en collaboration avec Brüker<sup>(176-178)</sup> pour la mise au point de l'utilisation de la détection MIR, en réflexion, dans le cadre d'usine de démontage de véhicules. Les échantillons sont analysés en 1 à 3 secondes, mais quelquefois l'analyse définitive nécessite plusieurs identifications successives.

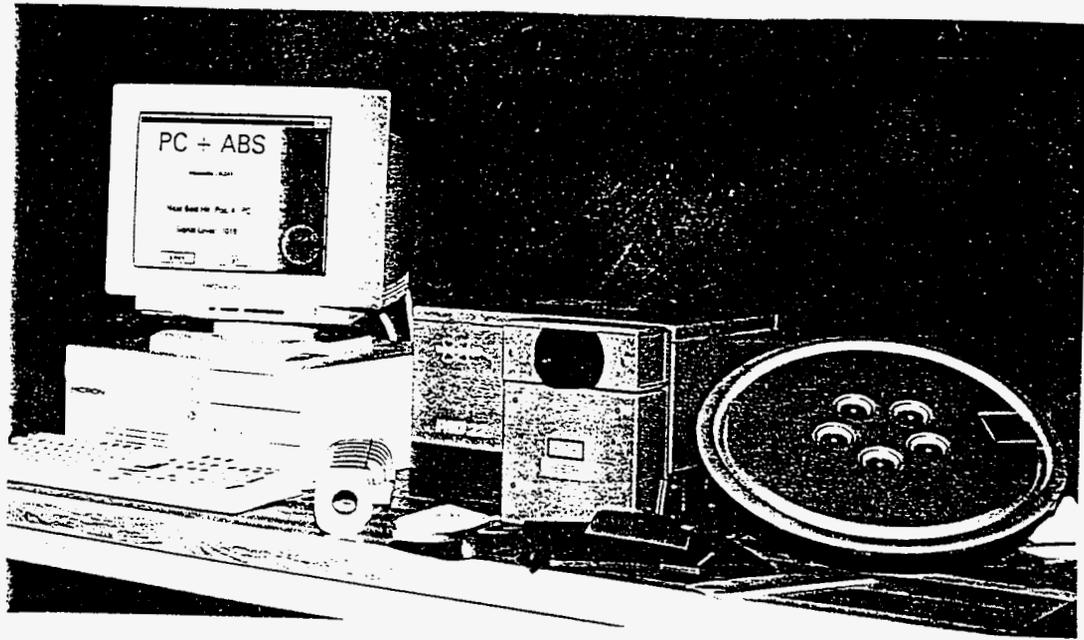


Figure n° 72 : Appareil de détection MIR de Brüker

Brüker assure cependant un taux d'erreur, lors de la détection, inférieur à 1 %.

L'équipement utilisé permet l'identification d'une trentaine de polymères, et l'analyse d'additifs retardateurs de flamme couplés à une résine est depuis peu réalisable. L'équipement de Brüker est ainsi capable d'identifier des familles de retardateurs de flamme telles que les bromés, les phosphatés, etc ... , ce qui permet de savoir si le plastique contient ou non un additif non autorisé à ce jour.

L'appareillage proposé par Brüker est donné sur la figure n° 72.

La distance maximum entre le détecteur et la pièce n'étant que de quelques cm, l'automatisation de cette identification n'est, à ce jour, pas envisageable. Le centre de démantèlement de BMW utilise cet équipement qui a permis l'identification de plus de 250 000 pièces démontées depuis 1993.

Le coût de cet appareil est de 180 KF brut, 210 - 250 KF avec le software. Il est actuellement mis à l'épreuve chez différents constructeurs automobiles, dont Renault.

***N.B.** : cet appareil est aussi très utilisé dans le secteur des produits électriques/électroniques. Il semble être un des outils les plus performants actuellement.*

*\* Renault : tri optique (R&D)*

Le constructeur automobile **Renault** <sup>(179, 180)</sup> a travaillé sur la mise au point de tri optique, en s'inspirant de procédés utilisés dans l'industrie alimentaire pour séparer les cailloux des petits pois. Après broyage, des PMMA de différentes couleurs, que l'on trouve dans les équipements de signalisation de véhicules, peuvent ainsi être séparés avec un rendement proche de 100 %. En Février 1996, ce procédé était au stade d'étude laboratoire. Depuis, aucune application industrielle n'a été développée.

***NB** : Des études son actuellement en cours, toujours pour le recyclage des feux de véhicules, axées plus spécifiquement sur des opérations de broyage différentiel pouvant être suivi d'étapes de classifications dimensionnelles ou pneumatiques.*

*\* FT-NIR portable d'Opt Research Inc. (Commercial)*

**Opt Research Inc.** <sup>(181)</sup> a développé un spectromètre NIR- FT en réflexion, ultra-compact et portable, appelé le Plastiscan (poids : 1,8 kg, taille : 150 x 250 x 55 mm). Cet appareil peut être utilisé aisément lors des opérations de démontage/identification des pièces plastiques automobiles. Il suffit de passer la pièce devant l'objectif : l'utilisation de filtre AOTF et d'un software d'exploitation du signal permettent l'identification de la résine en moins de 0,5 sec. Une trentaine de résines peuvent ainsi être analysées, avec une efficacité de reconnaissance de 99 %.

Coût approximatif : 30 000 \$ (environ 150 KF)

# PlastiScan™

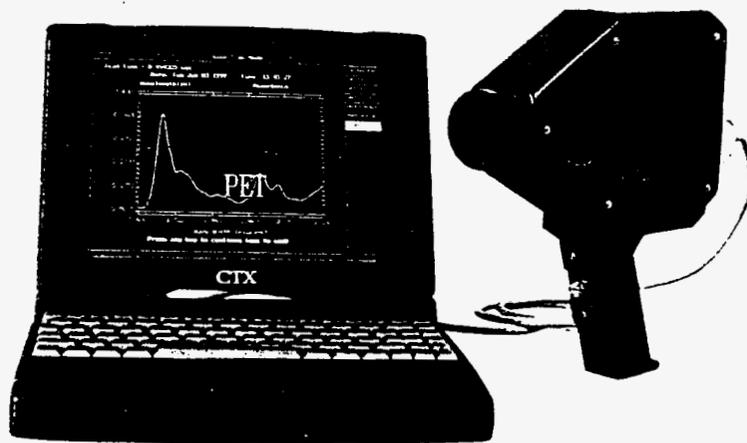


Figure n° 73 : Appareil de détection NIR d'Opt Research Inc.

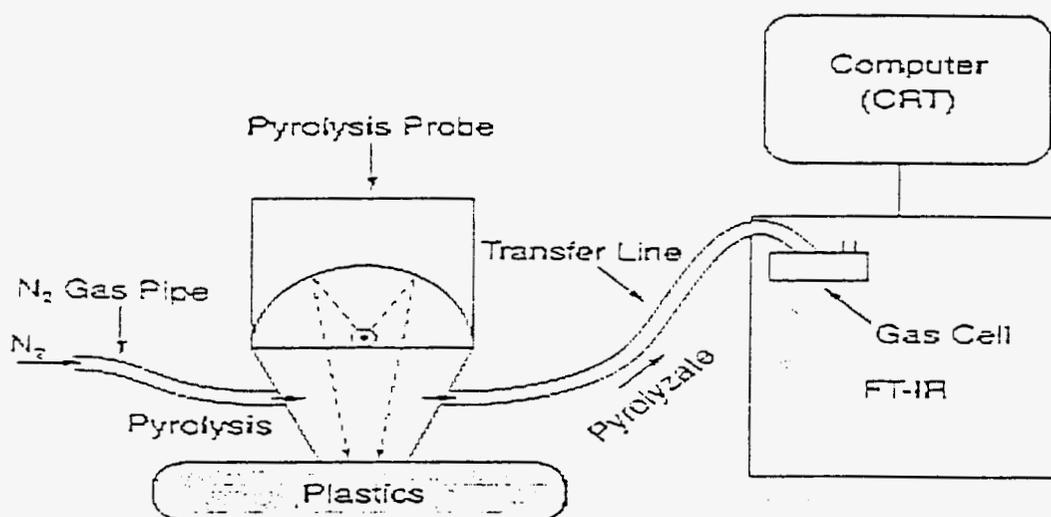


Figure n° 74 : Principe d'identification par pyrolyse IR de Nicolet

**N.B.** : cet appareil peut être utilisé dans les différents centres de démantèlement des produits électriques/électroniques - le Plastiscan est distribué en France par la Société Equipements Scientifiques, située à Garches.

*\* Pyrolyse IRTF de Nicolet (Commercial)*

Toujours en application pour l'identification de pièces démontées, la technologie de pyrolyse IRTF développée par Nicolet<sup>(182, 183)</sup>, en partenariat avec le constructeur automobile japonais Toyota, passe par le chauffage du plastique jusqu'à pyrolyse (voir figure n° 74) et les gaz évaporés, caractéristiques des résines, sont analysés par MIR-TF. Cette technique permet l'analyse d'échantillons noirs, fortement colorés, sales, peints ; la différenciation entre élastomères tels que NBR, SBS, EPDM, est aussi possible. Dans le cas de pièces peintes, une 1<sup>ère</sup> pyrolyse (en surface) permet l'identification de la peinture et une 2<sup>ème</sup> pyrolyse, au même endroit, (couche interne) donne accès à l'identification de la résine.

Cette technologie, commerciale à ce jour, nécessite des optimisations au cas par cas, notamment pour l'évacuation complète de gaz résiduels dans les circuits, après chaque analyse.

*\* Techniques utilisant les marqueurs chimiques ou les codes barre (R&D → industriel)*

Renault<sup>(67)</sup> teste des méthodes spectroscopiques (fluorescence X et rayons X), parmi lesquelles des traceurs facilement repérables pourraient être utilisés soit sous la forme de pièces ajoutées dans la fabrication des plastiques (telles que des oxydes métalliques, des terres rares, ...), soit sous la forme de pièces métalliques microscopiques incorporées par la suite.

Des études de faisabilité sur l'ajout de code barre sur les produits automobiles et informatiques / bureautique sont aussi développées<sup>(67)</sup>. Cette évolution est destinée à faire le tri après démontage des pièces, et reste donc très liée à la notion de rentabilité économique du démontage.

En ce qui concerne les VHU, le marquage des matières plastiques par un code gravé normalisé PSA - Renault - Volvo, compatible à 99 % avec les normes de marquage allemandes, est envisagé.

La société Bühler propose d'ores et déjà parmi ses techniques de détection un lecteur de code barre.

***Plus généralement, le domaine du tri par détection, qu'il soit manuel (stade commercial) ou automatisé (stade R&D), fait l'objet de nombreuses études en cours, notamment dans le cadre des programmes RECAP et JRC<sup>(180)</sup>. A ce jour, le tri automatisé n'est pas opérationnel sur le plan industriel, en ce qui concerne les déchets du secteur automobile.***

## **C.2 - Résidus de broyage (R.B.)**

Dans la filière de valorisation des V.H.U., des centres spécialisés assurent dans un premier temps l'extraction des métaux ferreux et non-ferreux, constituant les véhicules à hauteur de 70 - 75 % poids. La fraction restante, communément appelée Résidus de Broyage (R.B.), est alors constituée d'une fraction dite *Légère* ou « *Fluff* » (60 - 75 %, issue de l'aspiration des cyclones lors du broyage) et d'une fraction dite *Lourde* (25 à 40 %, en sortie du broyeur, après extraction des métaux ferreux et non-ferreux). Les fractions plastiques se retrouvent essentiellement dans la fraction *Lourde* (30 - 35 %), en mélange avec des élastomères, mais aussi des cailloux, terre, bris de verre, bois, en plus faibles quantités.

De plus, il faut noter que les broyeurs ne traitent pas des gisements 100% V.H.U., mais incorporent lors du traitement environ 1/3 de « Produits blancs » (gros appareils ménagers), qui suivent le même traitement que les V.H.U., mélangés ensemble.

La complexité de la fraction plastique des résidus de broyage (qui ne représente, de plus, que 20 à 25 % du tonnage de ces R.B.), rend leur valorisation difficile et il est économiquement impossible, en l'état actuel des techniques existantes, de vouloir les purifier à l'extrême pour envisager un recyclage monomatériau à l'échelle industrielle. De nombreux travaux sont toutefois réalisés, afin d'enrichir des fractions en certains composants de base : cette approche est avancée dans le cadre de valorisation matière.

Cependant, la voie actuelle de traitement de ces R.B. s'oriente sur la valorisation énergétique. Se pose alors le problème, entre autres, de la teneur en chlore, encore souvent trop élevée pour que les R.B. soit acceptés en tant que combustibles. Et le chlore provient essentiellement des PVC et caoutchoucs chlorés présents dans ces R.B.. De nombreuses études sont actuellement en cours, mais elles demeurent confidentielles.

Nous traiterons donc plus spécifiquement de la préparation et de la séparation des matières plastiques issues des R.B. dans le cadre d'enrichissement de fractions, pour une valorisation matière ultérieure.

### **\* Ford : dissolution sélective (R&D)**

**Ford** <sup>(184)</sup> propose dans un brevet l'application de la séparation par dissolution sélective pour récupérer le PMMA présent dans les R.B. Pour cela, les R.B. subissent des extractions successives par des alcanes (pentane, hexane, heptane, octane) : la fraction insoluble, qui contient le PMMA, est filtrée avant de subir une extraction à base d'acétone. Le PMMA se retrouve en solution dans l'acétone, qui est ensuite évaporée. Le PMMA est par la suite séché.

Dans ce brevet, Ford va jusqu'à la récupération du MMA par dépolymérisation du PMMA précédemment obtenu, mais nous nous arrêterons au stade de la séparation PMMA/R.B..

Il faut noter que le PMMA contient, à ce niveau, quelques impuretés, et ne présente pas de propriétés d'apparence convenable pour être réutilisé dans le secteur automobile.

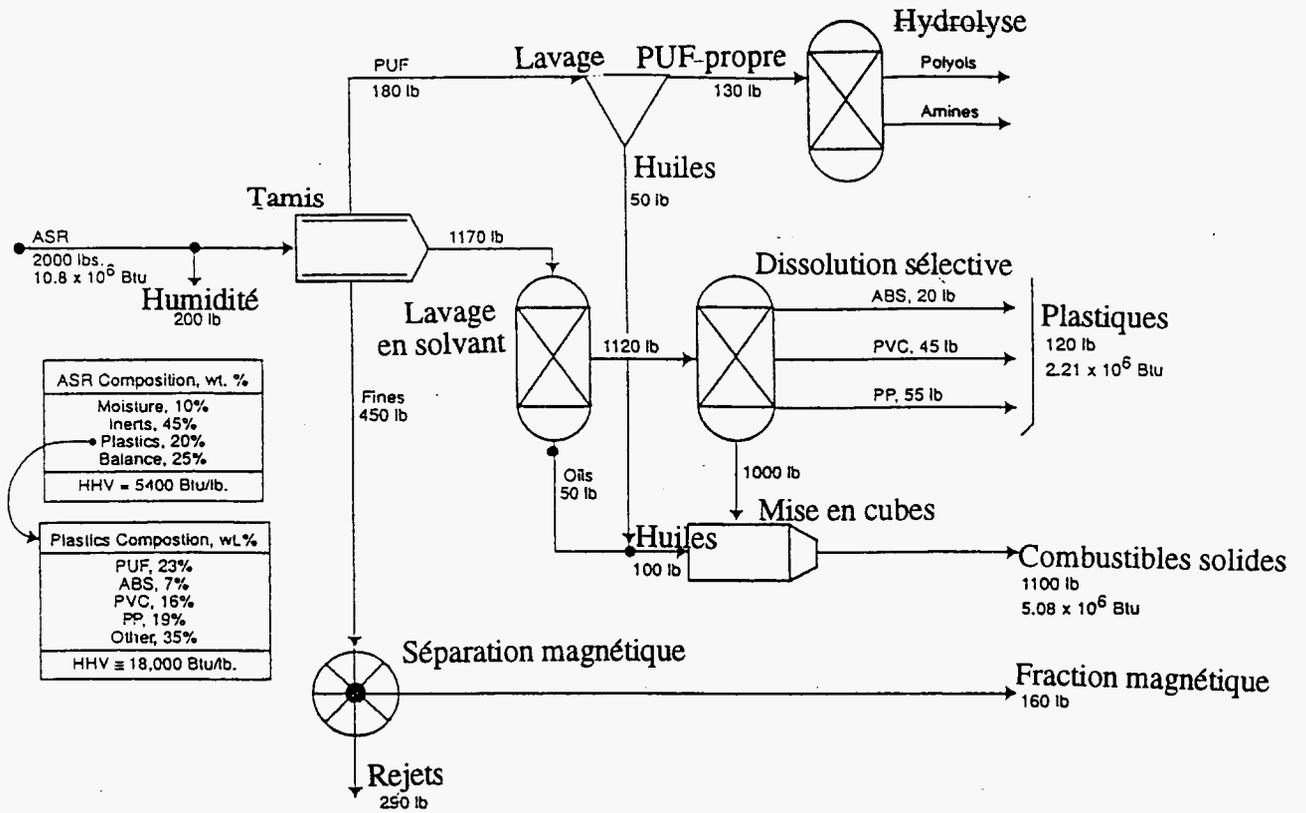


Figure n° 75 : Procédé de séparation par dissolution sélective de l'A.N.L.

*\* Argonne National Laboratory : dissolution sélective (R&D)*

L'**Argonne National Laboratory (ANL)** <sup>(185)</sup> travaille depuis plusieurs années sur le thème de la séparation des matières plastiques présentes dans les R.B., qui contiendraient plus de 60 % de la teneur en thermoplastiques extractibles par dissolution sélective. Un procédé en quatre étapes a été développé en laboratoire :

1) séchage des R.B. : le procédé de séchage est réalisé par transfert indirect de chaleur, à des températures inférieures à 280 °C (afin d'éviter tout risque de feu). Il permet de retirer l'humidité relative des R.B. qui varie saisonnièrement et localement, pouvant atteindre 40 %.

2) séparation mécanique : les mousses de PUR et les particules fines (<à 6 mm) sont extraites par un classificateur à air. Les mousses PUR sont lavées par des solutions organiques et des solutions eau/détergent afin de retirer les importantes souillures qu'elles comportent et obtenir des mousses propres aptes à une valorisation matière (NB : Une usine devait être opérationnelle à partir de 1995).

3) dissolution sélective : deux approches ont été réalisées. La première a consisté à utiliser différents solvants pour extraire sélectivement les plastiques les uns après les autres. La seconde a consisté à utiliser un seul solvant pour dissoudre à haute température tous les plastiques visés en appliquant ensuite une précipitation sélective de chacun d'entre eux. Au préalable, un traitement par un solvant "doux" (exemple : hexane) permet d'extraire les fluides automobiles sans altérer les polymères visés.

4) régénération des solvants : selon que les plastiques sont récupérés par refroidissement, par précipitation avec ajout d'un non-solvant ou encore par évaporation, les solvants utilisés sont récupérés par séparation simple, par évaporation-flash ou encore par distillation.

Ce traitement est résumé dans le schéma de la figure n° 75. La dissolution sélective permet de séparer sélectivement l'ABS, le PVC et le PP ; la mousse PUR étant retirée par tamisage.

NB : A notre connaissance, ce programme n'a pas été développé au-delà de l'échelle semi-industrielle.

*\* Bureau of Mines : traitement par flottaison (R&D)*

Dean et al. <sup>(186)</sup> ont reporté une série d'expérimentations conduites par le "**Bureau of Mines**", dans laquelle les R.B. sont traités par flottaison.

Dans cette étude, les fractions moyennes et flottantes, issues d'un élutriateur en voie humide, sont envoyées dans un bac de flottaison qui comporte une série de cellules additivées de sel, chacune étant maintenue à une densité différente.

Bien que 100 % de séparation n'aient pas été atteints, les tests ont montré que certains plastiques peuvent être concentrés dans les différentes phases. Cette concentration demeure insuffisante pour ouvrir une opportunité à un recyclage primaire de ces fractions plastiques issues de R.B..

*\* PURRC : bilan sur la séparation des PUR (Industriel + R&D)*

Le **Polyurethanes Recycle and Recovery Council (PURRC)** <sup>(187)</sup> a récemment élaboré un programme concernant le traitement des déchets de PUR issus de rebuts de production ou des déchets post-consommation, en s'attachant spécifiquement au secteur automobile. Ils ont ainsi identifié les techniques qui leur semblent les plus efficaces pour la séparation des matières plastiques présentes dans les R.B. :

- la séparation par tamisage, notamment par trommel
- la séparation par air, déjà largement utilisée pour le traitement des déchets ménagers. Le classificateur à air vertical est un procédé efficace pour la séparation entre de la mousse PUR, des plastiques légers et des matières plus lourdes, mais ne permet pas la séparation entre ces mêmes mousses et les matières plastiques. Les classificateurs à air horizontaux ou à tambours ne conduisent pas à une bonne séparation des mousses de PUR présentes dans les R.B..
- la séparation par utilisation de liquides (flottaison, élutriateur en voie humide, flottation-moussage, hydrocyclonage). Ces techniques sont viables pour la séparation des plastiques et des mousses des particules de métal, verre, poussières,... Pour séparer les mousses de PUR, un agent mouillant est souvent utilisé afin de modifier la fraction non-mousse pour la faire sélectivement couler. La fraction flottante récupérée est alors constituée d'environ 80 % de mousses.
- la séparation magnétique, utilisée largement dans les industries du déchets pour récupérer les fractions métalliques
- la séparation électrodynamique, faisant intervenir une modification de la conductivité d'un matériau par ajout d'eau (exemple : séparation papier / plastiques). Quand de l'eau est ajoutée à un mélange plastique + papier, le papier absorbe l'eau et devient plus conducteur tandis que le plastique n'absorbe pas suffisamment d'eau pour modifier sa conductivité. Le principe est ensuite équivalent à une séparation magnétique.
- la séparation par solvant, mais dans ce cas la mousse PUR est très souvent ôtée mécaniquement avant ce type de traitement qui s'applique plus particulièrement aux autres fractions plastiques présentes dans les R.B..

Il ressort de cette première recherche que peu de techniques existent dans le milieu industriel pour le traitement des R.B., qui représentent un des gisements les plus complexes à traiter de par la diversité des matières qui y sont présentes.

**APPLICATION :**

**D - PRODUITS ELECTRIQUES ET ELECTRONIQUES**

**APPLICATION :**  
**D - PRODUITS ELECTRIQUES ET ELECTRONIQUES**

Le secteur des produits électriques et électroniques développe et applique depuis peu les technologies de séparation de matières plastiques. Peu de données sont à ce jour disponibles, l'enjeu du recyclage des matières plastiques issues de ces appareils étant nouveau.

Les premiers produits ayant retenus l'attention dans ce secteur sont les câbles électriques et de télécommunications, qui présentent un centre d'intérêt économique important : ils contiennent des métaux. Leur traitement a été étudié et mis en place au niveau industriel depuis plusieurs années, mais il nécessite encore de nouveaux développements dans le cadre de la valorisation des matières plastiques.

Les produits "blancs", qui regroupent tous les produits électro-ménagers et les petits appareils de cuisine, sont, dans la plupart des cas, absorbés avec les résidus de broyage automobile. Peu de procédés spécifiques à ces produits existent à ce jour.

Enfin, les produits "bruns", qui regroupent les équipements informatiques, bureautiques, la hifi, la téléphonie, ..., se retrouvent très dispersés et ne suivent pas encore de filière bien établie. Le tri à la source semble dominer pour ce type de produits.

### **D.1 - Déchets de câbles**

#### **1.1 Séparation par procédés à sec**

*\* Séparation électrostatique, Université de Roumanie (R&D → industriel)*

Des études de recherche et développement ont été menées par l'**Université de Cluj-Napoca** <sup>(188)</sup>, en Roumanie, et ont permis d'évaluer les capacités de la séparation électrostatique par bombardement ionique (ou Corona) appliquée au traitement de déchets de câbles. Des tests laboratoires, basés sur la séparation PVC / cuivre issus de ces déchets de câbles, ont permis de déterminer le type et le dimensionnement des séparateurs électrostatiques et d'optimiser les conditions opératoires.

Ce procédé permet d'obtenir les plastiques recyclés avec une efficacité de 90 % et un taux de métal résiduel inférieur à 0,1 %.

Cependant, des industries roumaines appliquent cette technique de séparation en l'intégrant dans une ligne de traitement plus complexe (figure n° 76 pour les déchets de câbles électriques ; figure n° 77 pour les déchets de câbles de télécommunications). Dans ces schémas, la séparation électrostatique vient en complément de la séparation par un classificateur pneumatique car seule, elle ne serait pas rentable au niveau industriel (le séparateur électrostatique ne pouvant qu'affiner une première séparation matières plastiques / métaux).

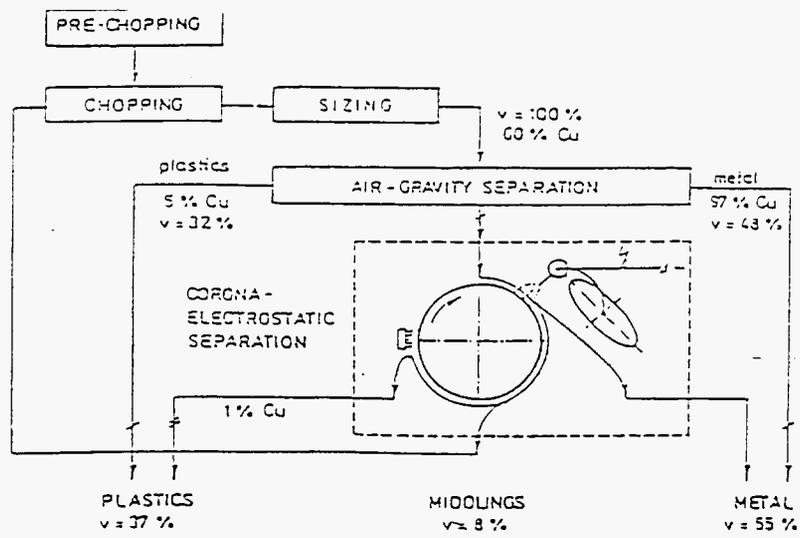


Figure n° 76 : Ligne de traitement de câbles électriques, Roumanie

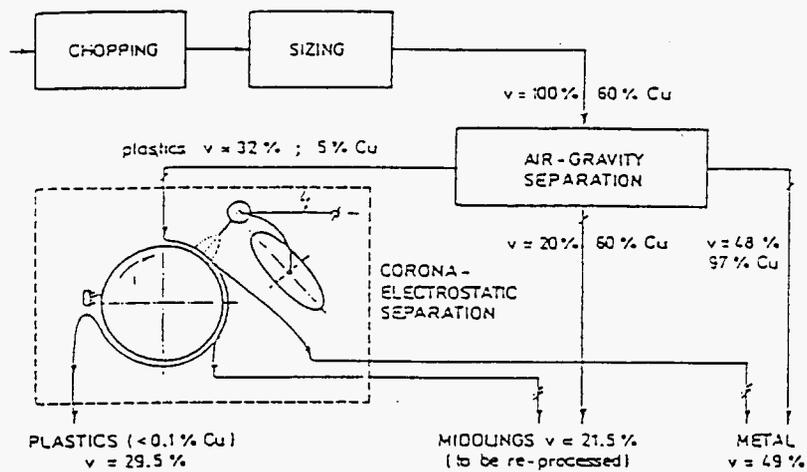


Figure n° 77 : Ligne de traitement de câbles de télécommunication, Roumanie

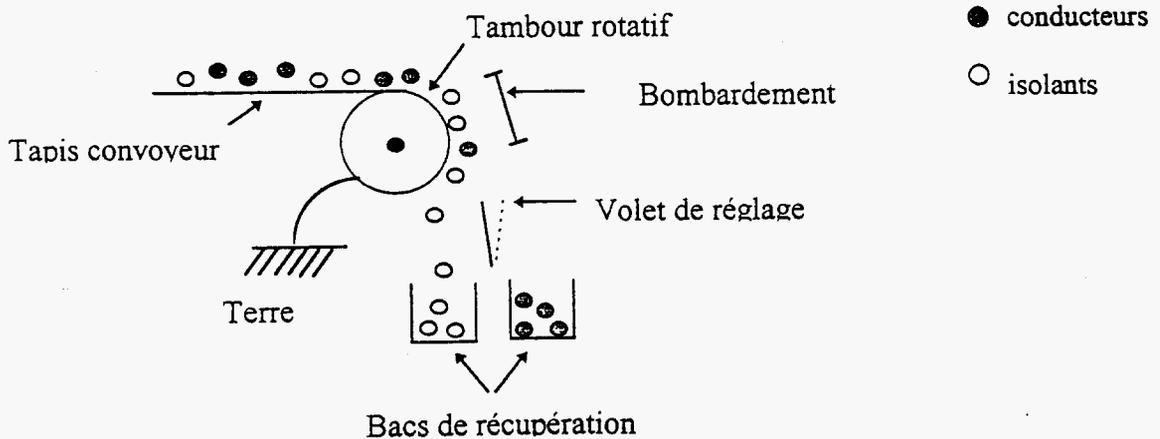


Figure n° 78 : Séparation électrostatique Corona, Hamos

La récupération du cuivre contenu dans les câbles passe notamment par l'extraction des plastiques constituant le câble, c'est à dire le PVC et le PEhd.

N.B. : Les roumains ont développé une unité pilote qui traite entre 100 et 200 kg/h.

\* Séparateur électrostatique Hamos (industriel)

La société **Hamos GmbH** <sup>(189)</sup> commercialise une gamme de séparateur électrostatique Corona, dite « Série KWS », en application dans le traitement des câbles. La figure n° 78 illustre le principe de fonctionnement de ce type de séparateur électrostatique.

Les particules passent sur la surface d'un cylindre en rotation et reçoivent une décharge Corona (20-30 kV), ce qui provoque l'apparition de charges négatives. Les particules métalliques se déchargent ensuite instantanément au contact du cylindre, tandis que le temps de décharge des plastiques est long. Les plastiques adhèrent alors au cylindre et sont extraits par l'action d'une brosse rotative. Les particules métalliques sont quant à elles projetées par la vitesse du tambour.

Le coût de cet équipement est de l'ordre de 800 kF, pour un débit de câbles de 1T/h.

## 1.2 Séparation par procédés en voie humide

\* Séparation par flottaison et flottation-moussage (industriel ?)

Des japonais ont breveté une séparation mécanique <sup>(190)</sup> pour affiner le traitement des câbles en séparant le cuivre restant dans la fraction plastique après séparation classique, qui représente environ 2 % massique.

Ce procédé fait intervenir :

- 1) une étape de flottaison permettant de récupérer le cuivre qui adhère aux morceaux de plastiques broyés (PVC)
- 2) une étape de pulvérisation du noyau contenant du PEhd et du PVC qui contient encore environ 2 % de cuivre, suivi d'un traitement par concentration gravimétrique avec accélération différentielle (un flux d'eau ascendant accélère la décantation de 74 % du cuivre restant en fond de bac) ; la poudre de cuivre (représentant 18 %) entraînée avec le liquide est récupérée par "sparged with air")
- 3) une dernière étape de flottation-moussage permet la séparation du PVC.

Ce traitement permet de récupérer le % de cuivre restant dans la fraction plastique avec une efficacité de 91 %. Les fractions plastiques extraites ont une teneur en cuivre inférieure à 0,2 %.

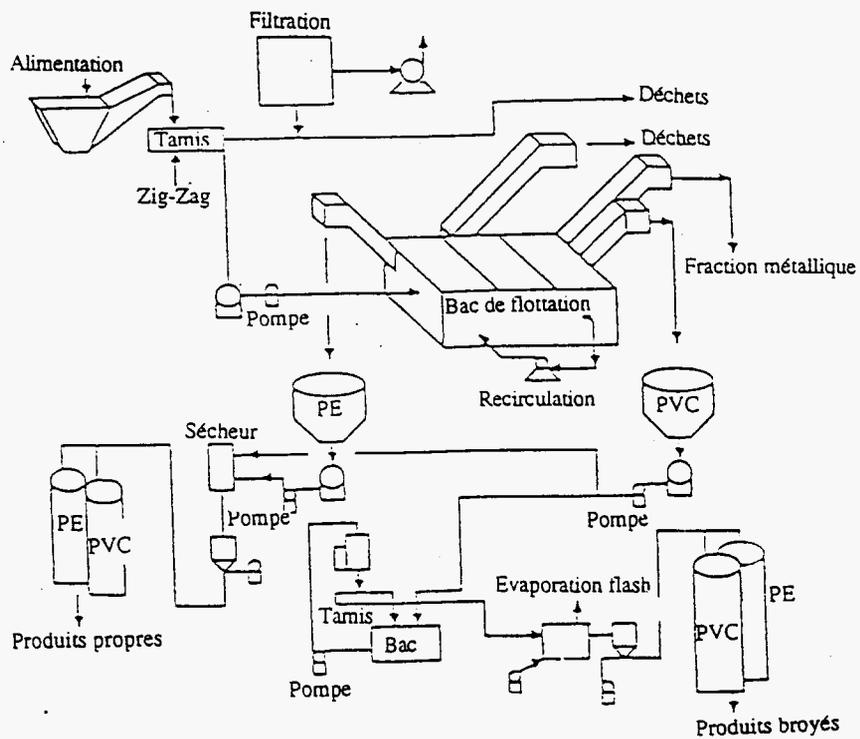


Figure n° 79 : Procédé de traitement P.R.S.

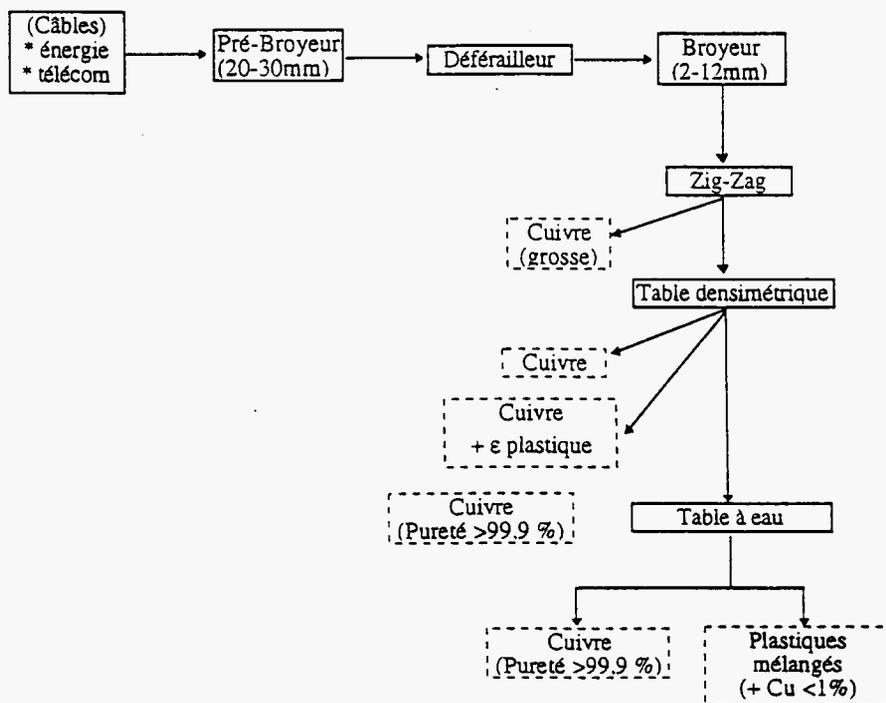


Figure n° 80 : Procédé de traitement Varray

\* Séparation par flottation-moussage, P.R.S. (industriel)

**Plastic Recovery Systems Inc.** <sup>(191)</sup> a développé un procédé en voie humide permettant de séparer les fractions métalliques (Cu, alu) des fractions plastiques (PVC, PEhd) et des polluants (terre, cailloux, ...).

Le liquide utilisé contient des surfactants qui permettent la modification du comportement de certaines matières afin de faciliter leur séparation. Le schéma de traitement est donné sur la figure n° 79.

### 1.3 Séparation par procédés mixtes

\* Séparation par table densimétrique et table à eau, Varray (industriel)

La société française **Varray** <sup>(192)</sup> a mis en place une unité de traitement des déchets de câbles permettant d'affiner la séparation métaux / plastiques par l'utilisation de table densimétrique et de table à eau en série.

Le schéma de traitement de la ligne est présenté sur la figure n° 80.

Cet exemple illustre en fait l'ensemble des technologies de séparation les plus répandues dans le domaine du traitement des câbles, technologies basées essentiellement sur la différence de densité des matériaux.

Cependant, la priorité de ces traitements restent la récupération des métaux, la fraction plastique étant constituée d'un mélange de polymères (PVC + PE + caoutchoucs) qui ne semblent pas être économiquement séparables actuellement.

\* Séparation électrostatique ou par hydrocyclone de la société Kéma (industriel ?)

La société **KEMA** <sup>(193)</sup> propose deux procédés de séparation, selon qu'elle traite des câbles de télécommunication ou des câbles électriques, qui permettent d'obtenir des fractions plastiques directement valorisables par voie mécanique. Ces procédés ont été développés à l'échelle semi-pilote.

Pour les câbles de télécommunication, le procédé utilise une technique de séparation par force centrifuge (hydrocyclone, séparateur centrifuge), comme détaillé sur la figure n° 80 bis.

Pour les câbles électriques, le procédé met en oeuvre des séparations électrostatiques suivies d'une étape d'extrusion filtration comme décrit sur la figure n° 80 ter.

Après la première séparation électrostatique, la quantité résiduelle de métal dans la fraction plastique est inférieure à 0,5 %. Le PVC est alors séparé du mélange PE + caoutchouc par séparation triboélectrique, avec une pureté supérieure à 96 %. Les 4 % d'impuretés résiduelles restants peuvent être éliminés par une étape d'extrusion-filtration.

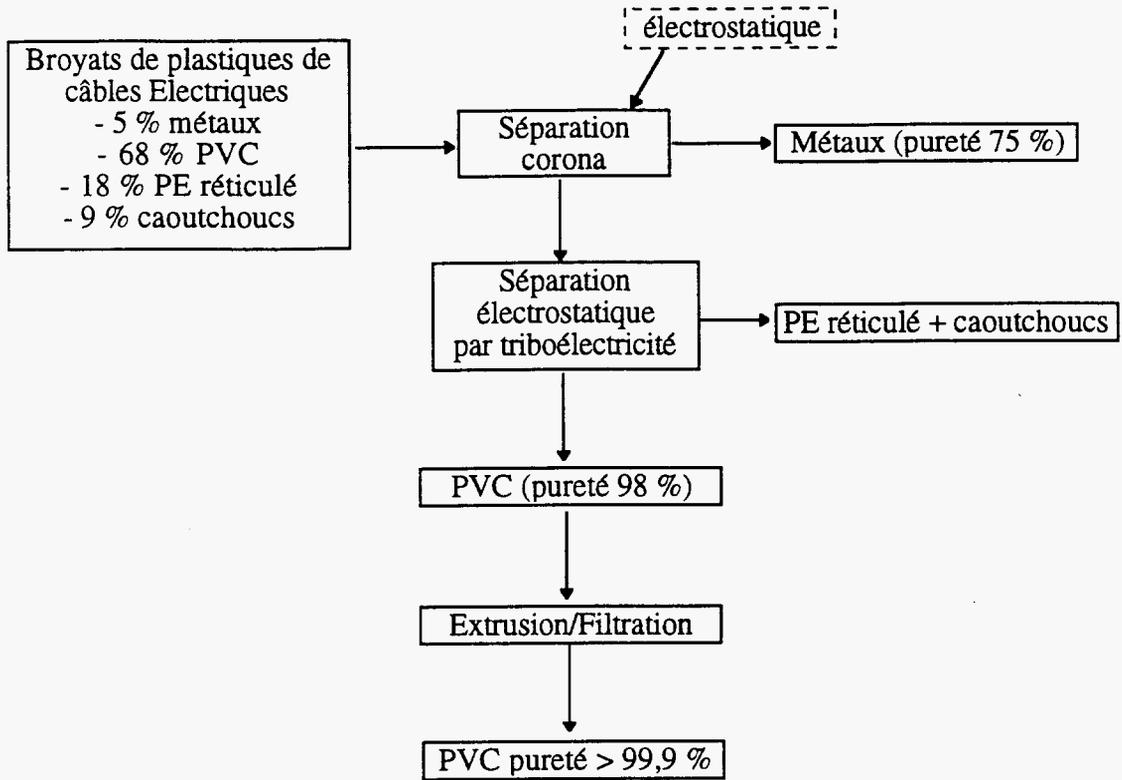


Figure n° 80 bis : Traitement de câbles électriques

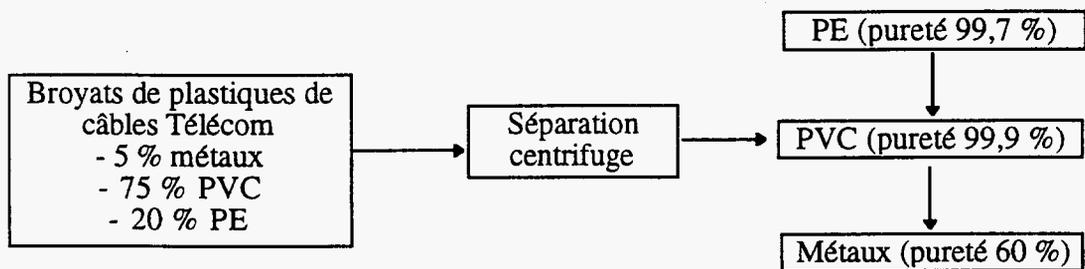


Figure n° 80 ter : Traitement de câbles télécommunication

## **D.2 - Déchets types cartes électroniques / circuits imprimés**

Les cartes informatiques que l'on trouve dans les secteurs électriques / électroniques ont très souvent un fin revêtement métallique qui doit être enlevé en vue d'une valorisation matière des plastiques.

Des études sont actuellement en cours dans une université allemande qui développe un procédé de traitement incluant le broyage cryogénique de ces pièces <sup>(194)</sup>, souvent en ABS et/ou PC, afin de fragiliser les plastiques pour les transformer en poudre, les films métalliques déposés restant moins fragiles. Cela permet ensuite de séparer les plastiques des métaux par des opérations de tamisage.

*\* Séparation en voie sèche intégrant le broyage cryogénique et la séparation électrostatique, Daimler-Benz (pilote industriel)*

**Daimler-Benz** <sup>(195)</sup> a développé un procédé de séparation métaux / plastiques en voie sèche pour le traitement des circuits imprimés, permettant d'obtenir une fraction plastiques mélangés très pure. Ce procédé, développé à l'échelle semi-pilote (débit de 50 Kg/h), comprend :

- 1) un prébroyage (pièce réduite à 4 cm<sup>2</sup> max.)
- 2) un tri magnétique pour la séparation des métaux ferreux
- 3) un pré-refroidissement des matières sous azote liquide
- 4) un broyage cryogénique sous azote liquide ( $\phi$  0,1 mm)
- 5) une classification pneumatique par une table à lit fluidisé
- 6) une séparation électrostatique entre les métaux non-ferreux et les matières plastiques mélangées

Cependant, la fraction plastique serait constituée de moitié de composés ignifugés par des additifs halogénés, et Daimler-Benz n'a pas souhaité développer de valorisation pour ces matières plastiques qui finissent toujours en décharge.

Leur procédé permet une plus grande efficacité de séparation métaux : plastiques, la fraction plastique étant considérée comme indésirable (génération potentielle de dioxines et de furanne due à la présence des retardateurs de flamme halogénés dans la majorité des circuits imprimés traités). Le coût de traitement annoncé est de 600 à 1 200 FF / T, selon le type de circuits imprimés traités.

*NB : Le coût amené par le broyage cryogénique semble être équilibré par la valorisation des métaux à plus haute valeur ajoutée de par leur meilleure qualité.*

Rem. : Mitsubichi Heavy Ind. travaille en partenariat avec Daimler-Benz sur la valorisation par gazéification ou par méthanolyse de la fraction plastique, en axant le développement sur la réduction des émissions polluantes.

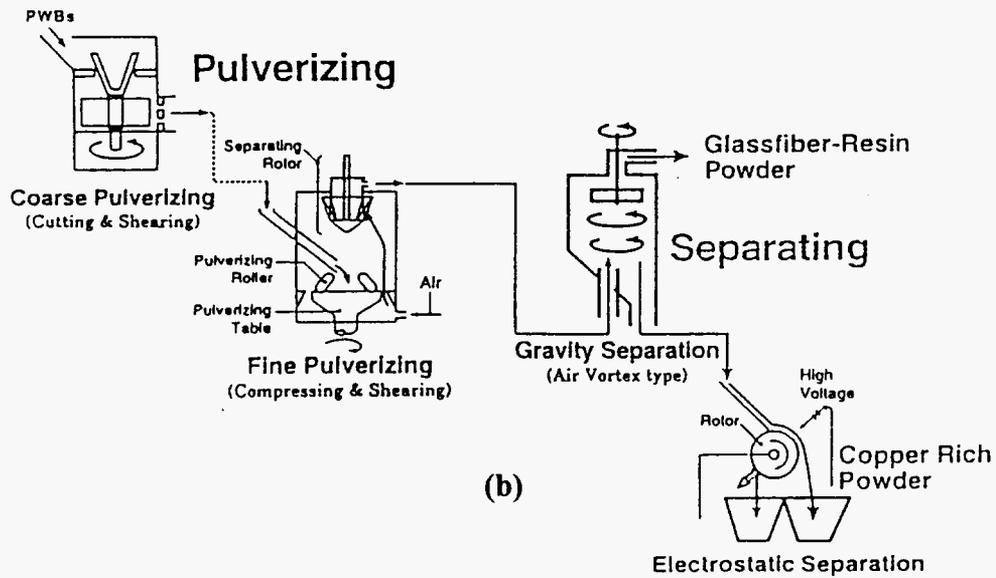
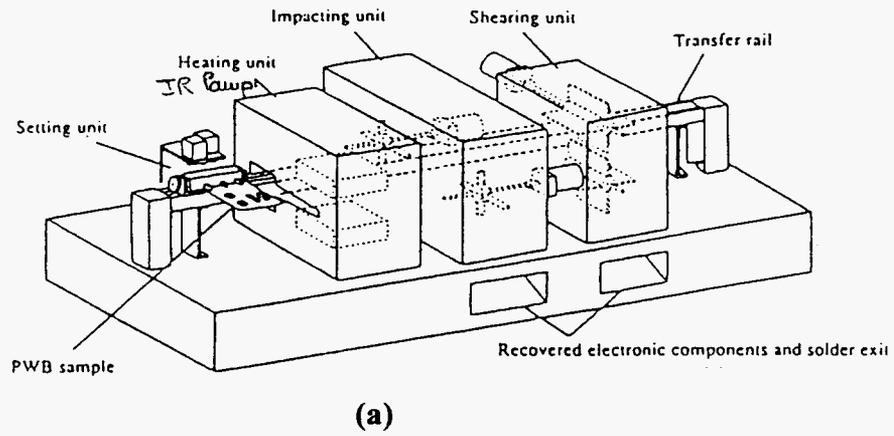


Figure n° 81 (a,b) : Procédé de traitement NEC Corp.

*\* Séparation par ramollissement et broyage, NEC Corp. (R & D ?)*

**NEC Corp. Japan** <sup>(168)</sup> a développé une technologie de séparation des matières constituant les cartes électriques imprimées (= circuits imprimés) en combinant l'action de la chaleur (pour atteindre la température de fusion des soudures, égale à 230°C) et l'action mécanique de forces d'impact et de cisaillement (pour diviser finement les matériaux).

Les composants électriques sont récupérés sans aucun dommage et les soudures sont extraites sous forme de particules. Les cartes sont ensuite pulvérisées et une opération de séparation gravimétrique, suivie d'une séparation électrostatique, permet de récupérer une fraction très riche en cuivre et une fraction de résine chargée en fibre de verre, toutes deux sous forme de poudre.

Le mécanisme couplé de chauffage / procédé par impact-cisaillement, ainsi que le schéma de traitement des cartes sont donnés sur les figures n° 81 a et b.

**N. B.** : les taux d'efficacité et de pureté obtenus n'ont pas été précisés.

*\* Broyage différentiel par onde de choc et tamisage, SRTI System (R&D)*

La société **SRTI System** a développé une technologie particulière de broyage différentiel, faisant intervenir des ondes de choc, créées par des électrodes dans une enceinte emplie d'eau. Le broyage des matériaux peut être effectué :

- soit en milieu humide : les matières à broyer sont directement immergées dans le bain avec les électrodes,
- soit en milieu sec : une membrane permet de transmettre l'onde de choc du bain vers la chambre à sec.

Les déchets introduits dans cette enceinte sont plus ou moins fragmentés sous l'effet des ondes, en fonction de leur fragilité, selon les effets suivants :

- pression et contrainte,
- cassure des liants,
- destruction des multicouches aux points de discontinuité.

Ce procédé a été testé positivement sur des cartes électroniques : les parties métalliques restent entières alors que le plastique est fragmenté et séparable par tamisage.

Des essais à l'échelle semi-industrielle ont été réalisés pour la séparation métaux / plastiques, thermoplastiques / thermodurcissables, ou encore fibres de verre / résines polymères.

Dans certains cas, la fragilité des composés n'est pas suffisante et le broyage différentiel par ondes de choc nécessite une étape de refroidissement des matériaux par cryogénie (ex. d'applications : cartes, circuits imprimés).

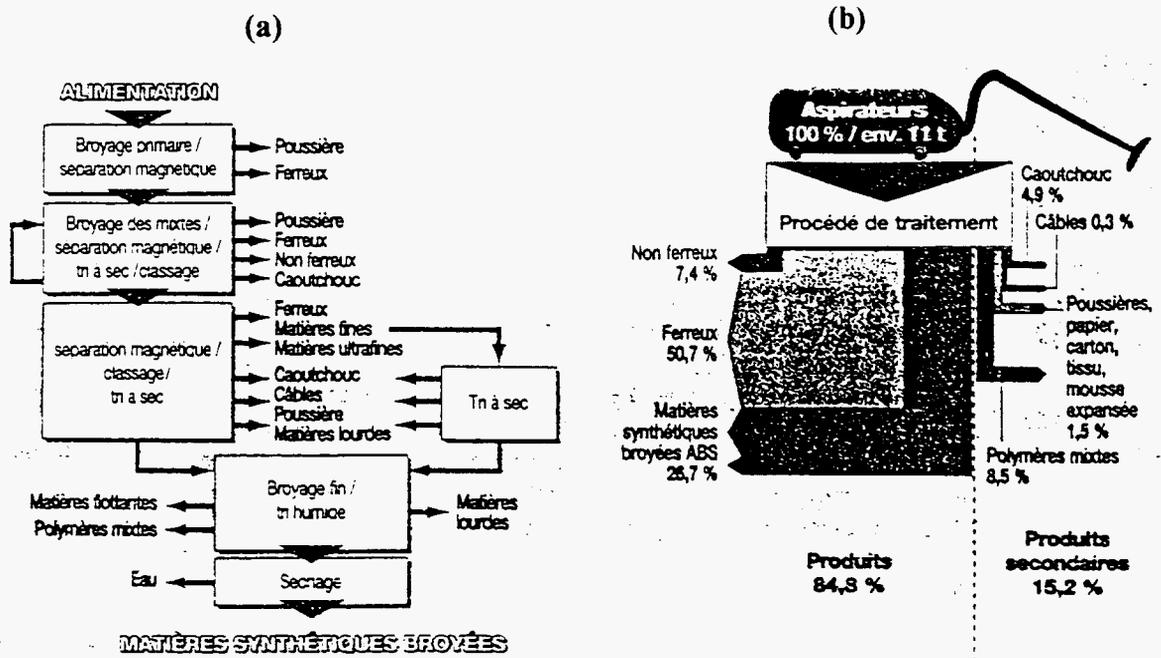


Figure n° 82 (a, b) : Séparation mécanique Hüls AG

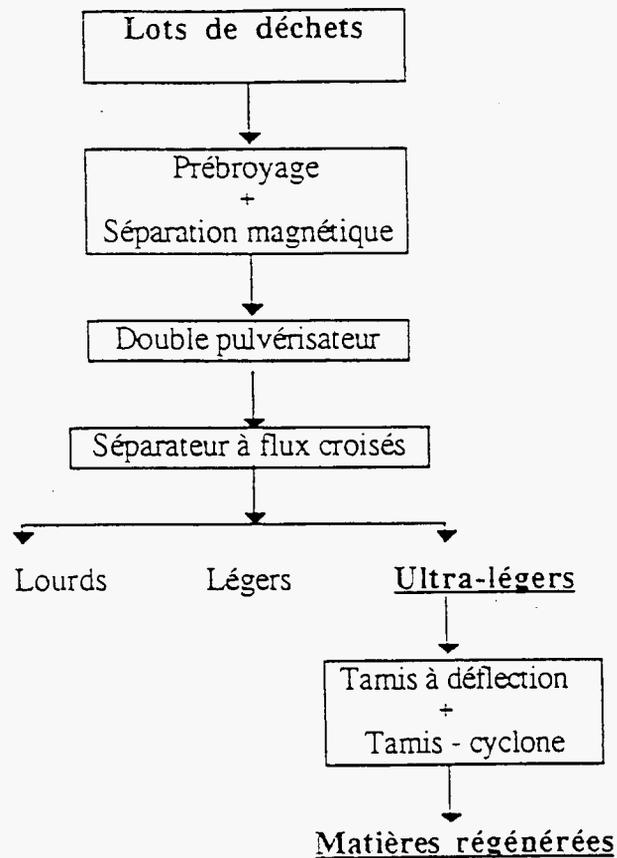


Figure n° 83 : Schéma de traitement Arra Terra Recycling

### **D.3 - Traitement des produits blancs et bruns**

#### **3.1 Séparation par procédés mixtes**

##### **\* Séparation mécanique en voie sèche, Hüls AG (pilote)**

Les sociétés allemandes **HÜLS AG** et **Metallgesellschaft AG** <sup>(196)</sup> se sont récemment associées pour la mise au point d'une unité pilote destinée au recyclage des appareils ménagers électriques, unité dont la capacité de traitement s'élève à 3 000 T/an.

Le procédé ne fait intervenir que des techniques de séparation mécanique afin de permettre la séparation automatique des plastiques et des métaux valorisables présents dans les gisements. En ce qui concerne les matières plastiques, l'accent a été mis sur la récupération de matières plastiques de haute qualité. Le schéma fonctionnel du procédé est donné sur la figure n° 82a.

L'efficacité de ce procédé a été testé sur des aspirateurs ménagers (figure n° 82b).

Il a pu être démontré que le procédé de traitement de lots homogènes de déchets d'appareils ménagers (exemple : cafetières / aspirateurs / robots de cuisine,...) conduit à un taux de valorisation de l'ordre de 80 %, avec des matières plastiques recyclées présentant d'excellentes caractéristiques mécaniques.

##### **\* Séparation mécanique en voie sèche, Arra Terra Recycling (pilote → industriel)**

La société allemande **Arra Terra Recycling** <sup>(197)</sup> a récemment breveté une nouvelle technologie physico-mécanique de séparation pour les déchets principalement issus des produits ménagers.

Le schéma de traitement général est donné sur la figure n° 83. Il présenterait essentiellement des étapes de broyage et de classifications pneumatique et dimensionnelle.

Cependant, cette société a développé ce procédé de traitement dans un but de valorisation des fractions métalliques, les matières plastiques demeurant, à ce jour, des produits indésirables pour lesquels les débouchés ne sont pas clairement identifiés.

##### **\* Séparation mécanique, TNO (R&D)**

**TNO** <sup>(198)</sup> a récemment publié des travaux sur la séparation par voie mécanique des matières présentes dans les déchets de réfrigérateurs et congélateurs en fin de vie.

Les déchets de matières plastiques générés par ces produits sont homogènes, constitués à 90 % de dérivés styréniques. Ce procédé permettrait de séparer ces composés styréniques avec une pureté supérieure à 99 %, en passant par des étapes de broyage, lavage et séparation mécanique. Les plastiques ainsi traités trouveraient des applications dans de nombreux secteurs, le PS récupéré correspondant notamment à un grade de PS moyen-impact.

\* Broyage cryogénique d'Hitachi (pilote)

**Hitachi** <sup>(199)</sup> a développé en Avril 1995 une unité pilote de recyclage d'appareils ménagers tels que les machines à laver, les frigos, les climatiseurs, les circuits d'évacuation d'air, d'une capacité d'1 T/h.

Les appareils, dépouillés de leurs nuisances (condensateurs, mousse, fréon,...) sont déchiquetés et subissent un broyage cryogénique en présence d'azote liquide (-196°C), permettant ensuite la séparation magnétique du fer, du cuivre et de l'alu.

Les différents plastiques sont séparés par flottaison. L'investissement nécessaire à la mise en place de cette unité pilote s'est élevé à "2 billions ¥" (= 2 millions de Yens).

\* Séparation mixte (industriel ?)

Le recyclage des ABS issus de déchets de téléphones a été entrepris par les sociétés **Western Electric Cie** et **Bell Laboratories** <sup>(200)</sup> dans les années 80.

Le procédé fait intervenir des étapes de broyage, de cyclonage, de tamisage, suivies d'une séparation magnétique, d'un traitement par flottaison et d'un tamisage final avant de compounder l'ABS ainsi régénéré. Les compounds d'ABS récupérés présentent des propriétés supérieures aux propriétés minimales acceptées dans le cahier des charges de Bell System. Mais l'auteur de cet article ne précise pas si ce procédé est encore appliqué aujourd'hui.

\* Séparation mécanique, GK Gummi Fasern (?)

La société allemande **GK Gummi Fasern** <sup>(201)</sup> a testé la viabilité des différents procédés de séparation mécaniques, utilisés pour le traitement des déchets de téléphones en ABS. Les pièces sont préalablement broyées et subissent ensuite des étapes de séparation par criblage, tamisage, et nettoyage par frottements. Les recherches n'ont pas abouties.

\* Etudes de R&D d'ordre général aux USA

Le regroupement de l'**Appliance Recycling Centers of America Inc.** avec l'**Argonne National Recovery** a été créé pour la réalisation d'une étude sur la valorisation des déchets électroménagers en fin de vie <sup>(202)</sup>.

Cette étude tente d'évaluer les moyens économiques et techniques qui permettront de sortir des matières plastiques pures de haute qualité à partir des appareils broyés, étude essentiellement axée sur la valorisation de l'ABS et du PS choc. Pour cela, il semblerait qu'une ligne pilote ait été mise en place à Minneapolis dans le courant du second semestre 1996, mais notre demande de renseignements auprès de l'ANL est restée sans réponse.

L'Université du Texas <sup>(202)</sup> étudie les possibilités de traitement des déchets électroniques, en partenariat avec des industriels privés américains. Cette activité est encore naissante aux USA et l'objectif de ce programme est de définir la collecte, la caractérisation, le traitement et la transformation des produits électroniques (tels que les ordinateurs). Dans ce cadre, une unité pilote aurait dû être mise en place.

### 3. 2 Séparation par détection manuelle ou automatique

#### \* Tri manuel (industriel)

Après une expérience pilote de 2 ans, quatre groupes allemands (Siemens, Alcatel, Noell et Deutsch Telekom) ont créé en 1994 la société **Elektrorecycling GmbH** <sup>(203)</sup>, spécialisée dans le traitement des produits électriques et électroniques moyens et grands systèmes (exclusion de tout l'électroménager).

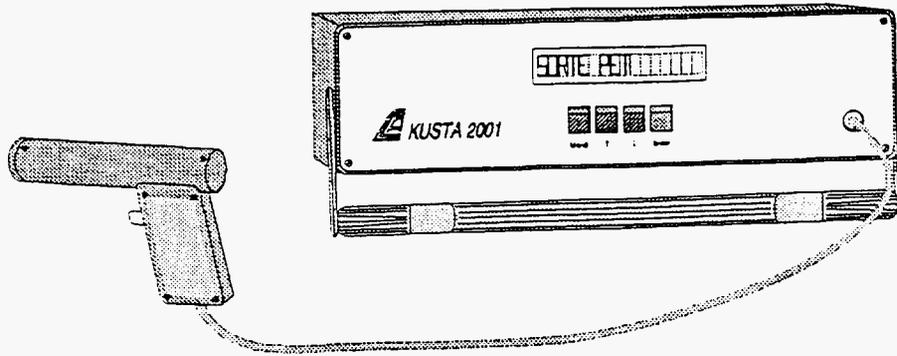
Cependant, actuellement le traitement des plastiques est relativement marginal et passe par le démontage manuel de pièces clairement identifiées. Les produits sont broyés par série, par couleur et le plus souvent, ils sont repris par les partenaires qui avaient eux-mêmes utilisés ces matières plastiques. Cela concerne donc un choix limité de modèle et de matières. Au total, il est traité ainsi environ 1 000 T / an d'ABS, PC, PS et PE tous confondus.

#### \* Détection IR et tri manuel, Siemens Nixdorf (industriel)

**Siemens Nixdorf** <sup>(204)</sup> a mis en place une unité de valorisation en boucle des produits informatiques en fin de vie.

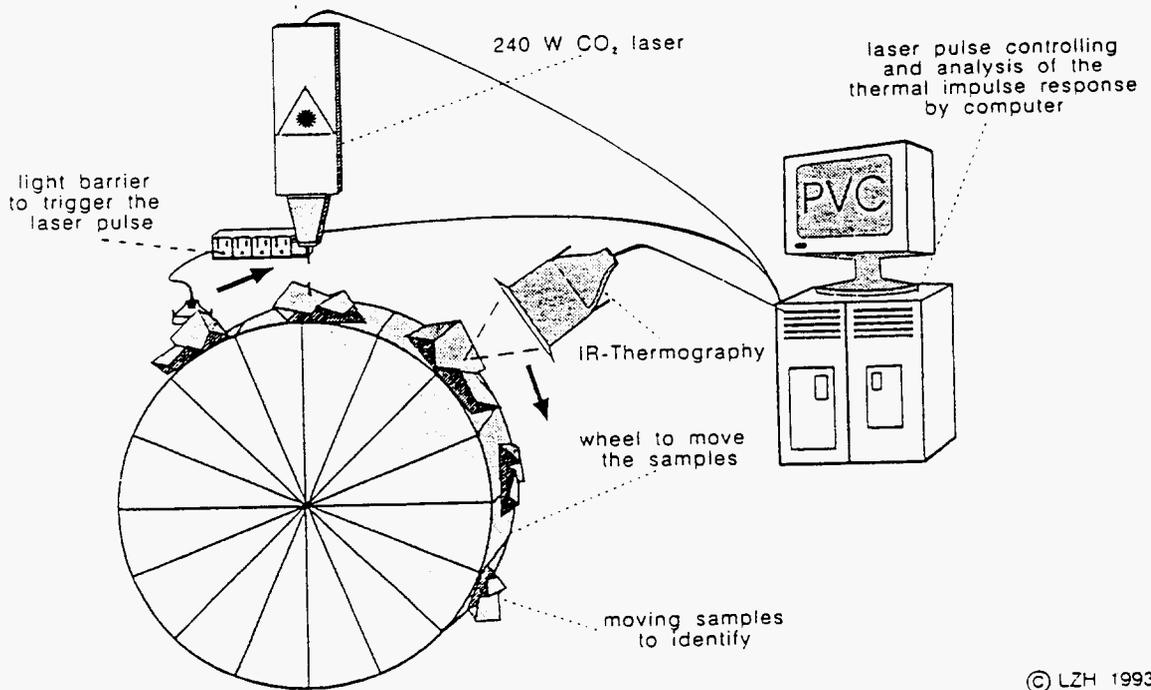
En Allemagne, sur 1,5 millions de tonnes de déchets électriques/électroniques, 150 000 tonnes proviennent du secteur de l'information (ordinateurs, imprimantes, photocopieurs, fax...). De plus, 22 % des déchets électriques / électroniques sont constitués de plastiques, soit 330 000 T/an. Ceci a conduit la société Siemens Nixdorf à développer un processus de traitement automatisé, allant de l'identification des matières au broyage selon les étapes suivantes :

- 1) Examen par du personnel qualifié des morceaux (granulométrie de l'ordre de 7 cm<sup>2</sup>), pour retirer ce qui est jugé néfaste. Critère de sélection : couleur, présence de mousse, de peinture ou encore de métal
- 2) Analyse IR, utilisant une banque de données ajustées aux matériels Siemens (PC, ABS/PC, ABS, PPE/PS, PMMA essentiellement)
- 3) Ejection pneumatique
- 4) Broyage d'une des fractions triées, les autres étant stockées, et les campagnes de matière broyée changent : le nettoyage du broyeur est donc nécessaire entre chaque fraction
- 5) Détection ferreux / non ferreux



**Figure n° 84 : Identification par NIR, LLA**

Experimental set-up for material identification of moving samples



**Figure n° 85 : Identification par IRLT, LZH**

6) Compoundage des broyats avant incorporation d'un certain taux de recyclé dans les produits finis.

Pour Siemens, ce schéma de traitement est très avantageux car il leur permet de travailler en boucle fermée en récupérant la matière de deux fournisseurs différents seulement. Ils disposent alors d'informations précises sur les additifs contenus et retravaillent une matière à haute valeur ajoutée.

\* *Technologies de détection infrarouge (R&D, commercial)*

→ Etat d'avancement : commercial

Tout comme pour le secteur automobile, **Brüker** <sup>(178)</sup> a adapté la banque de données de son spectromètre MIR en réflexion aux résines entrant spécifiquement dans la fabrication des produits électriques et électroniques. Les performances sont semblables à celles décrites dans le chapitre "Applications automobiles". Des appareils ont d'ores et déjà été vendus chez des récupérateurs / régénérateurs de matériaux électriques/électroniques européens.

Le **Laser Labor Adlershof (LLA)** <sup>(205)</sup> commercialise l'appareil de détection NIR en réflexion de la série KUSTA 2000. De nombreuses unités ont déjà été placées en milieu industriel, en application manuelle ou insérées dans une unité automatique de tri dans le cas particulier du tri des bouteilles (Binder + Co.). L'appareil utilisé en détection manuelle est donné sur la figure n° 84.

Le LLA développe actuellement un nouvel appareil permettant l'analyse des additifs présents dans les produits électriques/électroniques, en moins de 3 secondes. Le Laser Induced Plasma Analyser (LIPAN 3000). Les additifs détectés par cette technologie sont tous les ignifugeants, les colorants, les stabilisants, les charges et les renforts. Ce module, d'un coût d'environ 200 KF, pourra être rapidement intégré sur une ligne de tri automatique.

→ Etat d'avancement : pilote industriel

\* *Détection IRLT / tri automatique, Société Noell (pilote industriel)*

Le **Laser Zentrum Hannover (L.Z.H.)** <sup>(206)</sup> a mis au point une technologie d'analyse des polymères, basée sur la réponse des échantillons à une excitation thermique en terme de distribution en température. Cet appareil permet l'analyse de pièces électriques/électroniques indépendamment de l'épaisseur, de la forme, de la taille, de l'aspect de surface des échantillons, de la présence d'encres et additifs. Seuls les échantillons fortement chargés noir de caR.B. one ne peuvent être analysés (une trop importante partie du rayonnement est absoR.B.ée). Le principe de détection est explicité sur la figure n° 85.

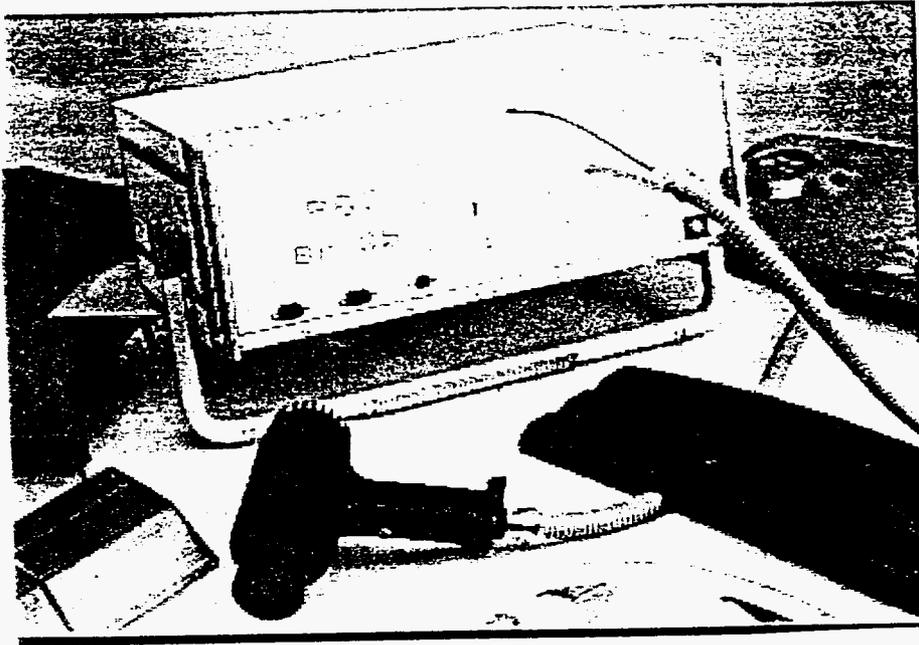


Figure n° 86 : Identification par ionisation couplée détection, AGR

Le LZH est au stade du prototype et la technique atteint, à ce jour, les performances suivantes :

- 90 à 95 % d'identification de pièces,
- 100 % de pureté pour l'ensemble des polymères analysés (quinze)
- seuls les dérivés styréniques (ASA, PS, ABS, SB) conduisent à des taux de pureté inférieurs à 80 %.

Le LZH travaille en partenariat avec la société Noell <sup>(207)</sup> pour industrialiser sa technique de détection. Il leur faut notamment affiner l'identification, accroître la vitesse de détection à 10 pièces/sec. et développer tout l'aspect "mécanique" d'une ligne de tri totalement automatique. Cette unité devra conduire à l'obtention de matières plastiques d'une pureté satisfaisante pour leur valorisation matière.

La société allemande **AGR** <sup>(54)</sup> développe actuellement un appareil de détection dans le visible mettant en oeuvre l'ionisation des pièces plastiques (vaporisation thermique en surface) et l'analyse de la réponse des atomes vaporisés dans le visible. La vitesse d'identification est d'une pièce/sec.

Actuellement, trois prototypes sont à l'essai dans des centres de traitement de déchets électriques et électroniques. La phase de validation est donc en cours et la commercialisation de cet équipement devrait commencer mi-98. L'AGR a développé deux versions d'analyseurs, toutes deux de faible encombrement et portables :

- la première, très simple, permet uniquement d'identifier la présence d'additifs, dans une résine, tels que les ignifugeants, les charges, les additifs contenant des métaux lourds (coût de l'ordre de 140 KF). Cette version est illustrée sur la figure n° 86.
- la seconde comprend un système neuronal qui permet d'identifier les polymères par type de résine, en plus des additifs. (coût : 140 KF + 7 KF par type de résine à analyser).

La société néerlandaise **Bomen** <sup>(208)</sup> développe aussi un appareil d'identification MIR-FT en réflexion, permettant d'analyser les polymères par type de résines ainsi que les additifs halogénés utilisés comme retardateurs de flamme. Le temps de réponse est de l'ordre de 0,5 seconde/pièce et conduit à la reconnaissance :

- de 90 % des produits en ABS, ABS/PC, PPE/PS, ignifugés ou non-ignifugés avec zéro erreur.
- de 100 % des produits en PA.

*Remarque : Suite à des essais internes réalisés au 1er sem. 97, il semblerait que l'exploitation des spectres nécessite encore une optimisation.*

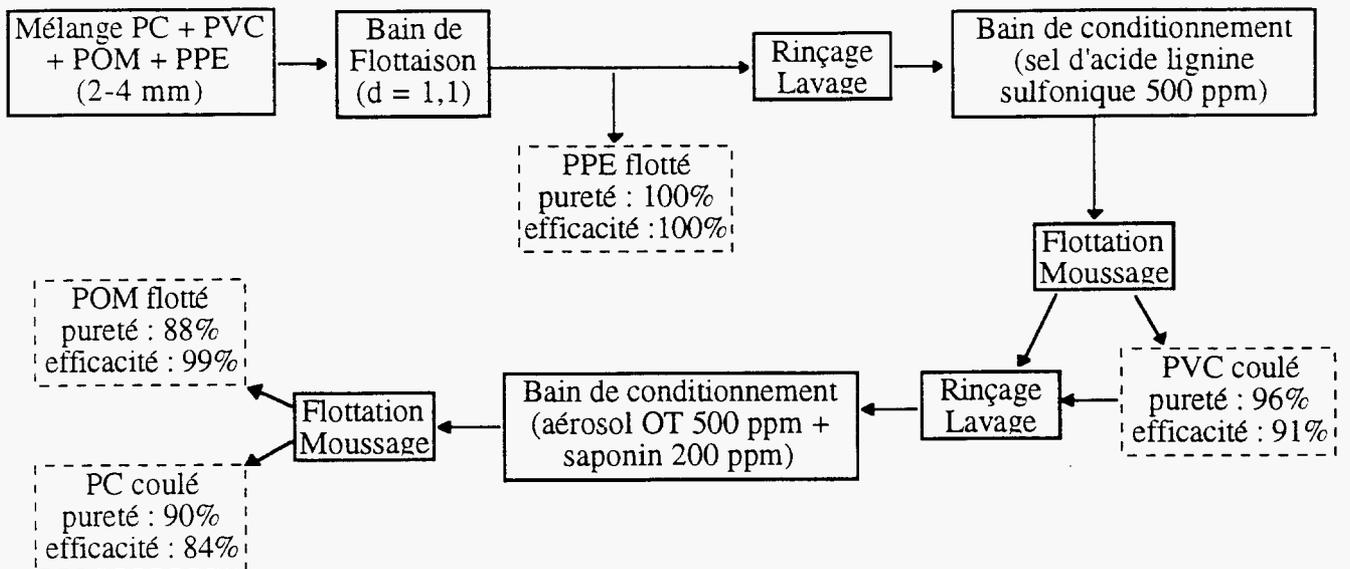


Figure n° 87 : Traitement par flottation-moussage, Kansai University

## **D.4 - Traitement de déchets divers**

### **4.1 Séparation par procédé à sec**

*\* Séparation intégrant le broyage différentiel (R&D → industriel ?)*

La société allemande **Tyczka GmbH** <sup>(209, 210)</sup> propose des procédés brevetés de traitement de déchets électriques / électroniques tels des cassettes vidéo (essentiellement constituées de PS et de PC, et quelquefois d'étiquettes de papier) faisant intervenir le broyage différentiel.

Pour la séparation PS / PC <sup>(209)</sup>, le broyage est réalisé à une température inférieure à la température de fragilisation du PS mais voisine de celle du PC. Le PS broyé, plus fragile, atteint alors une granulométrie inférieure à 200 µm, tandis que le PC conserve une taille supérieure. La séparation PS/PC est ensuite assurée par une opération de tamisage.

Pour les cassettes vidéo ayant des étiquettes de papier collées avec un adhésif <sup>(210)</sup>, le traitement consiste à fragiliser l'adhésif à très basse température lors du broyage, pour ensuite permettre de retirer le papier ainsi détaché par un zig-zag. On passe donc par une étape de broyage dans l'azote liquide, ce qui rend l'adhésif cassant et permet le décollement des étiquettes en papier.

### **4.2 Séparation par procédé humide**

*\* Flottation-moussage de Kansai University (R & D)*

L'**Université de Kansai** <sup>(168)</sup> étudie l'application du procédé de flottation-moussage à des mélanges de matières plastiques issues des secteurs électriques et électroniques, avec des compositions telles que PC + PVC + POM + PPE.

Le schéma de traitement est représenté sur la figure n° 87.

Ce procédé, appliqué à l'échelle du laboratoire, conduit à la récupération des différentes matières avec les taux d'efficacité et de pureté suivants :

<b>Matière</b>	<b>Efficacité</b>	<b>Pureté</b>
PPE	100 %	100 %
PVC	91 %	96 %
PC	84 %	90 %
POM	99 %	88 %

Ces résultats sont encourageants, car ils se situent largement au niveau de ceux obtenus dans d'autres domaines.

**APPLICATION :**

**E - MOQUETTES**

<b>APPLICATION : E - MOQUETTES</b>
--

La structure complexe des moquettes, obtenue par assemblage de plusieurs couches de matières diverses, rend leur recyclage assez spécifique.

Les trois composants de base des moquettes à séparer sont essentiellement :

- des fibres en nylon,
- un renfort en polyoléfine (souvent du PP)
- un liant (en latex ou en SBR), pouvant comporter des charges minérales

Ces structures multicouches peuvent être schématisées comme présentées sur la figure n° 88.

### ***E.1 - Procédés de séparation en voie sèche***

#### ***\* Opérations mécaniques de découpage (R&D)***

**Hagguist et Al** <sup>(211)</sup> ont breveté une technique de séparation de ces constituants basée essentiellement sur des principes mécaniques, comprenant de nombreuses étapes qui se regroupent en trois principaux ensembles d'opérations :

- 1) la récupération des boucles : coupe des boucles de moquettes et criblage.
- 2) la récupération du renfort primaire : passage dans un fluide sous pression pour enlever le liant en latex collé sur le renfort primaire par action mécanique.
- 3) la récupération du renfort secondaire et du liant : passage du composé restant sur un système de brosses rotatives et de jets d'air sous pression, permettant de retirer totalement le liant.

Toutes ces étapes sont réalisées par des opérations mécaniques par l'utilisation de coupeuses, de brosses, ...

#### ***\* Opérations mécaniques avec ajout d'un agent de ramollissement, Monsanto (R&D ?)***

Une technique plus simple a été récemment proposée par **Monsanto** <sup>(212)</sup>, mettant en oeuvre l'introduction d'un agent de ramollissement du liant qui facilite la séparation des différentes matières.

Les déchets de moquette sont préalablement criblés, et dans certains cas nettoyés ou préconditionnés avec, par exemple, un agent de surface, pour accroître l'efficacité de la suite du traitement.

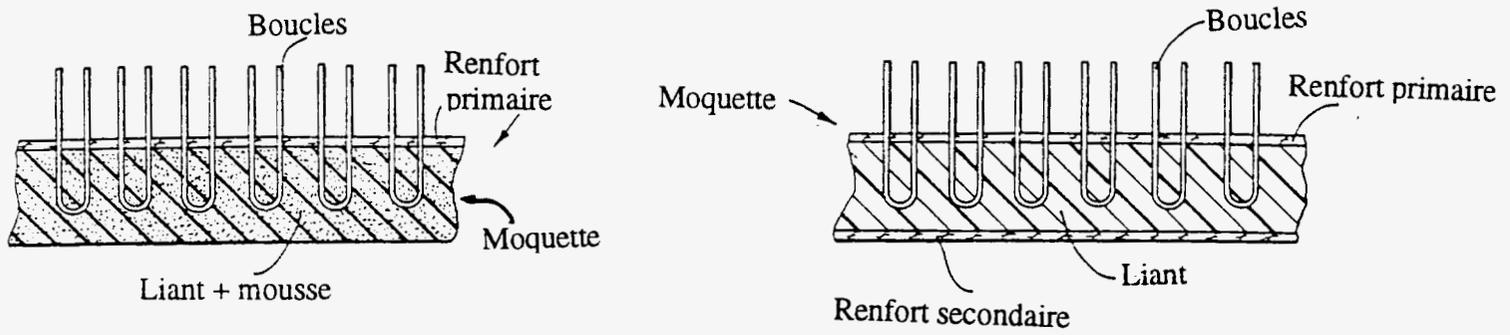


Figure n° 88 : Structures multicouches de moquettes

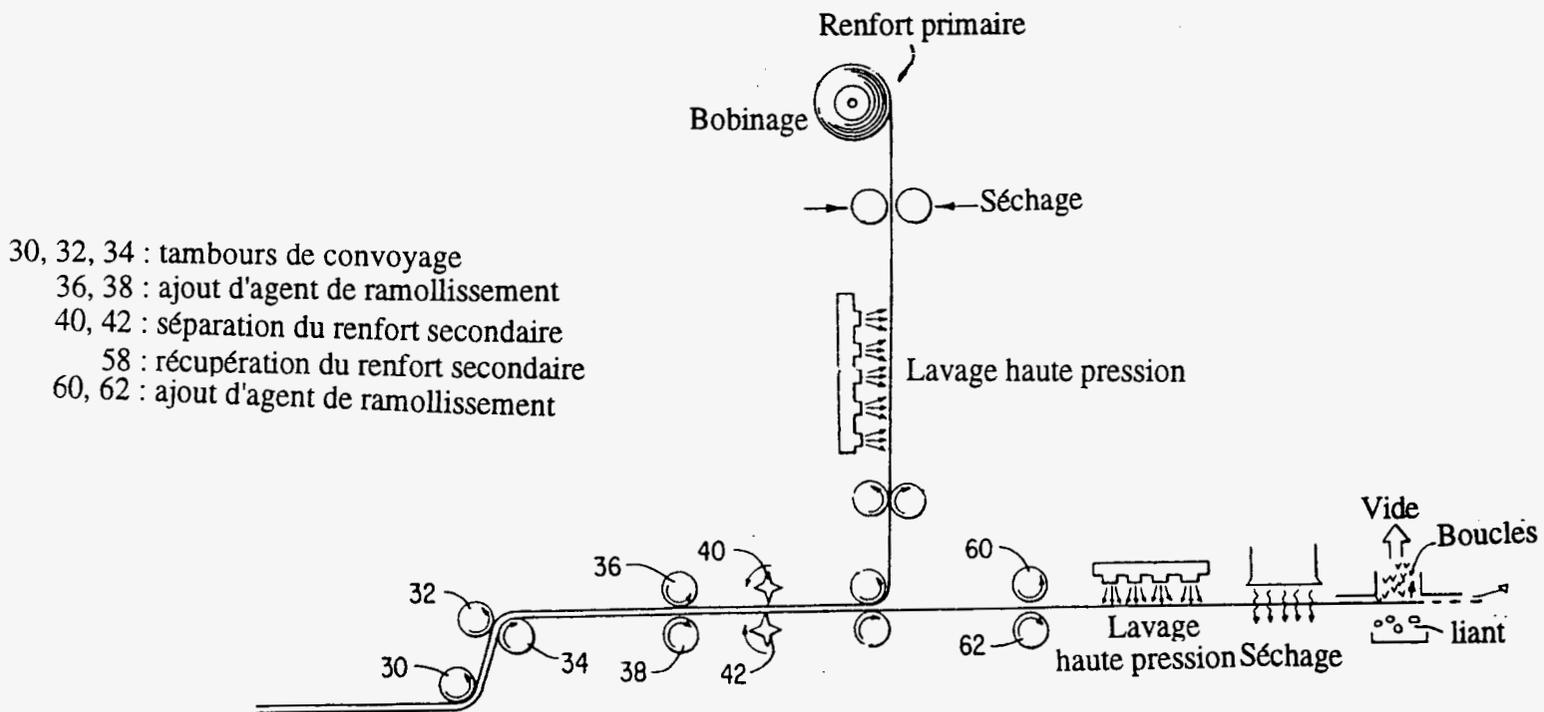


Figure n° 89 : Schéma de traitement des moquettes Monsanto

Les déchets sont ensuite mis au contact d'un mélange eau / ester (ester = diméthyl adipate, ou diméthyl succinate, ou diméthyl glutarate, ou une combinaison) soit par immersion, soit par dépôt de la solution sur la moquette. Les couches sont alors séparées mécaniquement, lavées sous pression et séchées (voir figure n° 89).

La matière issue des boucles ainsi récupérées (nylon) est utilisée pour la fabrication de nouvelles fibres de moquette ou de granulés, car elle présente un degré de pureté satisfaisant.

\* Broyage / classification pneumatique, BASF

Une équipe canadienne de BASF Corporation <sup>(213)</sup> a axé son travail sur la séparation par voie mécanique et physique des matières constituant les moquettes, en développant un nouveau procédé.

Ce traitement des moquettes passe par les étapes suivantes :

- 1) broyage de la moquette en bandelettes
- 2) traitement des bandelettes dans un broyeur à marteau puis dans un classificateur à air pour séparer les fibres (= fraction légère), qui représentent 55-75 % massique, du renfort (= fraction lourde).
- 3) second traitement de la fraction lourde contenant encore des fibres (représentant 35-55 %), par broyage et classification par air pour extraire les fibres restantes
- 4) criblage des fractions légères pour séparer les fibres des renforts restants, puis tamisage de la fraction lourde constituée par les renforts pour en extraire la quantité de fibres encore présente.
- 5) criblage et tamisage du mélange des diverses fractions de fibres (constituées à plus de 80 % de nylon)
- 6) granulation ou mise en balle directe des fibres ainsi obtenues

Le schéma représenté sur la figure n° 90 résume les différentes étapes de ce traitement.

\* Séparation en milieu fondu, BASF (R&D)

Une seconde voie explorée par BASF Corporation <sup>(214)</sup> concerne la séparation polyoléfine / nylon-6 par l'utilisation des différences de viscosité à l'état fondu de ces deux matières.

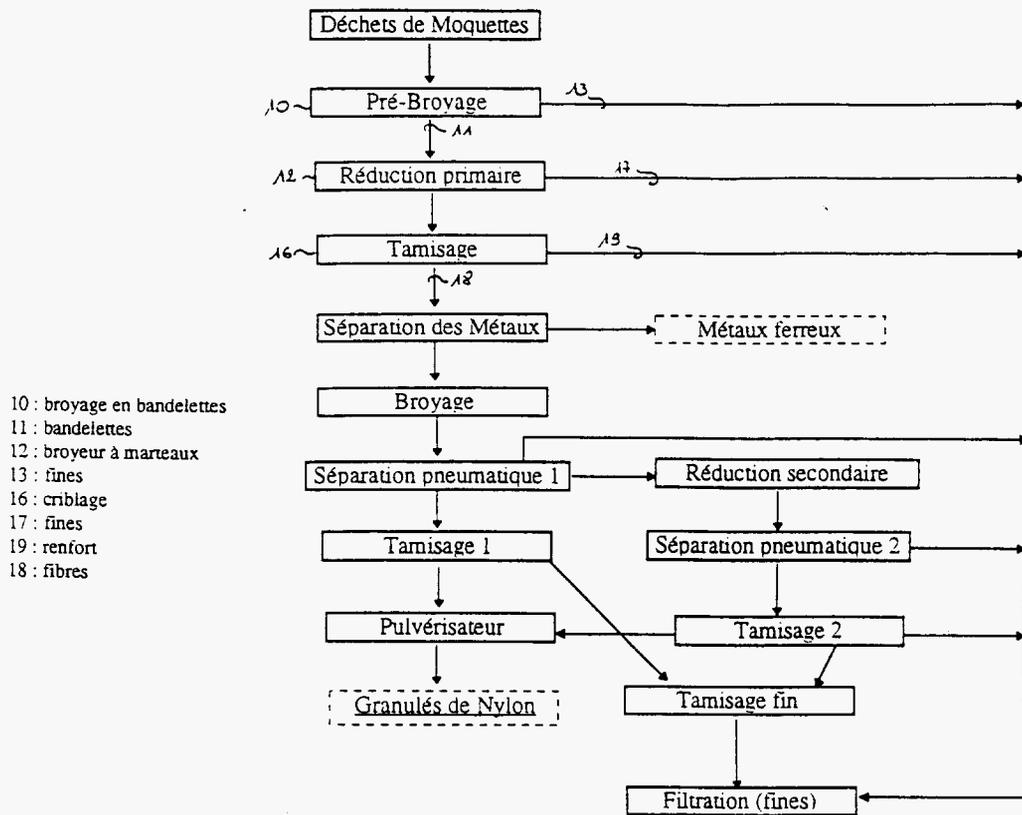


Figure n° 90 : Schéma de traitement des moquettes BASF

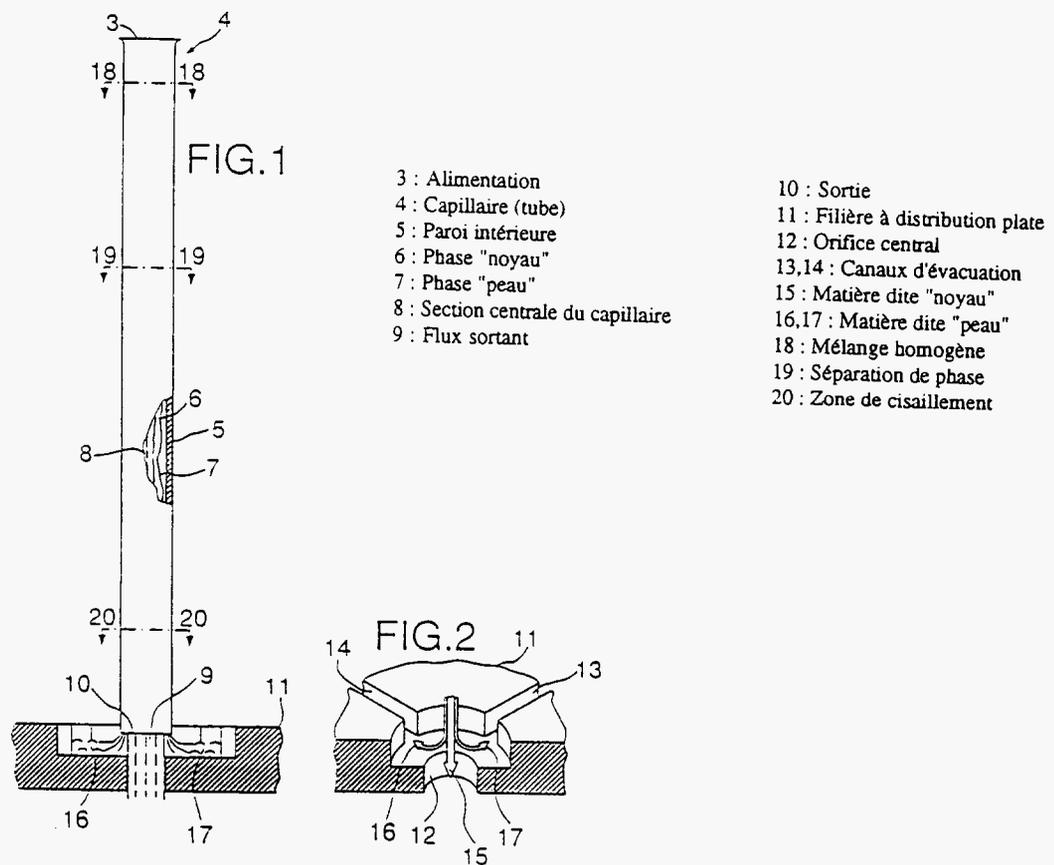


Figure n° 91 : Séparation par extrusion BASF

Le mélange PEhd / nylon-6 a été reproduit à partir de résines vierges. Il est extrudé en monovis, avec la présence d'une zone de cisaillement où la température et le taux de cisaillement appliqués sont suffisants pour provoquer une ségrégation de phase, séparant ainsi la polyoléfine du nylon-6 par une configuration du jonc extrudé type enveloppe / noyau.

La fibre "bicomposant" ainsi formée peut être récupérée en l'état, ou bien une séparation est réalisée en sortie de filière, où se trouve un évidement poussant la matière constituant l'enveloppe à sortir sur le côté, et la matière constituant le noyau à sortir par le centre, séparée de son enveloppe (se reporter à la figure n° 91).

NB : Cette technique peut aussi s'appliquer à des mélanges de polyamides, polyesters et polyoléfines autres que celles mentionnées ci-dessus.

## **E.2 - Procédés de séparation en voie humide**

### **\* Séparation par fluide supercritique, Georgia Tech. Corp. (R&D)**

L'équipe de M.E. Sikorski, du **Georgia Tech Research Corporation** <sup>(215)</sup>, a développé la séparation des moquettes par fluide supercritique.

Selon Sikorski, comme les polymères présents dans les moquettes sont solubles à des conditions de température et de pression différentes dans un fluide supercritique, l'extraction sélective du polymère ayant la plus petite plage de température et de pression pour sa solubilité est possible. L'opération d'extraction est répétée autant de fois qu'il y a de composés présents dans le mélange.

Les broyats de moquettes sont mis en agitation dans le fluide supercritique (qui peut être le CO<sub>2</sub>, l'éthane, le butane, le pentane, ou encore un mélange de ces composants) et par variation des conditions de température et/ou de pression, chacune des matières présentes est extraite sélectivement.

### **\* Séparation par flottaison / hydrocyclonage, Zimmer AG (R&D)**

Un procédé de séparation par densité en voie humide est proposé par la société **Zimmer AG** en Allemagne <sup>(216)</sup>.

La technique repose sur des étapes de broyage, de mise en suspension dans l'eau, avec ajustage de la densité des liquides par ajout de sel et séparation des matières par accélération différentielle (centrifugation).

Les moquettes, constituées principalement des trois composants (fibres, liant, renfort) sont broyées finement en voie humide, puis mises en suspension dans une liqueur dense de densité comprise entre les deux principaux composants à séparer.

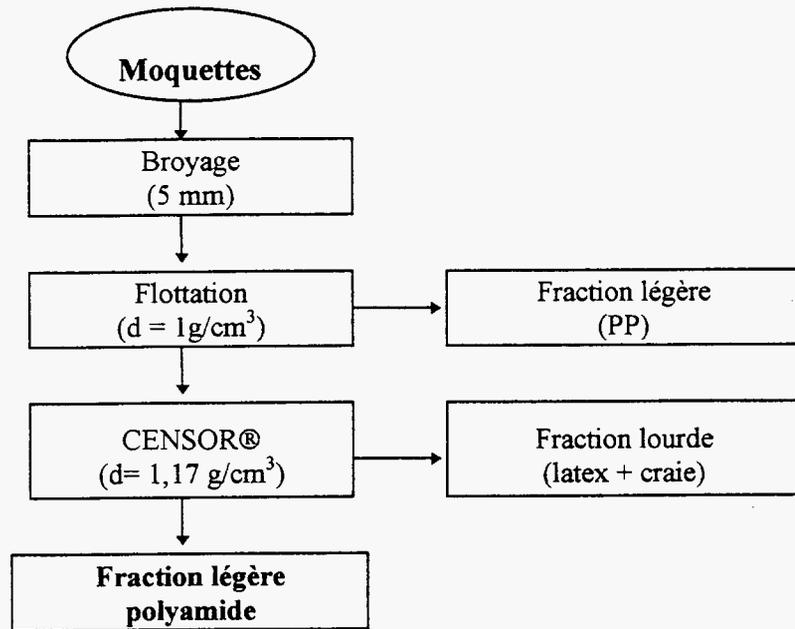


Figure n° 92 : Schéma de traitement CENSOR

La séparation est réalisée dans un séparateur centrifuge biconique et conduit à l'obtention d'une fraction majoritaire d'un des composés, les deux autres restant en mélange. Le mélange des deux composés restant subit ensuite un traitement similaire à une densité de bain appropriée.

Les trois fractions ainsi obtenues présentent des taux de pureté de l'ordre de 96-98 %, supérieurs à ceux obtenus par les techniques classiques de séparation en voie humide et d'hydrocyclonage.

*\* Procédé de dissolution sélective*

Des études ont aussi été réalisées sur la dissolution sélective des latex, liants souvent utilisés dans la fabrication des moquettes. Mais les résultats portent essentiellement sur les choix des solvants, qui peuvent être de surcroît biodégradables <sup>(217)</sup>.

En restant sur la technique de dissolution sélective, des essais ont été menés par la société **Karl Fischer Industrieanlagen GmbH** <sup>(218)</sup>. Ils portent sur la dissolution sélective du nylon-6 en présence d'une solution d'acide formique à 85 % à 40°C dans un mélange nylon-6 / PP. Le PP insoluble est séparé et lavé, et le nylon-6 est reprécipité puis récupéré sous forme de particules inférieures à 100 µm. Ces travaux restent à l'échelle du laboratoire.

Un brevet anonyme <sup>(219)</sup> a été déposé, reprenant cette technique de dissolution sélective des nylon-6 et nylon-66 dans une solution d'acide formique. Les moquettes à base de nylon-6 et de nylon-66 sont préalablement séparées par une identification (manuelle), basée sur le comportement thermique des deux matières (le nylon-6 a une température de fusion inférieure au nylon-66 et se ramollit plus rapidement lorsque les deux matières sont soumises à un rayonnement chaud).

*\* Procédé centrifuge Censor (R&D → industriel)*

Une société allemande <sup>(10)</sup> étudie actuellement, à l'échelle du pilote industriel, la récupération des polyamides issus des moquettes par sa technique de séparation centrifuge en voie humide CENSOR® (se reporter au Chapitre "Concentration gravimétrique"). Les moquettes suivent le traitement suivant la figure n° 92.

La forte turbulence qui existe dans l'appareil centrifuge permet en plus de désenchevêtrer les plastiques dès leur introduction.



Figure n° 93 : Identification NIR de moquettes, Brüker

### ***E.3 - Procédés de séparation par détection***

#### ***\* Identification NIR de DSM (R & D)***

Dans le cadre du programme européen RECAM <sup>(220, 220bis)</sup>, DSM Research, l'ICB (Institute for Chemical and Biochemical Sensor Research) et TNO travaillent en partenariat pour la mise au point d'une unité d'identification et de tri automatique des moquettes utilisant la spectroscopie NIR avec les filtres AOTF.

Le présent objet vise le développement de deux types d'appareils :

- identification des moquettes à la source : appareil portable, identification en 2 secondes → CarPID ® (coût souhaité : < 5 000 \$)
- identification automatique des moquettes en centre de traitement : appareil d'identification intégré sur une ligne automatique de tri, identification en moins de 100 ms → CarRID ®

L'appareil de détection devra être capable d'identifier la surface des fibres qui peuvent être en PA6, PA66, PP, PET, laine ou autres.

La technologie NIR permet de différencier sans problème les PP/PET/Polyamides, mais la différenciation PA6 - PA66 est plus délicate.

A ce jour, DSM a pu démontrer la possibilité de différenciation entre le PA6 et le PA66 avec leurs identifications, par l'utilisation d'une exploitation mathématique poussée des résultats.

Le prototype CarPID a été développé et les études de validation de la technique sont en cours, les résultats obtenus jusqu'alors étant encourageants.

Cependant, en ce qui concerne l'unité de tri automatique prévue, il sera nécessaire de s'affranchir du problème purement mécanique de désenchevêtrement des moquettes et de leur présentation correcte devant le détecteur.

#### ***\* Identification NIR, Brüker (commercial)***

**Brüker** <sup>(221)</sup> a récemment développé un spectromètre NIR capable d'identifier les moquettes. Cet appareil est d'ores et déjà commercialisé aux USA et un modèle de démonstration devrait être disponible en France en début 1998. Cet appareil est présenté sur la figure n° 93.

Insensible à la couleur des moquettes, à leur salissure, l'identification est réalisée en une seconde. Actuellement, il permet la détection de PA6, P66, PP, PET et de quelques alliages. Une extension des polymères en banque de données est tout à fait envisageable.

Enfin, d'autres techniques de traitement existent, mais sont essentiellement basées soit sur le traitement de la totalité des constituants de la moquette, sans aucune séparation<sup>(222, 223)</sup>, soit par valorisation chimique permettant la récupération d' $\epsilon$ -caprolactane à partir du nylon 6, ne nécessitant pas la séparation préalable des divers constituants de la moquette<sup>(224)</sup>. Ces techniques ne sont donc pas décrites dans ce document.

**APPLICATION :**

**F- Bâtiments / Travaux Publics (B.T.P.)**

<b>APPLICATION : B.T.P.</b>
-----------------------------

Menuiseries de fenêtres, isolation, revêtements de sols, câbles, canalisations, tuyauteries, équipements de salle de bains, les matières plastiques pénètrent le bâtiment par différentes voies, la part des matériaux synthétiques ayant doublé en 20 ans dans le B.T.P.

Selon des estimations récentes de SOFRES Conseil <sup>(225)</sup>, les déchets de matières plastiques trouvant leur origine dans le secteur du B.T.P. représentent environ 0,5 % de l'ensemble des déchets de la construction / déconstruction / réhabilitation, évalués au total à 230 millions de tonnes par an. Mais les déchets de matières plastiques issus de ces chantiers sont aujourd'hui difficiles à extraire car en quantité infime et éparse. Dans cette catégorie de déchets, les matières plastiques sont plutôt considérées comme des "indésirables" et sont très peu traitées.

Par contre, les rebuts de production et les chutes de pose sont plus facilement récupérés : le développement d'opération de valorisation s'est essentiellement basé sur cette typologie de déchets, étant axé essentiellement sur la récupération du PVC provenant des profilés, des canalisations et des revêtements de sols.

### ***F.1 - Séparation par procédés en voie sèche, purement mécaniques***

#### ***\* Séparation mixte de Véka (industriel)***

En Allemagne <sup>(226)</sup>, deux unités industrielles (VEKA et DEKURA) réalisent le traitement des profilés de fenêtres en PVC, sans démontage préalable des parties métalliques et des parties en verre. Le verre, les métaux et les joints sont séparés tandis que le PVC extrait est purifié, contrôlé et rebroyé finement. Il faut cependant préciser que ces techniques sont appliquées à des gisements parfaitement identifiés : le PVC est en fait recyclé en boucle fermée chez le fabricant de profilés qui récupère les déchets issus de son usine pour les réincorporer dans sa fabrication de nouveaux profilés.

**NB** : DEKURA a récemment implanté en France une unité de traitement de chutes de profilés PVC (mélanges PVC, caoutchoucs, films de protection triés).

VEKA Umwelttechnik <sup>(227)</sup> a développé des unités de séparation en voie sèche pour le traitement des menuiseries PVC à partir de la récupération de chute de coupe chez les producteurs VEKA et les poseurs.

Le Groupe VEKA traite donc ses propres déchets pour les insérer ensuite dans sa production : c'est donc un recyclage en boucle fermée.



Le process traite l'intégralité des fenêtres PVC avec un débit de 3 T / heure en faisant intervenir les étapes suivantes :

- broyage,
- séparation magnétique des métaux ferreux et non-ferreux,
- criblage,
- classification pneumatique,
- table densimétrique,
- tri couleur,
- extrusion / filtration,

ce qui conduit à l'obtention d'un PVC monocouleur (principalement blanc), pur à 100 % (selon VEKA).

Le schéma de la ligne de traitement Véka est donné sur la figure n° 94.

Le détail de leur technique est donné dans la fiche de visite correspondante.

## Conclusions

Différentes recherches ont été menées sur l'ensemble des technologies de séparation des matières plastiques, tant à l'échelle industrielle qu'au niveau recherche et développement, afin d'en présenter un état de l'art actuel. Une présentation théorique de ces techniques est donnée, et les applications des divers procédés s'étendent à l'ensemble des déchets de matières plastiques de production ou de post-consommation.

La problématique de la séparation des matières plastiques connaît actuellement un essor considérable, de par la volonté de collecte et de recyclage de l'ensemble de nos déchets, à l'échelle internationale. Une veille technologique devra être mise en place afin d'accroître l'utilité de ce document.

Une forte émergence des technologies de séparation mettant en œuvre des modules d'identification des matières plastiques, a été observée. Bien que le coût de traitement inhérent à ces procédés soit élevé, ils permettent d'obtenir des matières de haute qualité. De nombreux systèmes de détection sont d'ores et déjà opérationnels pour des applications diverses (déchets ménagers, automobiles, électriques/électroniques, textiles), mais ils ne sont pas utilisés au maximum de leur capacité dans le cadre de l'automatisation du tri, de par un cruel manque de développement actuel sur le plan « mécanique » (singulation des pièces, présentation devant les capteurs, éjection, etc...).

Les technologies de classifications dimensionnelle, hydraulique et pneumatique sont les plus fréquemment mises en œuvre au niveau industriel, et des optimisations de procédés, par typologie de déchets, font l'objet de nombreux travaux.

Les séparations par fluide supercritique et par dissolution sélective demeurent à ce jour au stade R&D.

Il est impossible de conclure quant à l'efficacité d'une technique de séparation par rapport à une autre, étant entendu que cela dépend directement du gisement de départ et de la qualité des produits recyclés recherchés. Il demeure nécessaire de réaliser des essais en se plaçant en condition réelle de traitement, une étude « papier » des technologies permettant seulement de prendre une orientation dans le choix des technologies à tester. La validation des procédés n'est possible qu'après essais et optimisation de la séparation.

Les différentes technologies décrites dans ce document, ainsi que les multiples exemples d'applications industrielles ou en développement cités, nous ont permis de dresser un tableau récapitulatif des techniques de séparation par type de mélanges de matières plastiques.

Ce tableau est donné au verso, sur la figure n° 95. Les informations rassemblées tiennent compte des réalités de terrain, c'est à dire des problèmes de séparation de mélanges de matières plastiques rencontrés à ce jour (par exemple, les mélanges ABS + PEN ne sont pas courants, et rien n'est mentionné dans le tableau concernant leur traitement, bien que l'on sache qu'une séparation par détection est possible). Mais ce tableau n'est pas limitatif et peut être élargi à d'autres types de mélanges.

Matière	PE	PP	PVC	PET	PEN	PS	ABS	ABS/PC	PC	PMMA	PA 6	PA 6-6	PUR
PE	11	11-12	1-4-11-12	1-4-11-12		4-11	4-11	4-11	1-4-11-12	1-4-11	4-11	4-11	1-2-3
PP	6-8-11	—	4-11	4-13-12		4-11	4-11	4-11	1-4-11	11	4-11	4-11	1-2-3
PVC	8-10-11	10-11	—	1-2-9-10-12		4-11	4-11	4-11	1-11-12	1-11	11-12	11-12	1-2-3
PET			7-10	11		4-11	11	11	11	11	11	11	1-2-3
PEN	12	12	11	11	—								1-2-3
PS	2	10	9-10			—	11	11	11-12	11			1-2-3
ABS		7-10	4-6-9			7	—	11	1-11	1-11	11	11	1-2-3
ABS/PC			6-9					—	1-11	11	11	11	1-2-3
PC	7		7-9			2	7		—	11			1-2-3
PMMA	10-11	10	9-10			2-6-10	2-6-10		10	11			1-2-3
PA 6		2-3-4-10	9	10			10				—		1-2-3
PA 6-6		2-3-4	9									—	1-2-3
PUR			4										—

**Tableau récapitulatif des techniques de séparation des matières plastiques**

Codes des séparations :

Séparation	Codes	Séparation	Codes
Tri manuel	1	Tri magnétique	8
Fragmentation + Criblage	2-3	Tri électrostatique	9
Zig-Zag, Cyclone, Bac de Flottaison, Hydrocyclone, Table à lit fluidisé	4	Dissolution sélective	10
Fluide supercritique	5	Détections IR, fluorescence X, Tri optique, Détection autres	11
Tri balistique	6	Bande transporteuse chauffée, extrusion-filtration	12
Flottation-moussage	7		

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

### I - Généralités

- 1) Techniques de l'Ingénieur. Volume A.10 "Séparation. Mélanges", Pierre Michel
  - Fragmentation : A 5050, A 5060, A 5070, A 5080
  - Criblage : A 5100
  - Classification par sédimentation : A 5150, A 5160
  - Concentration gravimétrique : A 5190
  - Triage magnétique : A 5300
  - Flottation : A 5350, A 5360
- 2) Perry's Chemical Engineers' Handbook - Sixth Edition, Robert H. Perry
- 3) « MIR : a proven technology for identification of engineering plastics », K. Vornberger (BMW), Identiplast 97, 27-28 Oct. 1997, Bruxelles
- 4) « Recovery and reuse of plastics materials derived from automobile production and scrapping », Programme RECAP, Projet Eureka 506, Final Report (06/90-04/97)
- 4bis) « Recovery and reuse of plastics materials derived from automobile production and scrapping », Programme RECAP, Projet Eureka 506, Summary Report (04/97)
- 5) "Process and apparatus for separating heterogeneous plastic material into homogeneous fractions", A. Vezzoli, M. Lamperti, F. Milani, B. Albrisi, Brevet EP n° 0 469 904 B.1 (21/02/96)
- 6) US Patent n° 4 617 111, Grimm et al.
- 7) "Method for separating a mixture of two plastics with similar specific gravities", B.K. Mikofalvy (BF Goodrich Company), Brevet EP n° 0 557 895 A1 (01/09/93)
- 8) : S.G. Howell, Journal of Hazard Mat., Vol. 29, 1992, p. 143-164
- 9) "Recyclage des matières plastiques", Document de présentation interne, Refakt-Herbold
- 10) "High duty plastics recycling with centrifugal force using CENSOR® technology", J. Neureither, R'97, vol. III, 1997, p 117-125.
- 11) "The microsotation of post-consumer thermoplastics using near-critical liquids" E. Beckman, R. Enick (University of Pittsburgh), Globec'96, Environmental Technologies Davos Switzerland - March 18 - 22, 1996.
- 12) "Use of near critical liquids and aqueous solutions for the float-sink microsotation of recyclable post-consumer plastics", R. Enick, B.L. Altland (Pittsburgh), Technical Report (01/07/93 - 30/06/94)
- 13) "Separation of thermoplastics by density using near-critical and super-critical carbon dioxide and sulfur hexafluoride", M. Super, R. Enick, E. Beckman (Pittsburgh), Davos Recycle'92, April 7 - 10, 1992 - Vol. 5/7 - p. 2 - 19.

- 14) "Separation of thermoplastics by density using near and supercritical fluids as a precursor to recycling", M. SUPER, R. ENICK, E. BECKMAN (Pittsburgh), ANTEC'91, 1991, p. 2130 - 2133.
- 15) "Optimization of the high-pressure, near-critical liquid-based microsortation of recyclable post-consumer plastics", B.L. ALTLAND (Pittsburgh), Resources Conservation and Recycling, Vol. 15, 1995, p. 203 - 217
- 16) "Separation of polyethylene terephthalate and polyvinyl chloride using supercritical carbon dioxide", US Patent N° 5, 462, 973 (Oct. 1995), G. SERAD, T. THORNBURG, Hoechst Celanese Corporation
- 17) "The separation of plastics by Aphron flotation II Effect of particle size", J.J. READ, G.C. LEES, S.J. HURST, R.S. WHITEHOUSE, M. BARREL, Polymer recycling, Vol 2, n° 1, 1996.
- 18) "Flotation separation of mixed plastics from municipal solid wastes", G.D. HOOD (US Bureau of Mines), Adv. Filtr. Sep. Technology, Vol. 5, 1992, p. 29-40
- 19) « Plastics flotation », N. Fraunholz, Mémoire de Thèse soutenue le 08/12/97, TU Delft (Pays-Bas)
- 20) «Physico-chemical separation (flotation) of plastic waste before recycling », C. Le Guern, P. Conil, R. Houot (BRGM), Proceedings of the XX IMPC, Aachen, 21-26 Sept. 1997
- 21) « Recycling of electronic scrap », M. Melchiorre, H.J. Haepf, R. Jakob (Daimler-Benz), 1996
- 22) "Electrostatic separation of mixed granular materials", O.C. Ralston, Elsevier, Amsterdam, 1961.
- 23) " The effect of an external added charge control agent on contact charging between polymers", Y. Higashiyama et al., Journal of electrostatics, Vol. 30, 1993, p. 203-211
- 24) "Separation of different plastics with a triboelectrical drum separator", M. Botsch (Hamos GmbH), Polymer Recycling Buch EKS, 1996
- 25) "Electrostatic separation of polymer powders", D.K. Yanar, B.A. Kwetkus, Journal of electrostatics, 35, 1995, p. 257-266.
- 26) "Mixed plastic waste recycling process", Futuretech n° 119, December 10, 1990
- 27) "Dissolution and reprecipitation : a promising route for thermoplastics recycling" , C.D. Papaspyrides, R'97, Vol. IV,1997, p. 120
- 28) "Separation of commingled plastics by selective dissolution", J.C. Lynch, E.B. Nauman (Rensselaer Polytechnic Institute), Proc. SPE-RETEC, Charlotte, NC, October 30, 1989
- 29) "Recycling of commingled plasticq by selective dissolution", J.C. Lynch, E.B. Nauman (Rensselaer Polytechnic Institute), Proc. 10<sup>th</sup> Intl Coextrusion Conf., 1989, p. 99-110
- 30) "Rensselaer's selective dissolution process for plastics recycling", J.C. LYNCH, E.B. NAUMAN (Rensselaer Polytechnic Institute), A review and update, March 1992

- 31) "Multi-solvent, low pressure solution process for recovery from mixed post-consumer plastics", LELAND M. VANE (Cornell University), Plastic Waste Management, SPE, Oct. 17-18, 1990
- 32) "A process to recover plastics from obsolete automobiles by using solvents at ambient pressure", B.J. JODY, E.D. DANIELS, P.V. BONSIGNORE, N.F. BROCKMEIER (Argonne National Recovery), Proceeding of the 206th Am. Chem. Soc. National Meeting, Chicago, August 22-27, 1993
- 33) "Way to regain PE and PP and other polyolefines from return material, especially such of composite type", Sven LJUNGBO, Brevet n° WO 94 / 09064 (28/04/94)
- 34) "Polymer recycling by selective dissolution, E.B. Nauman (Rensselaer Polytechnic Institute), US Patent n° 5 278 282 (11/01/94)
- 35) "Polymer recycling by selective dissolution, E.B. Nauman (Rensselaer Polytechnic Institute), US Patent n° 5 198 471 (30/03/93)
- 36) « Recycling PS by dissolution with solvent recovery », F. Rodriguez (Cornell University) ANTEC'97, 1997, p. 3155-3159
- 37) "Identification of plastic parts : FT-IR Technique in the recycling of electronic equipment " J. Jansen, C. Hastenberg (Eindhoven), Kunststoffe Plasteurop, January 1994.
- 38) "Automated plastics identification - The key to material recycling" B. Krummenacher, P. Peuch (APME), R'97, Vol. III, 1997, p. 62
- 39) "Automated material identification in recycling : potential spectroscopy identification processes evaluated", Plastics in Automotive Engineering - March 1994.
- 40) "Applications of diffuse reflectance optics for the characterization of polymer surface by Fourier Transform IR spectroscopy", J.A. Jansen, W.E. Haas, Polymer Communications, 1988, Vol. 29, Mars.
- 41) "Recycling of plastics : automatic identification of polymers by spectroscopic methods" , J. Florestan, N. Merwilliod, JC. Boulou, EMRS 92, Fall Meeting, Symposium E-III(1), 1992.
- 42) "Handbook of Near-Infrared Analysis", Marcel Dekker, New York (USA), 1992.
- 43) "Economic solutions to materials recycling of plastics using the Buhler NIR spectrometer NIRIKS", D. Schudel, W. Koller (Buhler) R'95, Vol. III, 1995, p. 257.
- 44) "Automatically grading plastics waste : a decisive step toward practical application", H. Ritzmann, D. Schudel (Buhler), Kunststoffe Plast-Europe, May 1994.
- 45) "Fast identification of organic substances utilizing F-NIR spectroscopy", H. Ritzmann (Buhler), Davos Recycle'92, April 7-10, 1992, Vol. 5(5).
- 46) "Progress report on fast plastic identification with NIR : new ways for the sorting of mixed plastics waste", H. Ritzmann (Buhler), Davos Recycle'93, March 22-26, 1993, Vol. 11(1).
- 47) "Fast on line identification of plastic materials by near infrared spectroscopy", N. Eisenreich, J. Herz, H. Kull, W. Mayer (Fraunhofer), R'95. Vol. III, 1995.

- 48) "NIR News", H.W. Siesler, Vol. 6 (1), S.3., 1995.
- 49) « A two colour NIR sensor for sorting recycled plastic wastes », D.M. Scott, Meas. Sci. Technol., Vol.6, 1995, p. 156-159
- 50) "FT Raman automatic identification of plastic wastes", J. Florestan, A. Lachambre, N. Mermilliod, J.C. Boulou (CEA - CEREM - DEM/BRUKER), MOFFIS 93 (Namur-Belgique)
- 51) "Fourier Transform Raman spectroscopy : Instrumental and Chemical applications" D.M. Masson, D. J. F. Tyson, Eds. Ellis Horwood Limited, New York, 1991.
- 52-53) "Applications of Laser - Induced Emission Spectral Analysis for Industrial Process and Quality Control", C.J. Lorenzen, C. Carlhoff, U. Hahn, (Krupp) Journal of analytical atomic spectrometry, Vol. 7, Sept. 1992, p. 1029 - 1035.
- 54) « Sliding Spark Technology », T. Seidel (Abfallentsorgung Gesellschaft Ruhrgebiet / AGR), Identiplast Bruxelles, 27-28 Oct. 1997
- 55) "Use of X-ray fluorescence for sorting vinyl from other packaging materials in Municipal Solid Waste", J.W. Summers, S. Little, Journal of Vinyl Technology, Sept. 1990, Vol. 12 (n°3).
- 56) "Laser-aided material identification for the waste sorting process", M. Haferkamp, K. Engel (Lazer Zentrum Hannover), SPIE Vol. 2092, Substance Detection Systems, 1993.
- 57) "Automatic sorting for electronic scrap recycling by means of infrared laser impulse thermography", H. Spaniol, T. Ehrle, Aufbereitungs-Technik 36, n° 4, 1995.
- 58) "An ultrasonic method for identifying polymeric materials/components for reclamation and recycling", J.B. Hull, C.M. Langton, A.R. Jonest, Macromolecular reports, A 31 (Suppls. 6 & 7), 1994, p. 1191 - 1199.
- 59) "Automatic sorting and recycling of post-user plastic waste" H. Münch, H. Allhorn, M. Van Halteren, RWE Entsorgung, Davos Recycle'93, March 22-26, 1993, Vol. 11(4).
- 60) « Optical Sorting », A. Balzan (ESM / Satake), Identiplast Bruxelles, 27-28 Oct. 1997
- 61) Documentation technique Mogensen
- 62) "Identification of plastic waste using spectroscopy and neural networks", D.M. Scott, R.L. Waterland (Du Pont de Nemours), Polymer Engineering and Science, June 1995, Vol. 35, n° 12.
- 63) "Near infrared spectroscopy and neural networks for resin identification", M.K. ALAM, S.L. STANTON, G.A. HEBNER, Spectroscopy, Vol 9(2), Feb. 1994.
- 64) "NIR-remote sensing and artificial neural networks for rapid identification of post-consumer plastics", T. HUTHFEHRE, R. FELDHOFF, Th. KANTIMM, V. VAN DEN BROEK, Journal of molecular structure, n°348, 1995

- 65) "Identifying plastics : analytical methods facilitate grading used plastics", N. Eisenreich, Th. Rohe, *Kunststoffe Plast europe*, February 1996, p. 31 - 32. (translated from *Kunststoffe* 86 (2) , 1996, p. 222-224).
- 66) "Improvement of recycle quality by sorting plastics parts from automotive and E/E Scrap by a polymer identification system", K. Vornberger, G. Zachmann, B. Willenberg, *Plastics Recycling*, SPE Chicago, Nov. 3 - 4, 1994.
- 67) "Automatic sorting for mixed plastics", P. Dinger, *Biocycle*, March 1992
- 68) « Method for identifying polymer materials », Brevet n° 2 264 558, A. E. Theocharous (BP Company) - 17/02/93
- 69) « The high speed and positive identification of polymers, and variants of polymers by the detection of fluorescent tracers », B. Overton (APME), *Identiplast Bruxelles*, 27-28 Oct. 1997
- 70) Hahl Peter, Brevet Allemand DE 4 3 17808 (28/05/93)
- 71) B. Heinrich, Brevet Français n° 9101616 (12/02/91), Refakt Anlagenbau GmbH.
- 72) "PVC melt point keys scrap separation", *Modern Plastics*, June 1990, p.15-16
- 73) M.P. Zielinski, Brevet US Patent n° 50 61 735, (29/10/91), Plastic Recovery Systems.
- 74) H. Munschek, A. Limper, Werner und Pfeleiderer Gummitechnik GmbH, Brevet Allemand n° DE 44 46579 (27/06/96).
- 75) Traduction de la brochure "Filtration von Kunststoffschmelzen", Detlef Gneuss.
- 76) "Two stage melt filtration", G. Barich, S. Homborg, *Kunststoffe Plasteurope*, Sept. 96, p.24 (traduit du *Kunststoffe* 86 (1996) vol.9 p.1324-1329).
- 77) "The use of post-consumer PVC recycle to produce semi-weatherable articles", L.G. Shan (Occidental Chemical Corporation), *SPE vinyl RETEC'91*, 1991.
- 78) "Melt filtration of recycled PVC", H.K. Boo, B.K. Mikofalvy, J.W. Summers (BF Goodrich), *ANTEC'92*, 1992, p.1934-1937.
- 79) "Melt filtration : the final step in the purification of PVC bottles for recycling", G.M. Sadowski, L.G. Shaw, (Occidental Chemical Corporation) *ANTEC'92*, 1992, p. 1938-1941.
- 80) "Filtered extrusion of recycled plastic melt through constant pressure filtration system", H.N. Patel, F.S. Lai (University of Massachusetts, Lowell) *ANTEC'92*, 1992, p.1192-1195
- 81) "Screen changers adapt to a more demanding era", M. Pavia, *Modern Plastics International*, August 1992, p.30-33
- 82) " Separation of polymers", W. Mahler, E.I. Du Pont de Nemours and Co., US Patent n° 5 385 950 (31/01/95),

- 83) "Method of separating polymers from mixtures there of", Davis M.A., BASF Corporation, European Patent n° EP 0 714 918 (05/06/96)
- 84) « Filters and screen pack changer », M. Berg, Kunststoffe Plast Europe, February 1997, p. 8-11
- 85) « Screen changers adapt to a more demanding era », M. Pavia, Modern Plastics International, August 1992, p. 30-33
- 86) Documentation technique Beringer
- 87) Documentation technique Gemini
- 88) Documentation technique Kreyenborg
- 89) Documentation technique Trendelkamp
- 90) Documentation technique Wil-Man
- 91) Documentation technique Hitech
- 92) Documentation technique Erema
- 93) « La spécialisation recyclage : originalité et performances des technologies Erema », Plastiques Flash n°294/295, Janv.-Fév. 1997
- 93bis) « Procédé de filtration Scamia » Document interne CEREMAP
- 94) « Two stage melt filtration », G. Barich, S. Homborg, Kunststoffe Plast Europe, Sept. 1996, p. 24-25

## **II - Applications**

### **II - 1 Emballages**

- 95) "Automatic microsorting for mixed plastics", P. Dinger, Biocycle, April 1992
- 96) "Automatic plastic bottle separation - Case studies, new developments and recycling overview", G.R. Kenny D. Vaughan (MSS), R'95, Vol. 3, 1995, p. 215-229
- 97) "Le tri automatique des polymères s'industrialise", P. Laperrousaz, J.M. Meyer, L'Usine Nouvelle, Fév. 1996, p. 138-141
- 98) "Automatic sortation of plastics", H. Frankel (Rutgers University), Davos Recycle'92, April 7-10, 1992, Vol. 14(1)-1.
- 99) "Automatic sortation of post-consumers rigid plastic containers", H. Frankel (Rutgers University), presented at RETEC, Waterbury, June 3, 1991.
- 100) "New developments in the processing of recycled plastics", F. Dittman (Rutgers University), presented at RETEC, November 30, 1990.

- 101) Documentations techniques N.R.T. (Vinyl Cycle<sup>®</sup>, Autosort<sup>®</sup>).
- 102) "Method and apparatus for the separation of materials using penetrating electromagnetic radiation", E.J. Sommer, J.R. Peatman (NRT Inc.), US Patent n° 5, 260, 576 (03/11/93).
- 103) « New techniques for rapid identification and sorting of plastics », E.J. Sommers (National Recovery Technologies / NRT), Identiplast Bruxelles, 27-28 Oct. 1997
- 104) "Tri automatique", E. Sereni, J. Gallego (Govoni), Document Interne.
- 105) Brevet US 4, 884, 369 (5/12/89), C. Gulmini (Govoni SpA), Ferrara, Italie.
- 106) "Optimisation of plastic bottle sorting", G.R. Kenny, D. Vaughan (Magnetic Separation System), Society of Plastics Engineers, Nov 3-4, 1994.
- 107) "MSS announces world's first PVC flakes detector", MSS Inc., Sept 26, 1994, For immediate release, Doc. Tech. Int.
- 108) Voir référence (96).
- 109) "New challenges and developments in plastic sorting", G.R. Kenny, C.I. Cross (MSS Inc.), R'97, 1997, Vol. III, p. 37-44.
- 110) "Automated separation of post-consumer plastic containers" G. Kenny, RS. Bruner (MSS Inc.), DAVOS RECYCLE'92, April 7-10, 1992, p.14/2-3 à 2-11.
- 111) « High speed plastics sorting systems », G. Kenny (MSS Inc.), Identiplast Bruxelles, 27-28 Oct. 1997
- 112) Doc. Tech. Int. A.I.C., 7128 Ambassador Road, Baltimore, MD 21207.
- 113) "Triage souple de matières plastiques", Doc. Int. BB Binder + Co AG
- 114) « Industrial sorting technologies », D. Freydl (Binder), Identiplast Bruxelles, 27-28 Oct. 1997
- 115) « Sorting plastics waste by colour and by material : technology and practical experience », R. Massen (Massen Machine Vision Systems / MMVS), Identiplast Bruxelles, 27-28 Oct. 1997
- 116) Discussion personnelle Ceremap / IRS Ltd, Identiplast Bruxelles, 27-28 Oct. 1997
- 117) Doc. Int. Simco Ramic Corporation, 2067 Commerce Drive Medford, OR 97504, USA.
- 118) Doc. Int. ESM
- 119) "Valoriser vos déchets plastiques", Doc. Interne Sydel, BP 2834, 56312 Lorient Cx.
- 120) "Tri neuronal des plastiques", Doc. Interne Vauché, 19 Bld Gambetta, 08200 Sedan.
- 121) Doc. Int. Pellenc (machine Planeco)

122) "Application of artificial intelligence to classification and sorting of recyclable containers", T.A. Newell, P. Ferreira (University of Illinois), Final Project Report, December 1994.

123) « NIR automatic identification and sorting system », K. Yoneda (Mitsubishi Heavy Industries), Identiplast Bruxelles, 27-28 Oct. 1997

124) « Preparation of marked PVC by reactive processing for identification by UV devices », M. Hidalgo, D. Lopez, C. Mijangos, Journal of Vinyl Technology, Vol. 16 (3), Sept. 1994

125) Doc. Interne Carpco

126) "Analysis of first round of teshing for Q/M", M.H. Beck, J.M. Crowley Devtech Labs Inc, Electrostatic Applications, April 1991.

127) "Dry separation method for mixed plastics", U.K. Kleffmann, A. Hollstein, I. Stahl (Kali und Salz AG), DAVOS, Recycle 92, 1992

128) « Sorting of plastic using the electrostatic separation process », I. Stahl , P.M. Beier (Kali und Salz), Proceedings of the XX IMPC, Aachen, 21-26 Sept. 1997

129) « Plastics waste sorting in DSD and automatic identification », D.E. Uhlig (Duales System Deutschland), Identiplast Bruxelles, 27-28 Oct. 1997

130) Doc. interne Rutgers

131) "Procédé de séparation du PVC et du PET par voie sèche", R. Famechon, G. Tersac, Récent progrès en génie des procédés, vol. 9, 1995, p. 79-86

132) "Separation of PVC from PET by micronyl process, R. Famechon, Makromol. Chem. vol. 57, 1992, p. 95-102

133) Brevet n° 8901752 (10/02/89), Micronyl

134) Doc. interne Modern Machinery Inc.

## II - 2 Films photographiques / radiographiques

135) "Poly(ethylene terephthalate) film recycling", W. de Winter, Recycling of plastics Materials, 1993

136) "Recycling of Poly(ethylene terephthalate)", W. de Winter, Makromol. Chem., Macromol. Symp., Vol. 57, p.253-263, 1992

137) "Adhesive coating from polyester film for recycling", WE Graham, R.R.M. Jones, n° brevet : EP 76 1731 (12/03/97), E.I. Du Pont De Nemours and Co.

138) "Recovery of polyester from scrap by high shear conditions", K.R. Buser, T.A. Rettig, n° brevet : US 4 602 046 (22/07/86) E.I. Du Pont De Nemours and Co.

- 139) "Recovery of cellulose lower fatty acid ester-based plastics by using organic solvents" K. Shiba, N. Ito, T. Nishina, n° brevet : JP 0826 9225 (15/10/96), Fuji Photographic Film Co. Ltd
- 140) "Method for recycling of cellulose ester-containing plastics", K. Shiba, T. Nishina, n° brevet : JP 0528 1686, Fuji Photographic Film Co. Ltd
- 141) "Recycling of cellulose lower fatty acid ester moldings", K. Shiba, S. Nakamura, Fuji Photographic Film Co Ltd
- 142) Reclamation of polyester photographic material support by alkali solution" F. Kawamoto n° brevet : JP 0814 6560, Fuji Photographic Film Co. Ltd
- 143) "Silver recovery and polyester recycling from photographic film scrap" J.R. Clelland, O.M. Pilak, B.L. Simpson, J.L. Zarnstorff, Res. Discl. (1981), Vol. 201, p.28
- 144) "Recovery of silver and carrier from waste film by use of gelatin-degrading microbes" C. Gehre, U. Iske, F. Glombitza, I. Klein, n° brevet : DD 256 333 (04/05/88), Akademie der Wissenschaften der DDR
- 145) "Decomposition of gelatin layers on x-rays films by the alkaline protease" N. Fujiwara, K. Yamamoto, Hakko Kogaku Kaishi (1987) vol. 65 (6), p. 531-534
- 146) "Apparatus and method for recovering silver contained in photographic and cinematographic films" F. Sicaworms, n° brevet : FR 24 26 927 (21/12/79)
- 147) "Silver and support recovery from photographic films", P.A. Phillips, n° brevet : DE 27 48 051 (27/04/78)
- 148) "Recovery of silver and supports from used photographic films" I. Sandu, S.V. Panait, O.F. Chifor (Institutul Politehnic, Iasi, Rom.) n° brevet : RO 104938 (10/12/94)
- 149) "Recovery of silver and plastics from photographic materials", G. Senecal, n° brevet : CA 2055 720 (16/05/93)
- 150) "Recovery of silver and a carrier from photosensitive material wastes" C. Craiu, M. Cruceru, C. Licaret, n° brevet : RO 81261 (30/01/83)
- 151) "Separate recovery of silver and polyester from used x-ray films through the use of a bioreactor", N. Fujiwara, Konbatekku (1990), vol. 5, p. 32-35
- 152) "Solventless process for recovery of cellulose triacetate from photographic film scrap" R.G. Surash, C.C. Lewis, n° brevet : US 5500 328 (19/03/96)
- 153) "Compositions and process for removing adhesives and metal halide layers from polymeric film" J.A. Jr Schwartz, Parkek Inc. n° brevet : US 5366 998 (22/11/94)
- 154) "Method of removing photosensitive agents of photographic films" H. Rokutanda, n° brevet : JP 0613 0615 (13/05/94)
- 155) "Method for restoring cine film", S.G. Tereshkova, EA. Prodan, Institute of General and Inorganic Chemistry (Biélorussie), n° brevet : SU 1282 065 (07/01/87)

156) "Method of restoring triacetate base of cine film", S.G. Tereshkova, EA. Prodan, Institute of General and Inorganic Chemistry (Biélorussie), n° brevet : SU 1282 064

## II - 2 Automobile

157) "Separation of different plastics with a triboelectrical drum separator", M. Botsch, Polymer Recycling Buch EKS, 1996

158) "Method for recovering PVC and urethane foam from commingled trim waste using elutriators", P.L. Belliveau (Davidson Textron Inc.) Brevet n° EP 0 594 307 (27/04/94).

159) "Method for recovering PVC and urethane foam from automotive interior trim waste", R.A. Grimmer (Davidson Textron Inc.), Brevet n° EP 0 469 270 (05/02/92).

160) "Recycling techniques for plastic composites", M. Melchiorre, K. Löhr (Daimler-Benz AG, Germany), Polymer Recycling, Vol. 1, n°3, 1995, p. 175-185

161) Daimler-Benz AG : Environmental Report 1996

162) Doc. Interne Association Autovinyle

163) "Recycling of plastics from cars : proposals from the RECAP project", P. Cortesi (Enichem), R'97, Vol. III, 1997, p. 15-20

164) "Recovery and Reuse of Plastic Materials Derived from Automobile Production and Scrapping", Programme RECAP, Projet EUREKA 506 - Final Report (06/90 - 04/97)

165) "Recyclage : un problème pour le PMMA ?", Rudolf BLASS (Röhm), Plastiques modernes et élastomères, Sept. 1993, p. 63-65

166) "Eintecs, recyclage par microvibrations", Plastiques modernes et élastomères, Sept. 1993, p. 61-62

167) S. MIYAMA, Conserv. & Recycling, Vol. 10 (4), 1987, p.265-272

168) « The outline of separation technology of plastics waste developed and practiced in Japan », A. Miyake (PWMI), Identiplast Bruxelles, 27-28 Oct. 1997

168bis) « Technologies des puissances pulsées à haute performance », SRTI System. Document interne CEREMAP

1) « Recycling technology for automotive plastics », T. Ohba (Nissan Motor), Journal of the Institution for safety of high pressure gas engineering (Koatsu Gas), Vol. 33 (3), 1996, p. 206-215

170) Brevet japonais n° JP 8150689 (01/12/81), FURUKAWA Electric Co.

171) « Experience from the automobile industry in the USA », R. Pett (Ford), Identiplast Bruxelles, 27-28 Oct. 1997

- 172) « Sorting of waste plastic mixtures by flotation », B.T.O. Stückard, K. Löhr, V. Vogt (Daimler-Benz AG), Proceedings of the XX IMPC, Aachen, 21-26 Sept. 1997
- 173) "Recyclates in automobile construction", K. Graser, R. Hoock, Kunststoffe Plast Europe March 1995, p. 15-18
- 174) "Ford breakthrough in plastics identification : recycling made more viable by handheld polymer identifier", Ford New Release, 94/102, May 1994
- 175) "Rapid identification of plastics components recovered from scrap automobiles" J. Graham, P.J. Hendra, P. Muci (University of Southampton) Plastics, rubber and composites processing and applications, vol. 24, 1995, p. 55-67
- 176) "Improvement of recyclate quality by sorting plastic parts from automotive - First experiences at the BMW dismantling and recycling center", K. Vornberger (BMW), Plastics Recycling, SPE, Chicago, Nov. 3-4, 1994
- 177) "Recyclage : le P/ID 28, un nouvel outil d'analyse", I. GEYER (Brüker), Caoutchoucs et Plastiques, n° 751, Juin-Juillet 1996, p. 34-36
- 178) "MIR : a proven technology for identification of engineering plastics", B. Willenberg (Brüker), K. Vornberger (BMW), Identiplast Bruxelles, 27-28 Nov. 1997
- 179) "Le tri automatique des polymères s'industrialise", L'Usine Nouvelle, Fév. 1996, p. 138-141
- 180) "L'automobile recyclée", I. Bellin, La Recherche, n°259, Vol. 24, Nov. 1993, p. 1246-1254
- 181) « New practical identification method AOTF-NIR », T. Amano (Opt Research), Identiplast Bruxelles, 27-28 Nov. 1997
- 182) « The benefits of using FT-IR identification method within the recycling industry », D. Walters (Intex Logistics), R. Klebba (Nicolet), Identiplast Bruxelles, 27-28 Nov. 1997
- 183) « Rapid identification of plastics by pyrolysis IR and hand-held dielectric instrument », A. Murase (Toyota), Identiplast Bruxelles, 27-28 Nov. 1997
- 184) "Plastics recycling : products and processes", Chap. Post-Consumer acrylic recycling, R.J. Ehrig (Editor), Carl Hanser Verlag, 1992, p. 184-185 (tiré du brevet n° US 3 965 149, L.R. Mahoney, 1976).
- 185) "Recycling of polymers from automobile shredder residue" B.J. Jody, E.J. Daniels, A.P.S. Teotia, Conversion and utilisation of waste material (Chap. 5) 1996, pp 77-104. Section fournie par l'ANL en 1994.
- 186) K.D. Dean, J.W. Sterner, M.B. Shirts, L.J. Froisland, Bureau of Mines Research on Recycling Scrapped Automobiles, US Department of interior bulletin 684 (1985).
- 187) "Developping a viable polyurethane waste management plan : a PURRC update", G.J. Wasilczyk, T.J. Cerabona, Polyurethanes World Congress 1993, October 10-13, 1993

II - 3 Produits électriques et électroniques

- 188) "Corona-electrostatic separation : an efficient technique for the recovery of metals and plastics from industrial wastes", L. Dascalescu, A. Iuga, R. Morar, Magnetic and electrical separation, vol. 4 (p. 241-255) 1993
- 189) Documentation technique Hamos
- 190) "Separation of copper and plastics", Mitsui Mining and Smelting Co. Ltd, n° brevet : JP 81042334 (03/10/81)
- 191) Plastic Recovery System Inc., RETEC'89, 1989
- 192) Document interne Ceremap, Varray
- 193) "Improvement of recycling of cable waste in the Netherlands", L.F.J. Sijstermans (KEMA Nederland B.V.), R'97, Vol. III, 1997, p. 126-132
- 194) "Recycling of metallized plastics by cold crushing", A. Schmiemann, J. Busse Metalloberflaeche (1996), vol. 50 (2), pp.121 - 124.
- 195) "Recycling of electronic scrap", M. Melchiorre, H.J. Haepf, R. Jakob - Rapport interne Daimler-Benz AG (Stuttgart), 1996-1997
- 196) "Appareils ménagers : l'Allemagne innove en matière de recyclage", Caoutchouc et Plastiques : Outillage et Process - n° 750 - Mai 1996 - pp. 47 - 50.
- 197) Arra Terra Recycling, Doc. Interne fournie au CEREMAP
- 198) "Recovery of plastics from refrigerators", A.M.M. Ansems (TNO), Polytech. Tijdschr. / Procestech., Vol. 51(5), 1996
- 199) « Recycling of used home electric appliances », T. Kuwabara (Hitachi), Electrical Review, Vol. 81 (3), 1996, p. 38-40
- 200) "Plastics Recycling : Products and Processes", R.J. Ehrig (Editor), Carl Hauser Verlag, 1992, p. 9 et p. 164.
- 201) "Dry cleaning processes for plastics from old equipment", D. Wuestenberg, H. Gradwohl, Kunststoffe n°5, 1996
- 202) Harriman Chemsult Ltd - Plastics in the Environment, n° 34, 24 Sept. 1996
- 203) Doc. Interne Ceremap (Rapport All2)
- 204) « Computer housings in material recycling loop », P. Burgdorf, B. Keller, P. Orth, Kunststoffe Plasteurope, Feb. 1997, p. 15-17

- 205) « Laser spectroscopy plastics analysis : a supplement to NIR-systems », H. Lucht (Laser Labor Adlershof / LLA), Identiplast Bruxelles, 27-28 Oct. 1997
- 206) « Identification of plastics using laser technology », I. Burmester (Laser Zentrum Hannover / LZH), Identiplast Bruxelles, 27-28 Oct. 1997
- 207) "Automatic sorting for electronic scrap recycling by means of infrared laser impulse thermographie", Noell Abfall (réf, ie détection)
- 208) « Rapid identification of consumer electronics, PC and TV plastics parts by FT-IR », E. Michiels (Bomen), Identiplast Bruxelles, 27-28 Oct. 1997
- 209) "Separation method for different plastic materials", O. Tallafus, n° brevet : EP - 44 506 (27/01/82)
- 210) "Recycling Labeled Plastic Pieces", O. Tallafus n° brevet : EP - 44 507 (27/01/82)

#### II - 4 Textiles (moquettes)

- 211) US Patent n° 5, 230, 473 (27/07/93) J.A.E. Haggquist, R.M. Hume
- 212) "Improved carpet reclamation process", Dickerson et al., MONSANTO Company, Brevet n° WO 96/10054 (04/04/96)
- 213) "Carpet recycling process and system", R.A. Sferrazza, BASF Corporation, US Patent n° 5, 535, 945 (16/07/96).
- 214) voir référence (83)
- 215) "Extraction of pure polymeric components from multicomponent textile wastes using supercritical fluid method", M.E. Sikorshi, Georgia Tech., Research Corp. (USA), US Patent n° 52, 330, 21 (03/08/93),
- 216) "Separating components of carpet material for recycling", W. Dilly-Louis, J. Seeling, R. Wolf, Zimmer AG, European Patent n° EP 681896 (01/03/95).
- 217) "Biodegradable solvent system for separation of rubber latex from solid surfaces especially carpets", Brevet n° DE 4 440 795, Elges Wilhelm (23/05/96)
- 218) "Polyamide recovery from polyamide products by extraction", Berthold Hans, Karl Fischer Industrieanlagen GmbH Brevet n° EP-603434 (29/06/94)
- 219) "Carpet recycling separation process", Anonymous Brevet n° RD 388 013
- 220) « Identification and sorting of carpet waste materials », B.J. Kip (DSM Research), Identiplast Bruxelles, 27-28 Oct. 1997
- 220bis) « Identifying recyclable carpet materials using a hand held infrared spectrometer », Brevet n° WO 97/02481 (DSM)

221) Doc. Technique Brüker : identification des tissus de moquettes

222) US Patent n° 5, 294, 384 (15/03/94) David et al, MONSANTO

223) "Formation of a thermoplastic components from used carpet", David et al.  
US PATENT N° 5, 498, 667 (12/03/96)

224) US Patent n° 5, 169, 870 (08/12/92), Corbin et al.

**II - 5 B.T.P.**

225) « Le recyclage des plastiques », L'Usine Nouvelle, n° 2508, Juin 1995, p. 66

226) « Plastic window frame in profile » , E. Barth, G. Hundertmark, E. Keller, Kunststoffe Plast Europe,  
January 1995, p. 30-31

227) Document interne Ceremap / Veka

ANNEXES

## **Annexe n° 1**

### **Compte-rendu de visite**

- Brüker Spectrospin
- Herbold
- KHD Humbold
- Pallmann
- Result SA
- TU Delft
- Veka

**Compte rendu de visite**  
**BRÜKER SPECTROSPIN (Karlsruhe - D)**  
**le Lundi 15 Décembre 1997**

*Etaient présents : S. Bertin (Ceremap), I. Geyer (Brüker) et K. Landt (Brüker)*

La démarche initiale de Brüker concernant le développement d'un appareil de détection pour l'identification des matières plastiques a été provoqué par un besoin du secteur automobile.

Or, dans les applications automobiles, beaucoup de plastiques sont noirs : Brüker a donc axé sa technologie sur le MIR, qui permet l'analyse d'échantillons opaques et noirs, en réflexion (de la lumière). Il faut rappeler qu'environ 90 % des pièces automobiles sont noires.

La technologie développée par Brüker est une analyse de surface : la profondeur de pénétration du rayon peut varier de 5 à 10 microns (selon la propriété du plastique à absorber plus ou moins le rayon lumineux). Il faut donc retirer par polissage tous types de revêtements (peinture, laque, vernis, revêtement conducteur,...), sinon c'est lui qui sera analysé et non pas la résine.

**\* Durée d'analyse**

- acquisition du spectre = 1 seconde
- exploitation du spectre (comparaison avec les références) = 1-3 sec.
- durée globale d'analyse de l'ordre de 3-4 sec. par échantillon.

Le software étant déjà optimisé, si les interfaces augmentent encore en qualité (c'est donc indépendant de Brüker), la durée d'analyse pourra éventuellement descendre à 2 sec.

**\* Caractéristiques des échantillons**

- surfaces lisses ou plus ou moins rugueuses (mais sans grosses rainures)
  - surfaces mates ou brillantes
  - taille de l'échantillon : 2 mm x 2 cm est une taille suffisante du moment que l'on peut tenir la pièce en main et la présenter correctement devant le détecteur.
- Ø moyen = 3 mm, avec une surface assez large
- pollution de surface : la poussière n'engendre pas de problèmes particuliers mais la présence de corps gras oui (si l'identification se fait mal, il sera nécessaire de laver la surface au préalable).

**\* Banque de référence**

Brüker dispose d'une librairie de spectres de référence d'une trentaine de polymères, ce qui est normalement suffisant pour analyser correctement les plastiques présents dans les unités de recyclage.

L'analyse d'additifs est aussi possible : il s'agit là d'analyser le polymère avec un type d'additif, tel que le talc, le carbonate (craie), les retardateurs de flamme (notés FR). L'analyse se fait donc en même temps pour la résine et son additif. En fait, il est impossible de développer une librairie de spectres uniquement relatifs aux additifs, car avec la superposition du spectre des résines, les comparaisons échantillon-référence ne seraient pas possibles. Et pour le moment, vu la quantité importante d'additifs que l'on trouve sur le marché, Brüker n'a pas mis au point une librairie complète "polymère + additif".

Actuellement, le but principal dans l'analyse des additifs, est la détection de FR autorisés ou non-autorisés, l'identification ne va pas plus loin. Mais dans le cas particulier des produits électriques/électroniques, Brüker tente de développer une extension de la banque de donnée sur les additifs.

La librairie "polymère + additif" étant plus ou moins complète à ce jour, Brüker ne la commercialise pas mais la propose gratuitement à ses clients. On peut d'ores et déjà identifier :

- les polymères ABS, SAN, PC/ABS, HIPS, PPE + SB, PA-6, PA-66, PBT, PET, PE
- +
- les additifs (FR) bromés, chlorés, fluorés, phosphatés, contenant des PBDE

Rem . : on n'identifie pas avec précision le FR, on a simplement une information concernant sa composition, suffisante pour savoir si il est autorisé ou non.

N.B. :

- les spectres mis en mémoire dans la librairie de références sont en fait des informations digitales : il n'est donc pas possible de superposer un spectre d'un échantillon avec celui d'une référence pour pointer les pics. Brüker considère que c'est son savoir-faire et ne veut pas le diffuser.

- de plus, le spectromètre acquiert le spectre des échantillons, mais l'exploitation du spectre pour l'identification est basée sur la dérivée première des pics : la superposition de spectre n'est pas nécessaire à l'interprétation.

Par contre, dans le cas où l'utilisateur crée sa propre banque de donnée, la superposition devient possible car tous les spectres sont stockés en mémoire, en intégralité.

- en ce qui concerne l'identification d'alliages, l'appareil ne permet pas une analyse qualitative des composants mais donne, cependant, le composé majoritaire, énoncé en premier dans le nom qui s'affiche.

Ex. : - "PC + ABS" signifie que c'est un alliage majoritaire en PC (> 50 %)

- pour le talc, il existe des spectres de référence permettant un dosage semi-quantitatif (PP + 10 %, 20 % ou 40 % de talc).

Sinon, pour être plus précis sur les dosages quantitatifs, on peut "entraîner" l'appareil à identifier spécialement des alliages particuliers en lui insérant de nouveaux spectres de référence. Pour cela, il faut être certain de la validité de l'échantillon pris en tant que référence.

- la différenciation PET/PEN est possible, il suffit de choisir la bonne région d'exploitation du spectre. Des tests ont apparemment été réalisés avec succès, mais comme les spectromètres de Brüker n'ont pas d'application déchets ménagers pour le moment, le PEN n'est pas intégré en banque de donnée.

#### \* Démonstration sur le P/ID 22

Coefficient de corrélation (ou "Hit Quality") : plus ce coefficient est proche de la valeur zéro, plus le spectre de l'échantillon ressemble à celui de la référence.

Pour une identification correcte, Brüker estime que :

- coefficient  $< 1$  : l'identification est bonne et exploitable
- coefficient  $> 1$  : l'identification n'est pas satisfaisante, et le résultat n'est pas fiable, sauf dans le cas du PVC pour lequel ce coefficient est toujours  $> 1$  (de par la présence de nombreux additifs tels les plastifiants, les stabilisants, etc...).

En fait, l'exploitation par software travaille "en cascade" pour l'établissement de la corrélation.

Par exemple, dans le cas des polyamides, dans un premier temps, l'exploitation du spectre global permet de définir que le polymère appartient à la famille des PA, et ensuite l'exploitation se focalise sur une région du spectre caractéristique des différents types de PA existants. On peut ainsi différencier le PA-6 et le PA-66 (indépendamment de l'eau qui peut être présente car la région étudiée pour la différenciation est choisie spécifiquement sur une zone où l'eau n'a pas d'influence). Il est possible d'étendre la banque de référence sur les PA si c'est un problème spécifique (PA-6 et PA-66 sont toujours présents dans la banque de donnée standard).

Autre exemple : si le software identifie aux 4 premiers rangs de l'ABS, et au 5ème rang du SAN avec des coefficients de corrélation assez proches, l'exploitation du spectre va alors être poussée plus loin et focaliser sur une zone particulière du spectre pour confirmer l'analyse sur une seule des deux matières.

Ex. : si le résultat est :

Recherche supplémentaire		
ABS : 0,1890	→	ABS : 0,1760
ABS : 0,1899	→	ABS : 0,1821
ABS : 0,2050	→	ABS : 0,1829
ABS : 0,2122	→	ABS : 0,1937
SAN : 0,2210	→	SAN : 0,960

→ la différenciation est sûre : l'échantillon est constitué d'ABS.

Taux d'identification : 99 % des polymères testés sont identifiés, le 1 % manquant étant imputable à des matières qui sortent comme "inconnues".

#### \* Les différents types d'appareils

- au niveau de l'utilisation en laboratoire de recherche : IFS 28/P, qui permet l'acquisition de spectres soit par transmission (existence d'une chambre d'identification), soit par réflexion avec un nez extérieur. Il fonctionne tel un MIR standard, avec la possibilité de mettre tous les équipements classiques (support de films, pastilles KBR, cuve,...) pour l'analyse des polymères.

Cet appareil permet d'analyser avec précision des polymères et/ou des additifs inconnus, afin d'insérer ensuite le spectre de référence obtenu directement dans la banque de donnée de l'équipement industriel.

En fait, IFS 28/P = Vector 22 + 1 nez extérieur d'acquisition de spectre en réflexion, avec une seule gamme spectrale.

- au niveau de l'utilisation en milieu industriel : le P/ID 22 a été spécialement conçu pour répondre de façon simple aux besoins des industriels du recyclage. Il est moins flexible, la recherche

de polymères et/ou additifs inconnus n'est pas très facile. Il est plus concerné par des analyses de routine. Là aussi, il n'y a qu'une seule gamme spectrale.

- pour des travaux de recherche pointue, il existe l'Equinox 55 qui comporte plusieurs gammes spectrales et sur lequel peuvent être couplés plusieurs équipements annexes (notamment un microscope, ou un ATG, ou une chromatographie en phase gaz) car il possède 3 sorties connectables.

**\* Investissement :**

IFS 28/P (vieux modèle) = Equinox 55 environ 250 KF avec le software (65 000 DM sans le software).

Vector 22 (un peu moins complet) 170 KF avec le software (45 000 DM sans le software).

Rem. : P/ID 22 voisin du Vector 22 (ancêtre du P/ID 22 = P/ID 28, qui était plus gros).

N.B. : Il est possible de coupler l'analyseur IR avec un microscope. La zone focalisée est spécifiquement identifiée par le spectromètre (le rayon IR est dirigé dessus). Cet équipement apporte un investissement supplémentaire de 250 KF environ (soit 70 000 DM).

**Nombre d'appareils vendus actuellement en Europe : entre 40 et 100 (tous secteurs confondus).**

**\* R & D :**

- Brüker travaille aussi sur la spectroscopie Raman, mais cette technologie ne paraît pas du tout rentable économiquement à I. Geyer, de par son coût très élevé :

- 1 Vector 22 "brut" en IR = 170 KF
- 1 Vector 22 "brut" en Raman = 700 KF

Le Raman, qui permet l'analyse de produits organiques et non-organiques, est plus répandu dans le milieu de la pharmacie, en recherche plus pointue.

- Selon K. Landt, il n'est pas impossible d'installer un détecteur MIR Brüker sur une ligne de tri automatique. Le détecteur pourrait, par exemple, être placé juste en dessous du tapis convoyeur, avec une ouverture sur le tapis pour laisser passer le rayon IR (resterait à solutionner, par exemple, le problème des poussières qui tomberont certainement sur le détecteur). Mais la pièce devra être stoppée pour l'acquisition du spectre. Il faut aussi que la distance entre le nez et la pièce soit toujours constante.

==> selon le Ceremap, ce n'est pas une technologie facilement automatisable (préparation de surfaces, arrêt de la pièce sur le détecteur,...)

- D'après Brüker, il est envisageable de travailler en partenariat avec une société qui développerait une ligne de tri automatique. Mais ce ne sera jamais Brüker qui initialisera une telle démarche, et ils ne chercheront pas, eux, les partenaires, mais attendront d'être sollicités (il leur faut une ouverture sûre, sur le marché, avant d'investir en R & D).

Autres applications :

Brüker USA a développé un spectromètre NIR capable d'identifier les moquettes. Cet appareil est d'ores et déjà commercialisé aux USA, et un modèle de démonstration devrait être disponible en France début 98.

I. Geyer se renseigne sur le prix et les possibilités d'un tel équipement. (+ voir fiche technique fournie)

**Compte rendu de visite  
HERBOLD (Meckesheim - D)  
le Mardi 16 Décembre 1997**

HERBOLD est une société qui travaille sur la préparation du déchet et sur la séparation des matières.

Après avoir subi une période de crise interne, HERBOLD a recentré son activité et propose aujourd'hui des installations simplifiées de broyage et/ou de séparation densimétrique des matières plastiques en voie humide.

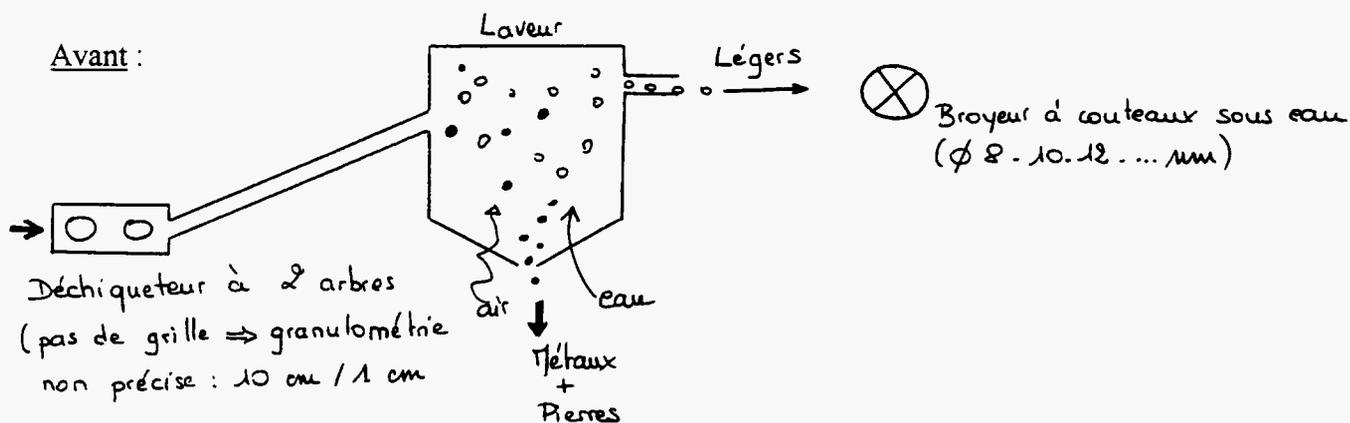
→ **Préparation des déchets**

HERBOLD a axé son activité sur le développement de quatre équipements pour le traitement des déchets de matières plastiques :

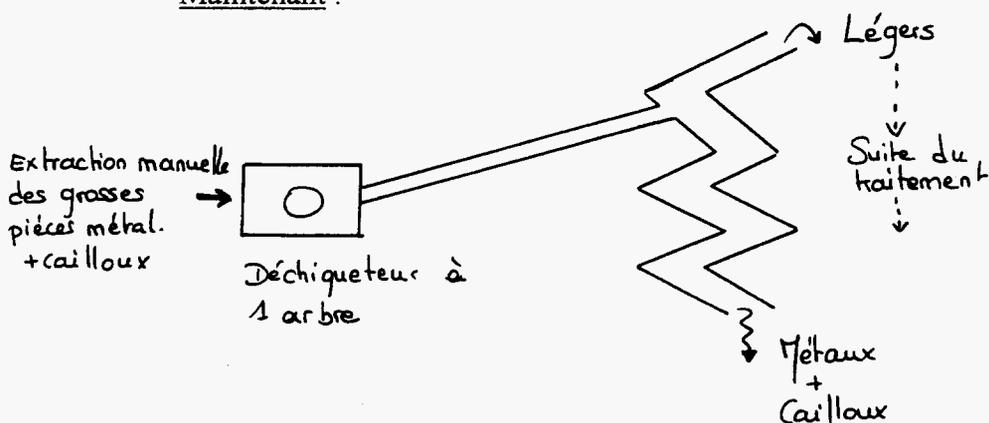
\* déchiqueteur à un arbre (en voie sèche) : cette technologie a pour origine l'industrie du bois et a été introduite pour le traitement des matières plastiques dans les années 1990. C'est une technologie dite standard, car très connue.

Cette technologie permet d'obtenir un résultat intermédiaire entre le déchiqueteur à deux arbres et le broyeur à couteaux : on atteint une granulométrie plus fine qu'avec le déchiqueteur à deux arbres (utilisation de grille), et l'équipement est plus robuste que le broyeur à couteaux.

Le déchiqueteur à un arbre vient en remplacement du déchiqueteur à deux arbres.



Maintenant :



Remarque : Ce traitement permet une défibrage importante du papier et un lavage efficace de la matière.

N.B. : Le déchiqueteur à un arbre nécessite l'extraction manuelle de grosses pièces métalliques telles que les moteurs (par ex : un combiné téléphonique peut passer). Il fonctionne avec des grilles de 50-60 mm : au dessous de cette maille, c'est trop fin et le débit chute très rapidement par usure des lames, et ce n'est pas intéressant économiquement.

\* broyeur à marteaux pendulaires (en voie humide) : il permet le broyage de tous types de plastiques, avec une grille relativement grossière. Les marteaux pendulaires viennent éclater les matières, qui ne subissent pas un trop fort échauffement de par la présence d'eau. Lors de ce broyage, un phénomène connu d'extraction des grosses parties métalliques se produit, par projection de ces dernières par les marteaux et expulsion automatiques. Une première séparation métaux/plastiques s'opère donc dans le broyeur même.

\* broyeur à couteaux (en voie humide) : cette technologie classique de broyage à couteaux avec un rotor plein réalise une coupe en biais des matières. L'apport d'eau simultanée lors du broyage évite l'échauffement des matières et permet un lavage de ces dernières.

→ Coût des broyeurs pour un débit de 1 T/h :

- déchiqueteur à 2 arbres : 450-520 KF
- déchiqueteur à 1 arbre : 700 KF
- broyeur à marteaux : 520 KF (sous eau)
- broyeur à couteaux : 520 KF (sous eau)

Cependant, il faut penser que le broyeur fonctionne rarement seul, il faut lui associer, notamment dans le cas des broyages en voie humide, un circuit complet d'eau, un séparateur à friction, un sécheur, etc..., ce qui monte le prix de l'installation complète aux alentours de 3,5 MF, y compris le déballeur (80 KF) et le bac de lavage (350 KF).

Cependant, HERBOLD fait remarquer que l'ensemble de ces technologies sont développées pour le traitement des déchets ménagers, qui bénéficie des subventions du DSD (Point Vert). Sans cette subvention, HERBOLD estime qu'un traitement "économique" par de tels procédés n'est pas possible. Pour les autres types de déchets, l'installation sera chère et compliquée et la rentabilité économique est loin d'être assurée.

### → Séparation densimétrique

Après la réorganisation d'HERBOLD, il a été impossible de fabriquer des installations de régénération, telles que les concevait l'ancienne filiale REFAKT, au niveau de prix identique aux anciennes. Malgré les subventions du Point Vert, une concurrence acharnée avec les Italiens et une technologie de traitement de mieux en mieux connue par les personnes extérieures qui l'utilisent, seuls (assemblage autonome de différents appareils principaux, ne nécessitant plus l'intervention de spécialistes tels HERBOLD) ont fait énormément reculer les prix de vente des lignes de régénération REFAKT.

En 5 ans, le prix de vente d'une même technologie a chuté d'1/3 (entre 1992 et 1997).

Or, la technologie REFAKT utilisait l'hydrocyclonage, qui nécessitait l'ajout d'équipements supplémentaires (tels que pompes, circuits d'eau, bac de mélangeage), par rapport à la technologie plus simple des bacs de flottaison. La ligne de traitement par hydrocyclonage coûte en moyenne 3 à 5 fois

plus cher qu'un traitement par bac de flottaison et ne conduit pas à des qualités de régénérés qui soient économiquement rentables.

Pour toutes ces raisons, HERBOLD a du descendre le coût global de ces installations de régénération : cela a impliqué l'abandon de l'hydrocyclonage au profit du bac de flottaison.

Cependant, HERBOLD conseille deux types de séparation densimétrique, selon la qualité recherchée pour la matière régénérée :

\* si il est nécessaire d'avoir une séparation fine, très précise : HERBOLD conseille une technologie de séparation densimétrique centrifuge. Pour cela, HERBOLD travaille en partenariat avec KHD Humbold, qui a développé le CENSOR (voir le rapport de visite correspondant).

\* si les exigences de qualité sont moindres : le bac de flottaison est suffisant.

Entre ces deux technologies, il ne reste plus de place pour les hydrocyclones qui demeurent trop chers pour une qualité intermédiaire entre le CENSOR et le bac de flottaison. Si HERBOLD livre une installation complète, ils utiliseront un bac de flottaison.

#### Remarques :

1) KHD Humbold n'a vendu, pour le moment que 3 ou 4 CENSOR pour des applications dans le recyclage des matières plastiques. D'autres secteurs, sur des produits divers à plus haute valeur ajoutée, constituent son portefeuille de clients.

2) KHD a en fait été récemment acheté par Bird-Humbolt. HERBOLD a travaillé en collaboration avec eux sur un projet dans la région de Stuttgart : HERBOLD → préparation des déchets. KHD-Humbolt → séparateur centrifuge. Ce projet concerne le traitement de la fraction mixte du point vert Allemand, c'est à dire la fraction plastiques ménagers sans bouteilles ni films :

#### Fraction mixte

=

- fraction lourde : PVC (% assez faible), PS, PA, papiers, autres éléments non-plastiques

+

- fraction légère : PE, PP, mousse, filets (à pommes de terre).

Sur ce principe de partenariat, HERBOLD envisage tout à fait la possibilité d'autres collaborations de la même sorte.

NB : Le séparateur centrifuge CENSOR coûte 3 à 5 fois plus cher qu'un hydrocyclone classique, mais le coût semble être justifié de par la haute qualité des matières sortantes.

#### → Exemples d'applications développées par HERBOLD

1) Broyage et lavage de casiers PET : trois installations industrielles fonctionnent sur les technologies très simples de broyage à couteaux + bac de lavage + séchage mécanique → PET réutilisable pour la fabrication de casiers neufs (= trois sociétés non subventionnées).

2) Déchiqueteur à un arbre : des tests, à l'échelle du pilote, ont été réalisés avec des pare-chocs et de nombreuses autres pièces susceptibles de contenir des métaux (qui ne passent pas en broyeur à couteaux) et ont donné des résultats satisfaisants. Un tel déchiqueteur fonctionne en production pour le broyage de câbles.

3) Broyeur à marteaux, sous eau : il n'est pas utilisable pour une application de type pare-chocs, qui sont beaucoup trop résistants.

4) Traitement de la fraction mixte du DSD (industries subventionnées).

\* *Société SCHUSTER (Stuttgart)* : traite la fraction mixte DSD avec une installation neuve combinant la préparation de déchets HERBOLD, la séparation centrifuge KHD Humbolt et la transformation par extrusion bi-vis Leibstrich.

\* *Société PLEWAN* : ils avaient une installation Tüssen, d'une valeur de 20 MF, mais qui ne marchait pas à cause d'une mauvaise préparation des déchets :

Ancien : déballeur → déchiqueteur à 1 arbre → zig-zag → laveur → broyage à couteaux sous eau → insuffisant.

Nouveau : déballeur → broyeur à marteaux sous eau → laveur → broyeur à couteaux sous eau.

La nouvelle préparation des déchets HERBOLD permet d'obtenir une matière entrante dans la ligne de régénération PLEWAN (hydrocyclonage + bac de flottaison) qui conduit à des efficacités de séparation et des qualités de matières sortantes très satisfaisantes.

Remarque : Même avec la subvention du Point Vert Allemand, le coût de revient des palettes est assez élevé. Il semblerait que ces palettes trouvent un débouché dans l'alimentaire (? = recyclé ?), secteur où les palettes en bois sont interdites.

\* *Société KIRS* : ils disposent d'une installation très simple, avec un investissement relativement bas, qui leur permet d'obtenir de bons résultats à partir de la fraction mixte du DSD. Le procédé comporte du broyage, une séparation par friction et un bac de flottaison.

**→ Visite de la société ECOTEC**

La société ECOTEC a repris l'ensemble de la ligne de régénération REFAKT, ainsi que le hangar de cette ancienne filiale de HERBOLD.

ECOTEC traite des cerclages PP, récupérés auprès de grands centres de distribution et d'industriels, pour en refaire un granulé de grade injection.

Les cerclages passent dans un broyeur à un arbre où ils sont déchiquetés avec une granulométrie voisine de 10 mm. La matière est forcée dans la chambre du broyeur par une plaque qui la pousse.

La matière broyée est ensuite passée sur la ligne de régénération REFAKT, identique à celle du CEREMAP, où se fait la séparation PP/PET par hydrocyclonage (broyeur à couteaux → bac tampon → hydrocyclone → séparation à friction → sécheur mécanique → sécheur thermique → ensachage).

Le PP séché est ensuite extrudé sur une monovis à granulation en-tête, avec incorporation simultanée de talc. L'extrudeuse comporte un filtre continu BRITAS (rouleau qui défile) : avec des impuretés résiduelles en PET voisines de 1 %, et un débit de 500 kg/h, le filtre de diamètre 200 mm doit être changé toutes les 6 à 9 minutes (ce qui est relativement rapide).

**Vient aussi à bout des morceaux très lourds : le grand broyeur optimisé**

Broyeur à couteaux  
(sous eaux)

Herbold Zerkleinerungstechnik GmbH à Meckesheim en Allemagne a livré ces jours-ci à une entreprise allemande de recyclage réputée un grand broyeur de construction nouvelle pour blocs lourds de polyamide. Cette machine fait partie d'une série de concepts convaincants pour machines neuves, développés sur la base d'une expérience de 20 années acquise par les concepteurs-projeteurs dans la technologie du broyage.

La machine dénommée Herbold SMS 80/100-A 10-3 dispose d'un rotor de 800 mm de diamètre et de 1000 mm de large. Elle est accionnée grâce à un moteur de 132 kW. Dans l'entreprise de recyclage de plastiques de l'acheteur, le broyeur Herbold est utilisé pour le broyage de rebuts d'extrusion provenant de la granulation ainsi que de morceaux massifs dont le poids unitaire est de plus de 50 kg, le débit dépassant 3 t/h.

Cette machine est, comme d'autres, le fruit du perfectionnement des broyeurs Herbold précédents, et dont le critère déterminant pour la construction modifiée a été l'expérience faite par les utilisateurs dans la pratique. Ce qui est nouveau, c'est l'agencement du rotor ainsi que la géométrie de coupe. Concrètement, cela signifie que le grand broyeur Herbold SM 80/100-A 10-3 est équipé d'un rotor fermé avec garnissage de couteaux variable. Avec les couteaux stator disposés en V, cette nouvelle gamme de broyeurs allie les avantages de la coupe en ciseaux et les exigences d'une construction compacte et d'accès facile.

L'atout particulier de cette grosse machine est son besoin d'énergie réduit. Une consommation de courant uniforme avec peu de pointes est assurée! Le rapport énergie/performance très favorable du broyeur que l'on obtient à présent, fait de celui-ci un modèle économique dont le succès est certain, étant donné que les frais d'exploitation d'un broyeur sont déterminés pour une part non négligeable par les coûts d'électricité.

Le broyeur SM 80/100-A 10-3, également livrable avec rotor ouvert, le prouve : à partir d'un bon concept on peut développer une machine encore meilleure en misant sur le dialogue avec le client et en mettant directement à profit l'expérience pratique des utilisateurs à la réalisation de nouveaux modèles.

## Déchets plastiques contaminés avec des matières métalliques ou minérales

### Nouvelle technique de broyage sans couteaux

*Broyeur à marteaux (sous eau)*

Avec son tout nouveau broyeur-déchetteur, Herbold Zerkleinerungstechnik à Meckesheim (HZT) présente une machine inédite pour le recyclage de matières plastiques.

Conçue pour le broyage de matériaux fortement contaminés par des corps étrangers métalliques ou minéraux, cette machine est capable de traiter par exemple des films agricoles, la fraction légère de shredders pour carrosseries ainsi que les déchets ménagers du DSD. Les coûts élevés par suite de l'usure et les arrêts fréquents dus à l'arrivée de corps étrangers posent là un problème qui, jusqu'à présent, n'avait pas été résolu de façon satisfaisante.

Le nouveau broyeur-déchetteur de HZT n'utilise pas de couteaux ! Le rotor de la machine est équipé d'outils de déchiquetage montés en pendule. Ces outils coûtent peu cher, ils sont relativement robustes et peuvent être échangés rapidement sans ajustage. Un dispositif d'évacuation automatique élimine les corps étrangers massifs du courant produit sans que la marche soit interrompue. Par une addition d'eau, le broyeur-déchetteur sert en plus comme unité de lavage extrêmement efficace. L'énergie utilisée pour nettoyer le produit des impuretés est considérablement plus élevée que dans le cas des broyeurs à eau traditionnels. Effet secondaire important : les morceaux de papier indésirables sont presque complètement désagrégés et peuvent être séparés dans un laveur à friction supplémentaire.

Herbold Zerkleinerungstechnik, Meckesheim, souligne avec cette innovation son ambition et sa prétention de poursuivre la longue tradition de conception et fabrication de machines performantes et innovantes pour le recyclage des matières plastiques - machines que l'on trouve par centaines dans le monde entier sous le nom de Herbold. „Il importe en effet tout particulièrement“, explique Karlheinz Herbold, l'un des gérants de l'entreprise, „d'optimiser des solutions technologiques dans le dialogue avec l'utilisateur, mais il s'agit aussi de créer de nouveaux équipements permettant de recycler de façon rentable les matières plastiques usagées.“

**Compte-rendu de visite - KHD HUMBOLDT WEDAG**  
**D-5000 Köln 90 (Porz-Eil)**

*Etaient présents : M. J.J. Robin (Ceremap), M. Neureither (KHD)*

Cette société a développé une centrifugeuse destinée à séparer, entre autres, les déchets de matières plastiques. Cet équipement, déjà installé en production chez TRINIKENS, consiste à soumettre des particules de polymères à une forte accélération (1200g) au sein d'un tambour rempli d'eau (ou d'une solution saline) en rotation. Par cette accélération, on accède à une séparation des fractions lourdes et légères. Plusieurs tailles de machines sont disponibles.

<b>Diamètre de rotor</b>	<b>250 mm</b>	<b>450 mm</b>	<b>600 mm</b>	<b>900 mm</b>
Débit de séparation sur films (kg/h)	50	350	600	1200
Débit de séparation sur corps creux (kg/h)	100	700	1200	2000

La plus grosse centrifugeuse consomme 90 KW/h et permet l'obtention de flakes de films contenant 6 à 10 % d'eau résiduelle ou de flakes de corps creux à 1 à 3 % d'humidité résiduelle. On notera que selon les constructeurs, un tel équipement permet de séparer des matières dont les densités sont seulement différentes de 0,02 g/cm<sup>3</sup>.

Enfin, la consommation en eau reste modique puisque de l'ordre de 500 l/tonne de matière traitée.

Il s'agit d'un système performant et innovant dont la mise en oeuvre est simple et d'un très faible encombrement. Il peut trouver des débouchés dans de nombreux types de gisements de déchets.

La fiche technique jointe ci-après précise le principe de fonctionnement du CENSOR.

**PROCEDE : CENSOR (KHD Humbold)**

**1 - Caractéristiques des déchets entrants et sortants**

Matières entrantes		
Typologie des déchets	Taille	Etat de surface
Tous types de plastiques, broyés	≤ 20 mm	RAS

Matières sortantes			
Débit d'entrée	Efficacité	Pureté	Rendement global
*Pilote : 50 Kg/h * Industriel : 450 Kg/h	= f (matière entrante)	= f (matière entrante)	= f (matière entrante)

**2 - Procédé : fonctionnement**

\* **propriété mise en œuvre** : différence de densité par une accélération centrifuge

\* **Descriptif du fonctionnement** : (voir le schéma de la figure n° 17, Rapport Final)

Les déchets broyés, préalablement mis en suspension dans l'eau (ou eau + additif), sont injectés au centre de l'appareil. La différence de rotation entre le rotor (3700 tr/min) et la centrifugeuse est de 20 tr/min, ce qui permet la séparation des matières. La force centrifuge appliquée est de 1 200 g.

\* **Bilan énergétique** : \_\_

\* **Impact environnemental** :

Qualité et quantité des rejets	Nuisances	Hygiène et Sécurité
- eau : = f (matière entrante) - air : néant - déchets : = f (matière entrante)	Nuisances sonores (85 dB)	Néant

\* **Utilisation du procédé**

Propriétés industrielles	Stade d'avancement	Références	Débouchés / marchés potentiels
Brevet KHD	Industriel	12 unités (D), 3 unités (J), 1 unité (B)	Tous types (câbles, films, moquettes, bouteilles, ...)

**3 - Industrialisation de la technique**

Investissement	Main d'oeuvre et qualification des opérateurs	Fiabilité, maintenance	Couplage inter-technique
- labo. : 1 MF - φ 450 : 1,75 MF - φ 600 : 3,5 MF - φ 900 : 4,5 MF	1/3 poste par machine, opérateur sans qualification	Bonne (révision 1 fois /an)	Nécessite un broyage initial et un séchage thermique final

**Compte rendu de visite - PALLMANN (Zweibrücken - D)  
le Mardi 16 Décembre 1997**

*Etaient présents : S. Bertin (Ceremap), M. Marchall (Pallmann)*

**1 - Broyage**

Pallmann a développé, depuis le début du siècle, le broyage de tous les matériaux, sauf des minéraux (de dureté supérieure à 4 sur l'échelle de Moss) et des métaux.

Ils possèdent donc un savoir-faire très important sur la préparation par déchiquetage, broyage et micronisation de bois, de produits pharmaceutiques, de produits alimentaires et de matières plastiques.

Ils sont capables de broyer de grossier à fin, puis de microniser, tous ces types de matériaux. Le débit des équipements proposés par Pallmann vont de 200-300 kg/h à 10-20 T/h, selon les matériaux.

En ce qui concerne les matières plastiques, Pallmann travaille essentiellement avec :

→ **des broyeurs à couteaux, avec ou sans grille**

Selon le matériau et la forme du produit d'alimentation, différents systèmes d'alimentation sont employés (bande transporteuse, rouleaux d'introduction, alimentation en fonction de la charge par auge d'alimentation et auge vibrante avec système de goujons).

Les broyeurs peuvent être équipés de rotors pleins (broyage de plastiques peu souples à rigides, d'épaisseur supérieure à celle de films) qui permettent une coupe dite en biais ou "en V", ou bien de rotors vides (broyage de plastiques de fine épaisseur et de fibres : films étirables, multicouches type couche-culottes) qui permettent une coupe franche droite, dite aussi à guillotine.

Les broyeurs à couteaux permettent d'atteindre des granulométries de 30 à 10 mm, en moyenne, selon la grille utilisée.

Remarque : Les couteaux des rotors vides travaillant à angle droit sont plus fragiles que ceux des rotors pleins qui ne sont jamais en contact perpendiculaire avec les matières.

→ **des broyeurs à marteaux, avec ou sans grille**

Utilisés pour des matières plus fragiles et plus massives que les broyeurs à couteaux, les broyeurs à marteaux opèrent par l'application de force de compression, en provoquant l'éclatement du matériau. Les granulométries obtenues peuvent atteindre 5 à 10 mm.

Les trois types de broyeurs à marteaux utilisés pour les matières plastiques sont :

\* le broyeur à marteaux pendulaires horizontal : les marteaux sont montés de façon serrée sur le rotor plein, de telle sorte à avoir un mouvement pendulaire lors de la mise en rotation du rotor. Les marteaux viennent heurter les matières et les projettent sur les parois. Le broyage se fait par éclatement.

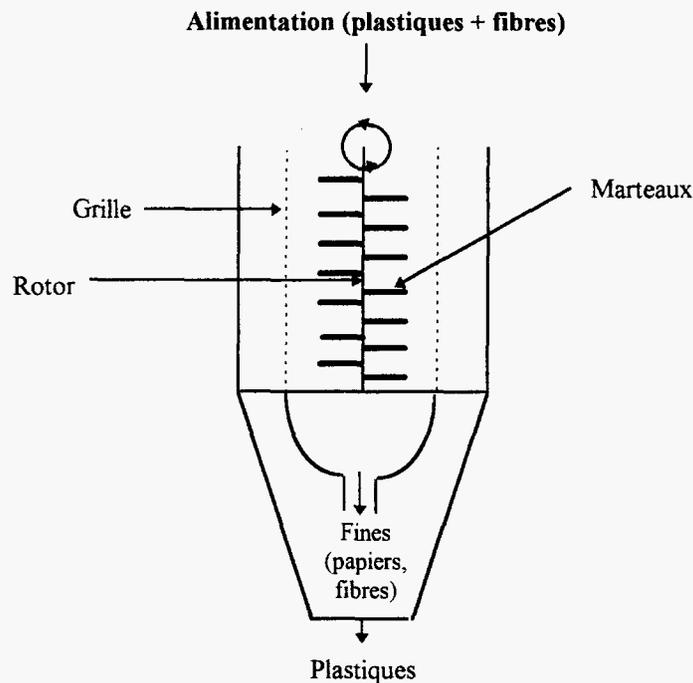
N.B. : avec ce type de broyeur, de grosses parties métalliques peuvent être projetées en haut du broyeur et extraites par une sortie spécifique : une séparation métaux/plastiques s'opère alors. Cependant, une partie de fines particules métalliques reste avec les matières plastiques.

Remarque : le fait que les marteaux soient pendulaires diminue fortement les risques d'endommagement du broyeur car les marteaux n'opposent qu'une résistance moyenne aux matières qui seraient trop dures.

\* le broyeur percuteur à griffes : des griffes aux bouts arrondis sont montées de façon espacée sur le rotor plein et viennent écraser les matières, en les forçant à travers la grille. Le broyage se fait par écrasement. Ce type de broyage est plus utilisé dans le cas de pièces très fragiles car il génère une quantité de fines nettement moins importante que le broyeur à marteaux pendulaires horizontal.

Exemple : le broyage de feux arrière de voiture conduit, avec une grille de 10-12 mm, à la production de moins de 5 % de fines de  $\varnothing$  3-4 mm.

\* le broyeur à marteaux pendulaires vertical : nouvellement développé par Pallmann, ce broyeur reprend le même principe de fonctionnement que le broyeur à marteaux pendulaires horizontal, sauf qu'il permet en plus une séparation fibres/plastiques in situ. En effet, les marteaux pendulaires fixés sur le rotor vertical projettent les matières sur une grille cylindrique placée autour du rotor : les plastiques, plus denses que les fibres, sont poussés à travers la grille tandis que les fibres sont évacuées par le bas du broyeur.



Principe de fonctionnement du broyeur à marteaux pendulaires vertical

Rem. : \* Pallmann a notamment réalisé des essais satisfaisants sur le broyage de structures multicouches Tetrapack, qui ont conduit à une extraction importante de la partie fibreuse.

\* La conception plus complexe de ce broyeur amène à un coût beaucoup plus élevé que le broyeur à marteaux horizontal qui est, lui, plus classique.

→ des microniseurs

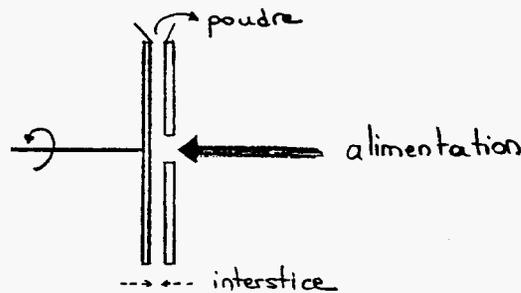
Les microniseurs sont utilisés pour les matières plastiques dès lors que le recyclage passe par une transformation en rotomoulage (technologie réalisable sur poudres).

Il est nécessaire d'alimenter le microniseur avec une matière de granulométrie voisine de 10-12 mm ; au delà, la matière doit rester trop longtemps dans la chambre de broyage, ce qui ralentit fortement le débit et augmente le coût de revient. La micronisation permet l'obtention de poudre de granulométries comprises entre 500 µm et 2 mm, pour les matières plastiques. Les débits les plus courants sont de 250 à 300 kg/h.

Pallmann a essentiellement développé deux types de microniseurs pour l'application aux matières plastiques :

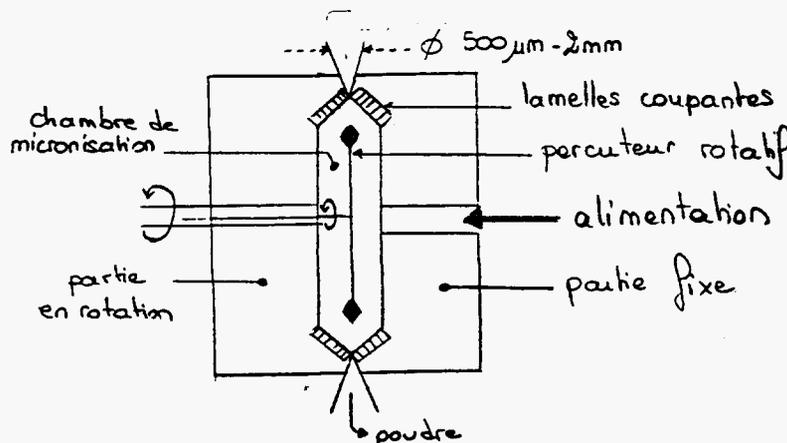
\* le microniseur à disques (dit "type PKM") : de conception simple et d'un coût moyen, ce microniseur est utilisé pour la micronisation de matières plastiques qui ne présentent pas de problèmes d'échauffement importants (ex : PEhd, PVC rigide), et qui sont assez fragiles.

Principe : La chambre de micronisation comporte un disque fixe et un disque en rotation qui va provoquer des forces de frottements importantes. La matière à microniser est introduite par le centre de la chambre. La granulométrie de la poudre est réglée par l'interstice entre les disques.



\* le microniseur à percuteur (dit "type PP") : de conception plus complexe que le broyeur à disques, ce microniseur est plus spécifiquement utilisé pour les matières plastiques qui sont plus sensibles à l'échauffement et qui peuvent provoquer le colmatage de l'équipement (ex : PP). L'action d'un percuteur en rotation permet d'évacuer plus rapidement les matières micronisées qui stagnent moins longtemps dans la chambre et qui ne risquent plus de colmater. De plus, l'agitation permet aussi d'éviter ce colmatage.

Principe : La chambre de micronisation comporte une partie fixe et une partie en rotation équipées de fines lamelles tranchantes sur tout leur périmètre. Un percuteur est situé au centre de la chambre, avec deux parties planes à ses extrémités qui viennent heurter les matières. Il tourne en contre-rotation avec la partie équipée de fines lamelles.



Dans le cas de la micronisation, il est nécessaire d'appliquer un tamisage de la poudre afin d'obtenir une granulométrie relativement homogène, notamment pour les applications en rotomoulage.

Par exemple, la micronisation d'un PE va conduire à une poudre de granulométrie :

- < 100 mm : 10-15 %
  - > 500 mm : 5 %
  - 100 mm < < 500 mm : 80-85 %
- qui ne peut être appliquée qu'après tamisage.

Il est donc nécessaire de s'équiper d'un ensemble d'appareils annexes au microniseur, ce qui a une incidence importante sur le coût d'investissement :

- microniseur
- tuyauterie (transport aérolytique)
- cyclone d'aspiration (crée une zone de dépression qui permet d'extraire plus rapidement la matière, d'où une meilleure évacuation) - débit : 20-30 m<sup>3</sup>/min environ 20 m/s
- tamis (à nutation ou vibrant)

Coût de l'installation complète :

Microniseur	Débit	Coût
- à disques	250-300 kg/h	950 KF
- à percuteur	250-300 kg/h	1 100 KF

Dans le cas du broyage, il est aussi nécessaire d'installer des tuyauteries et un système d'aération par cyclone, ce qui peut amener les coûts des installations complètes (pour l'ensemble des broyeurs décrits précédemment) de :

- \* Débit 300-400 kg/h : 280-320 KF - Consommation énergétique : 25 à 50 KW  
(Ø rotor : 400 mm x largeur 500 mm)
- \* Débit 1 T/h : 420-460 KF - Consommation énergétique : environ 75 KW

## **2 - Densification**

Pallmann a aussi développé un densifieur qui agglomère les plastiques seuls ou en mélange avec d'autres matières pouvant être présentes (telles que des fibres naturelles, du papier). Cet équipement fonctionne sur le principe de l'auto-échauffement des matières plastiques dès lors qu'elles sont soumises à d'importants mouvements rotatifs.

La ligne de traitement nécessaire à la densification des matières passe par les étapes suivantes :

- 1) broyage (broyeur à couteaux + système d'aération/cyclone)
- 2) densification
- 3) broyage "à chaud" (broyeur à couteaux permettant de rebroyer les agglomérats qui se sont formés à chaud, en sortie du densifieur)
- 4) séparation des films non agglomérés (et retour par transport aérolytique dans le densifieur).

A titre d'exemple, le coût d'une telle installation pour le traitement de films de PE, avec un débit de 300 kg/h, est d'environ 1,75 MF.

Remarque : Pallmann ne pense pas que le broyage cryogénique des matières plastiques soit économiquement possible et ne cherche pas d'applications particulières pour cette technologie.

**Compte-rendu de visite**  
**RESULT S.A. / Mannesmann Ind. (représentant Français)**  
**le 1<sup>er</sup> Octobre 1997**

*Etaient présents : J.J. Robin (Ceremap) , G. Von Bassewitz (Mannesmann Ind.)*

RESULT SA est spécialisée dans la séparation de matériaux composites, et tout particulièrement dans les procédés de broyage et de triage sélectif.

**Description du procédé :**

Les éléments constitutifs d'un composite ont des réactions différentes aux accélérations et aux phénomènes de vortex et de ce fait, ils obtiennent une structure, une géométrie et une dimension caractéristiques.

Les métaux se déforment et se rassemblent sous une forme sphérique différente en diamètre de la couche initiale du composé. Les matériaux synthétiques modifient rapidement leur structure, mais restent cependant inchangés en taille. Par exemple : le PE passe sous forme de flocons, le PS sous forme de chips, le PVC sous forme de cube (plus volumineux) la cellulose sous forme effilochée, effilée.

Les degrés de pureté atteints par ce procédé permettent la recirculation des produits triés dans l'industrie.

**Description de l'unité :**

Les composites prébroyés sont introduits dans l'accélérateur.

L'accélérateur ressemble à un rotor vertical. La chambre contient des niveaux d'accélérations ajustés avec des outils interchangeables. En plus du rotor, une ventilation provoque un effet de succion (égal d'aspiration) afin de transporter les matières à travers les niveaux d'accélération.

Quand l'unité fonctionne, le rotor tourne à très grande vitesse et le ventilateur génère l'effet de succion nécessaire. Cela produit un fort vortex avec de très grandes vitesses et accélérations sur les bords des outils. Les forces produites de "déchirement" ouvrent les couches des composites pratiquement le long de leur liaison et déforment leur structure, leur géométrie et leur dimension.

Après ces modifications, la séparation des différents composants peut être réalisée par des couteaux à air, des unités de tamisage ou de séparateurs à lit fluidisé (table densimétrique).

**Applications :**

- > films alimentaires multicouches (tubes de dentifrices, blisters,...) revêtements de sols, tous types de structures sandwichs.
- > déchets électroniques (câbles, pièces électroniques, cartes, ...)
- > déchets automobiles
- > déchets textiles

Le coût de revient annoncé par Result est compris entre 400 et 1 800 francs la tonne.

**Nous n'avons pas pu voir de démonstration car l'unité n'était pas sur le site visité.**

**PROCEDE : Result**

**1 - Caractéristiques des déchets entrants et sortants**

Matières entrantes		
Typologie des déchets	Taille	Etat de surface
Tous types de structures multicouches (plastique/plastique, plastique/métaux, fibres/plastique)	Toute taille, un déchiqueteur en entrée réduisant la matière entre 12 et 20 mm	Produits si possible <u>secs</u> (problème avec l'humidité, les résidus liquides)

Matières sortantes			
Débit d'entrée	Efficacité	Pureté	Rendement global
de 1 000 à 5 000 Kg/h	de 90 à 97 % = f (matière entrante)	de 90 à 99,5 % = f (matière entrante)	= f (matière entrante)

**2 - Procédé : fonctionnement**

\* **principe** : division de matières finement assemblées par un broyage particulier, procédé à sec

\* **Descriptif du fonctionnement** : broyage et division des matières, mettant en oeuvre un accélérateur qui modifie la structure, la géométrie et la taille des éléments constituant la structure multicouche. Ce procédé assure seulement le délaminage des matières, et nécessite un pré-broyage spécifique en amont (en fonction du type de déchets) et un tri (souvent par classification pneumatique) en aval pour la séparation des matières.

\* **Bilan énergétique** : Puissance nécessaire 220 KW/h, pour 1 Tonne traitée

\* **Impact environnemental** :

Qualité et quantité des rejets	Nuisances	Hygiène et Sécurité
- eau : ___ - air : filtre/cyclone nécessaires (traitement de poussières) - déchets : poussières + fractions non valorisables	Poussières Nuisances sonores	Risque de « coup de poussières »

\* **Utilisation du procédé**

Propriétés industrielles	Stade d'avancement	Références	Débouchés / marchés potentiels
?	Industriel	Unités en Allemagne, Suède, Japon, USA (multicouches métaux/plastiques)	= f(déchets), matières de haute qualité

**3 - Industrialisation de la technique**

Investissement	Main d'oeuvre et qualification des opérateurs	Fiabilité, maintenance	Couplage inter-technique
de 10 à 30 MF (installation complète)	3 personnes par machine, opérateurs formés	Rotor à entretenir régulièrement - Maintenance normale	Séparation et traitement ultérieurs classiques nécessaires

*NB : Le traitement des déchets de matières plastiques sur l'ensemble de la ligne de tri RESULT (process allant du broyage à la séparation) revient à un coût approximatif de 2 Francs du Kilo.*

## Exemples et résultats

Les exemples suivants sont des produits testés sur une installation pilote d' une capacité d' environ 250 à 450 Kg. Cette installation pilote correspond sur le plan technique, à une installation de production.

Les valeurs obtenues sont transférables à celles utilisées pour une installation industrielle.

### Epaisseur des couches:

Produit	Type	Epaisseur de couche métaux mm	Epaisseur de couche plastiques mm	Epaisseur de couche autres matériaux mm
Feuilles composées aluminium	agglomérés laminés de tubes	Al 0,02	P 0,15	0,002
Cables Torsadés	torsades de l'isolées	Cu 0,1	PVC 0,2	-----
Circuits intégrés électroniques	déchets de produits FR4	Cu 0,017 Pb/Sn 0,02	Epoxy 2,8	0,015
Composés PE - PS	Composés d'emballages	-----	PE 0,2 PS/HV 0,35	-----

Les valeurs mentionnées ci-dessus montrent que des épaisseurs de couche entre 0,017 et 2,8 mm peuvent être traitées.

La valeur minimum d' épaisseur pouvant être traitée est actuellement inférieure à 0,010 mm pour des composés d'aluminium.

## Rendements :

Produits	Pourcentage de métaux	Pourcentage de plastiques	Rendement de métaux	Rendement de plastique
Matériaux composites en Aluminium	Al 25%	PP 75%	Al 97%	PP 90%
Cables torsadés	Cu 35%	PVC 65%	Cu 99,5%	PVC 92%
Circuits intégrés électroniques	tot. 30%	tot. 70%	tot. 97%	tot. 97%
Composites PE-PS	-----	tot. 100%	-----	tot. 97%

Les pourcentages métalliques inférieurs à 30 poids. % sont récupérables dans les fines couches.

Des plastiques de textures physiques très différentes sont séparables.

Les rendements obtenus se situent entre 90 et 97%. Les particules restantes qui ne peuvent plus être réintroduites dans les circuits économiques, représentent 3 à 10 %.

Les coûts par tonne de matériaux triés sont comparativement faibles en raison de la faible consommation d'énergie.

Etant donné que les produits finaux réintroduits dans les circuits économiques, les frais sont couverts de façon optimum.

**Compte rendu de visite - TU Delft (Pays-Bas)**  
**Jeudi 11 Décembre 1997**

*Etaient présents : S. Bertin ( Ceremap), N. Fraunholz (TU Delft),  
 J.A. Van Houwelingen (TU Delft)*

**1 - Séparation électrostatique**

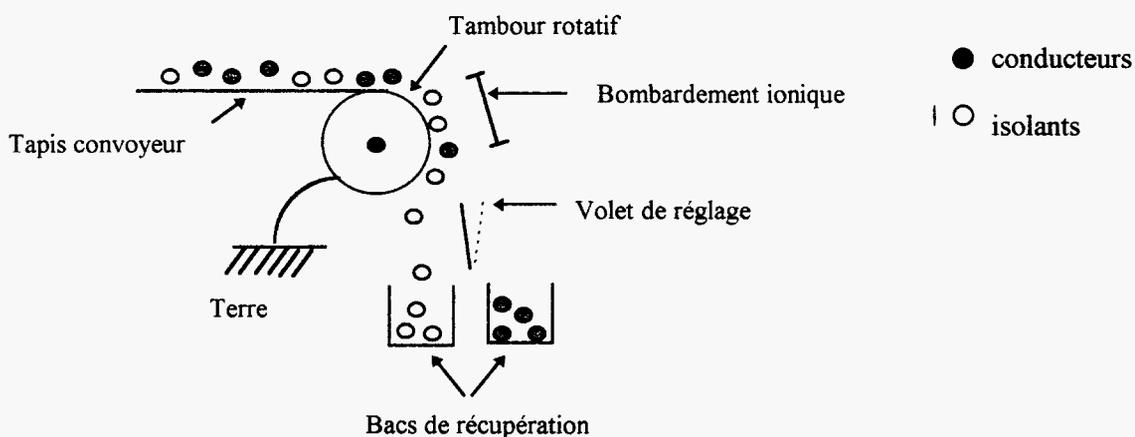
Le TU Delft dispose de deux séparateurs électrostatiques qui peuvent être utilisés pour des essais extérieurs.

**\* Séparation Corona (équipement CARPCO)**

Ce procédé de séparation électrostatique permet de séparer les fractions métalliques des fractions non-métalliques, car il est basé sur la différence de comportement des matériaux qui sont, soit conducteurs (ex : métaux), soit isolants (ex : plastiques, verre). C'est donc une séparation entre les conducteurs (qui perdent leurs charges rapidement) et les isolants (qui conservent une charge résiduelle).

Principe : Les matériaux passent sur un tambour rotatif qui est relié à la masse, et subissent un bombardement ionique (par Corona) qui provoque l'apparition d'une charge résiduelle sur les composés isolants. Les conducteurs ne sont pas attirés tandis que les isolants suivent la rotation du tambour.

Schéma :



Design CARPCO

Remarque : La tension maximale appliquée avec ce principe est de 500 000 volts.

**\* Séparation triboélectrique (équipement CARPCO)**

Ce procédé de séparation permet de séparer les plastiques entre eux par leur différence de comportement lors du chargement par triboélectricité.

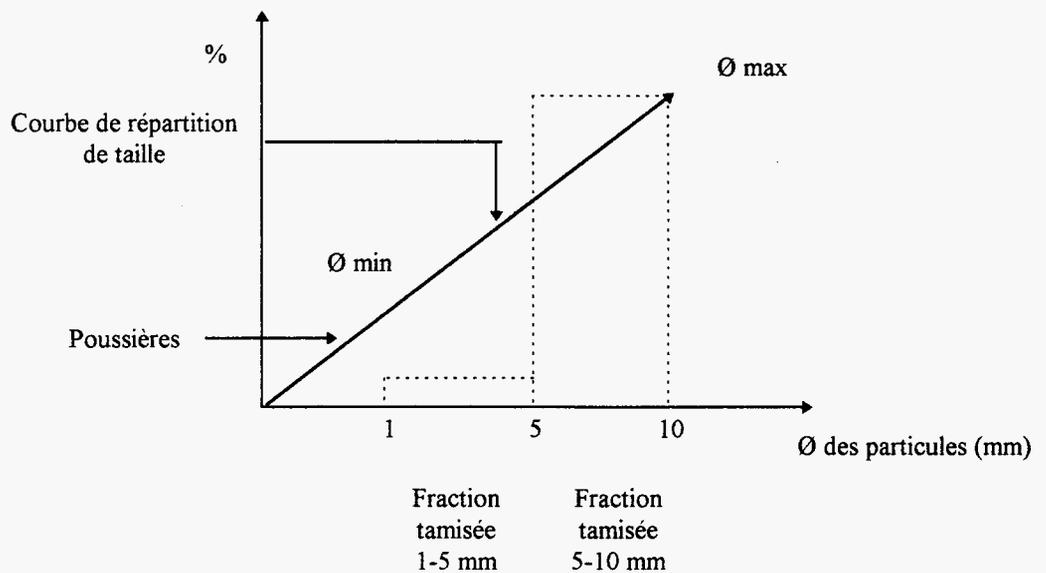
Principe : Les matières sont alimentées dans le séparateur par un alimentateur vibrant en rotation. Les particules de plastiques passent à travers un tube de transport pneumatique (utilisation d'une pompe) où elles vont se charger par frottement les unes contre les autres.

Le choix de la matière constituant ce tube est fonction des matières à séparer et peut être soit en PVC, soit en PP, soit encore en acier inox. Les particules tombent entre deux électrodes verticales + et -, et selon leurs charges, elles vont être attirées par l'électrode du signe opposé à leurs charges.

Remarque : Ces séparateurs nécessitent des étapes importantes de préparation de la matière, car ils sont très sensibles à l'humidité, à la présence de poussière, à la taille des particules.

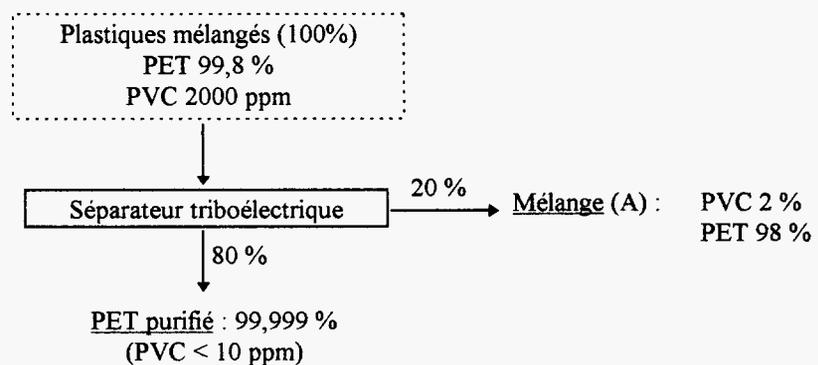
Au préalable d'une séparation triboélectrique, il est nécessaire de :

- a) retirer toutes les poussières et les fines particules par cyclonage,
- b) tamiser les particules pour réduire au maximum la distribution de taille de ces dernières. En effet, de façon générale, lors d'un broyage, on obtient une répartition de la taille des particules telle que :



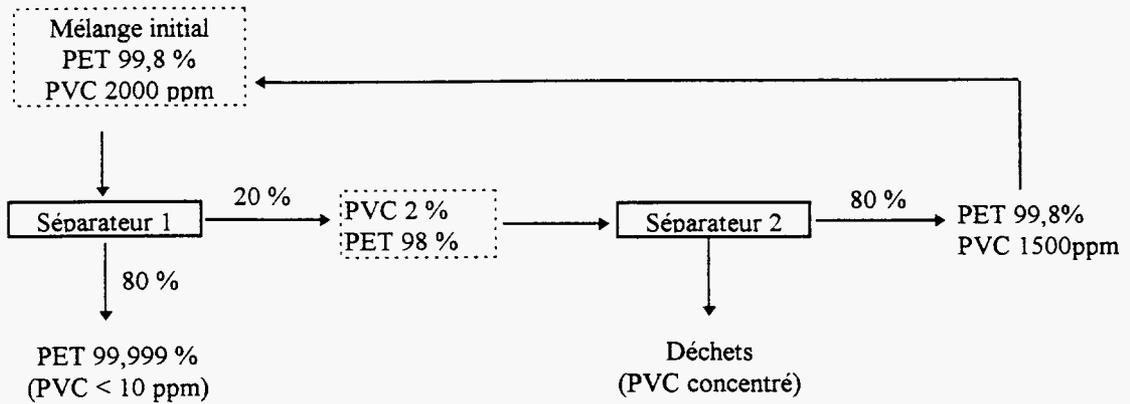
Les particules sont alors séparées en deux séries de taille < à 5 mm ou > à 5 mm et la séparation électrostatique doit être réalisée pour les deux fractions de façon séparée, afin d'obtenir une meilleure efficacité de séparation.

Bilan massique d'une séparation triboélectrique (cas de mélange binaire) :



**Schéma n° 1**

N.B. : Si on remet directement le mélange (A) dans le mélange initial, cela va avoir pour conséquence de polluer plus fortement le gisement initial en PVC, ce qui conduira à une perte d'efficacité de la séparation. Pour récupérer les 19,6 % de PET perdus dans le mélange (A), il est préférable d'utiliser un second séparateur électrostatique qui va redescendre le taux du PVC à celui du mélange initial. On aura le schéma de traitement suivant :

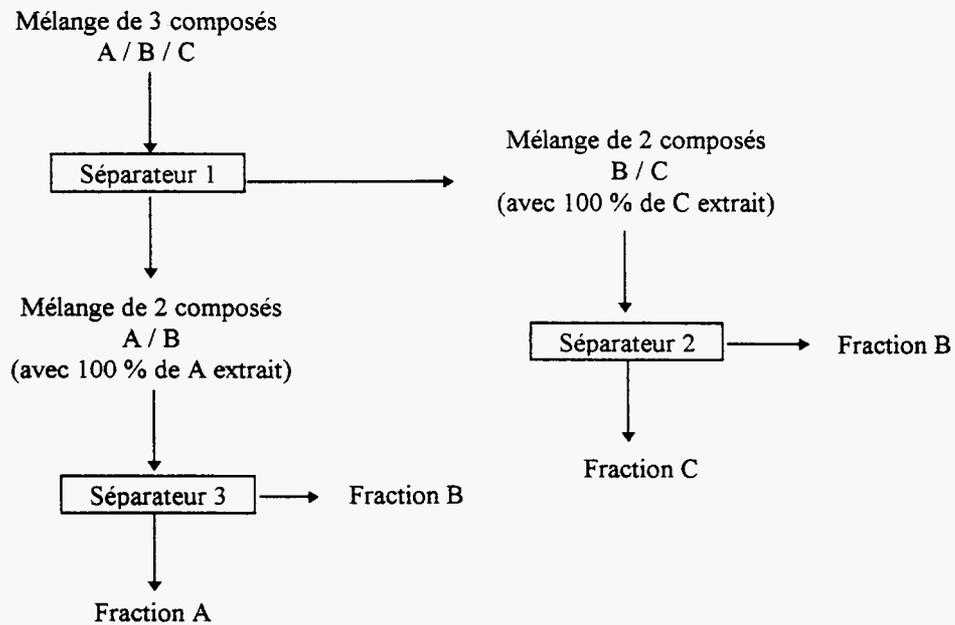


**Schéma n° 2**

Conclusion : En laboratoire, un tel schéma conduit à la récupération de 98 % du PET présent dans le mélange initial, avec un taux résiduel de PVC < à 10 ppm.

Cependant, à l'échelle industrielle, il y a en réalité une perte d'environ 10 % du PET présent dans le mélange initial, pour atteindre le même taux de pureté.

Cas d'une séparation triboélectrostatique (cas de mélange ternaire) :



**Exemples d'applications à l'échelle du laboratoire :**

\* Séparation Corona : traitement de cartes électroniques constituées d'un mélange de résines époxy + métaux et de PS --> obtention d'une qualité moyenne du PS lors de la séparation.

\* Séparation triboélectrique : séparation PMMA/ABS efficace, avec seulement quelques grains de PMMA présents dans l'ABS, mais pas l'inverse.

**Applications industrielles de la séparation triboélectrique :**

\* Collecte sélective de corps creux : il est nécessaire d'utiliser des broyats très propres (sans poussières, ni étiquettes, ni métaux, ni humidité). Ce procédé est appliqué en sur-tri de PET (une unité en Hollande + une en Italie).

\* Déchets de production : la séparation est plus facile de par la propreté de ces déchets mais le problème d'efficacité demeure.

Coût approximatif de traitement :  
0,1 US \$/kg, soit environ 0,60 F/kg (hors préparation)

**Visite de l'unité de séparation triboélectrique du laboratoire (appareil CARPCO) :**

- \* Capacité de traitement : 1 T/h pour des *flakes* ; de 1,5 à 2 T/h pour des *granulés*
- \* Filtre à poussière intégré
- \* Présence de brosses rotatives pour nettoyer les électrodes
- \* Investissement : 400 000 DM (environ 1,4 MF)
- \* Tension maximum (= différence de tension entre les 2 électrodes) : 125 000 volts
- \* Humidité relative de l'air dans la machine < 10 % (au niveau industriel, on travaille à température et à taux d'humidité ambiants → il y a des différences d'efficacité en fonction des saisons pluvieuses ou estivales).
- \* Absence totale de traces d'eau sur les plastiques

**Schéma de l'équipement CARPCO :**

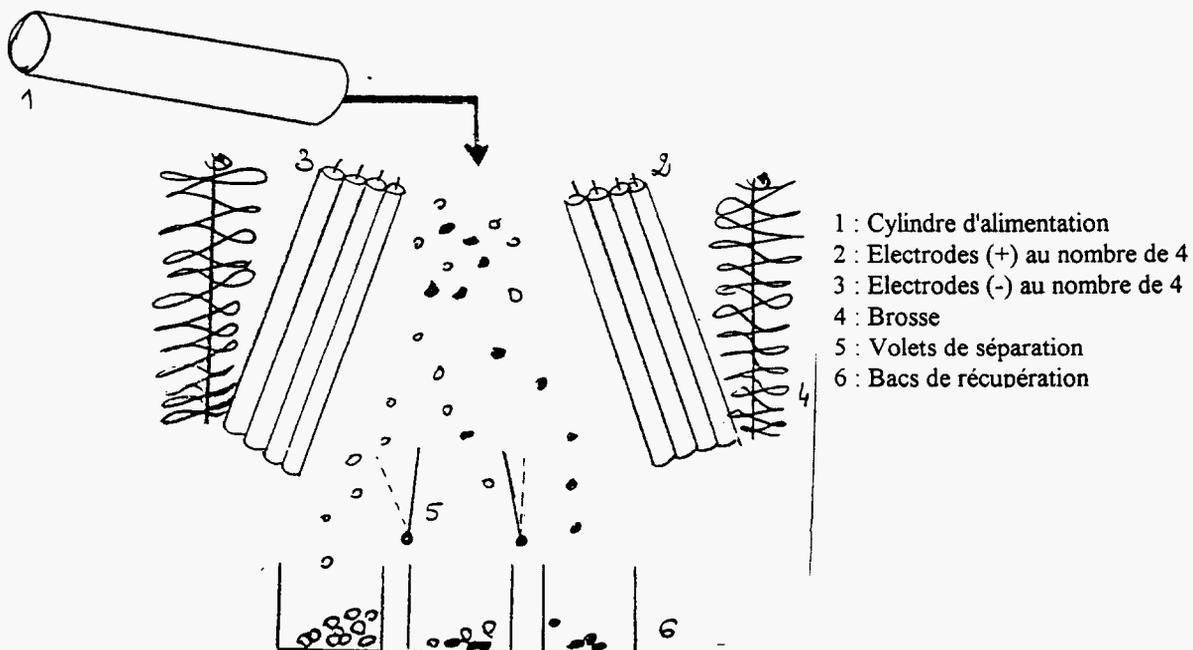
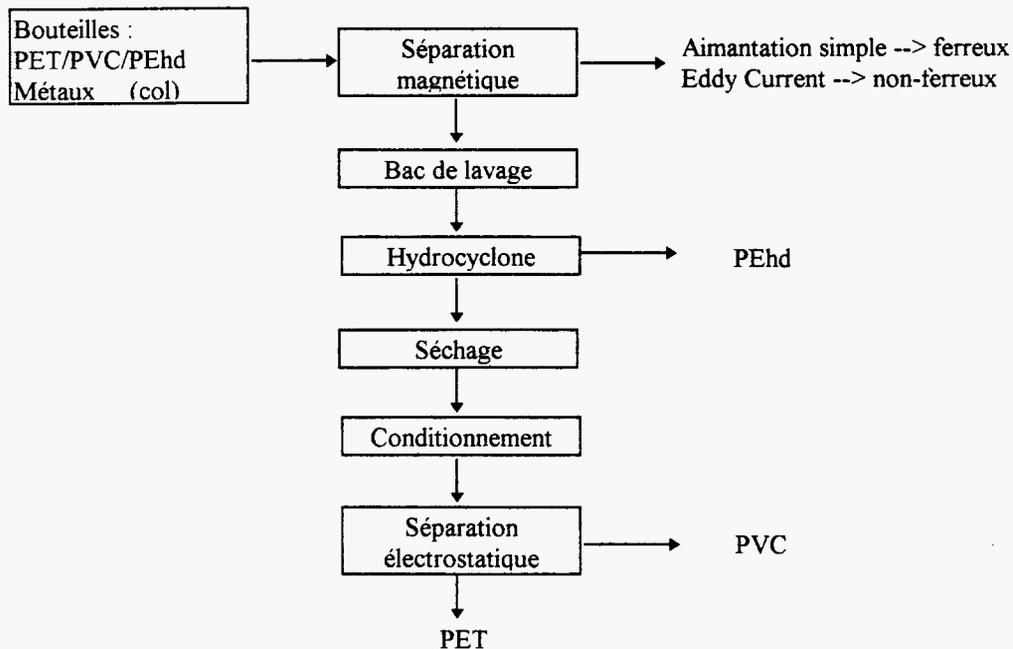


Diagramme de traitement proposé par le TU Delft :



Résultats de séparation :

Mélanges	Origine	Préparation	Nombre de séparations électrostat.	Pureté	Echelle
PEhd 40/PEbd 60	DSD	L, D, Z, S, ES	2	> 98 %	I
Polyoléfine 88/PS12	DSD	L, D, S, ES	2	> 99 %	I
PVC 88/PET 12	Bouteilles	Z, S, ES	2	99,7 %	I
PVC 86/PET 14	Bouteilles	L, D, S, ES	3	99,9 %	I
PVC 86/PET 14	Bouteilles	L, D, S, ES	5	99,99 %	I
PET 99,97/PVC 0,03	Bottle sort®	ES	2	99,998 %	I
PMMA 48,5/PC 51,5	(meubles)	ES	2	99,6 %	I
PVC 95/PP5	auto (production)	ES	1	99,97 %	L
PVC 80/PP 20	auto (production)	ES	1	99,98 %	L
PVC 75/PP 25	auto (production)	ES	1	99,94 %	L
PVC 50/PP 50	auto (production)	ES	1	99,7 %	L

Légende : ES : Séparation électrostatique  
 L : Lavage  
 D : Séparation densimétrique  
 Z : Dépoussier (zig-zag)  
 S : Séchage  
 I : Niveau industriel  
 L : Echelle du laboratoire

## **2 - Flottation-moussage**

(voir le rapport de thèse)

L'ensemble des essais ont été réalisés avec 100 ppm d'additifs (1mg/1kg d'eau), avec de l'eau distillée pour bien voir l'influence des surfactants. Mais l'utilisation d'eau du robinet améliore souvent les séparations car cela permet de rendre les plastiques plus hydrophiles (à cause des nombreux sels minéraux présents).

Tous les essais ont été réalisés à partir de granulés de plastiques vierges (le laboratoire réceptionne des plaques qu'il pré-découpe, puis qu'il coupe en petits morceaux de 3 à 6 mm maximum).

En ce qui concerne le ratio eau/matière, le TU Delft a travaillé avec un ratio de 20-40 g de matière pour 8 l d'eau, au niveau du laboratoire. Mais il existe d'autres centres qui parviennent à travailler avec 400 g de matière dans 8 l d'eau. Le TU Delft n'a pas réalisé d'essais particuliers leur permettant de définir la limite de concentration lors de la séparation par flottation-moussage.

En fait, la thèse de N. Fraunholz n'est pas axée sur le problème de la séparation des matières plastiques, mais sur la compréhension des phénomènes de surface qui se produisent avec l'action de différents surfactants.

Une quantité importante d'additifs ont été testés, sur différents plastiques techniques. L'ensemble des résultats sont présentés dans le mémoire de thèse.

Cet ouvrage a pour objectif d'aider les chercheurs et les industriels dans le choix des additifs en fonction des matières plastiques qu'ils veulent séparer, chaque type de séparation demandant la mise au point d'un additif ou d'un mélange d'additifs spécifique.

En fait, une quantité importante de paramètres influencent la séparation par flottation-moussage : qualité de l'eau utilisée, taille des grains, agitation, répartition et tailles des bulles d'air, pH, température, etc... et cela demeure une technique délicate à mettre en oeuvre (la reproductibilité des résultats n'est pas toujours assurée).

### **Cas particulier de séparation : PA / autres plastiques**

Le PA absorbe l'eau (propriété intrinsèque des PA, qui leur confère notamment la flexibilité) il est donc naturellement plus hydrophile que les autres plastiques sur lesquels les bulles d'air viendront s'accrocher. On a des taux d'efficacité de 100 % quand on traite un mélange où le PA est considéré comme polluant (ex : 10 % de PA dans 90 % d'autres plastiques).

N.B. : Le PA, en tant que tel, peut difficilement être séparé en voie humide car, ensuite, il nécessite une étape de séchage très longue, ce qui n'est pas toujours rentable.

<b>Compte rendu de visite VEKA Umwelttechnik GmbH (Behringen - D)</b>
---

*Etaient présents : J.J. Robin (Ceremap), W. Hoven (Veka)*

VEKA Umwelttechnik GmbH est filiale à 100 % du groupe Laumann, propriétaire de VEKA AG qui depuis 25 ans fabrique des profilés fenêtre. Sa clientèle (environ 1 000 clients) est essentiellement européenne (N.B. : en France : VEKA SA à Toulon) mais VEKA AG se tourne actuellement vers l'est (Pologne, Russie) et la Chine.

VEKA collecte, dans le cadre d'AGPU, une partie du gisement de fenêtres chez les producteurs allemands (chutes de coupes) par retour après livraison client ainsi que chez les poseurs pour recycler le PVC qui sera in fine revendu en quasi totalité à la maison mère qui le réintègre dans son cycle de fabrication de profilés (mélange à hauteur de 70 %). Indépendamment du contexte légal, il semble que VEKA ait voulu prouver la recyclabilité du PVC dans une conjoncture politique difficile (pression des verts, incendie de l'aéroport de Düsseldorf) en construisant une unité capable de traiter 70 % du gisement potentiel allemand (17 000 T de chutes + 5/10 000 T de vieux matériaux de pose).

### Economie du système VEKA

VEKA met gratuitement à la disposition des fabricants, des conteneurs métalliques pour collecter les chutes de fabrication. Cette collecte d'un gisement pur à 98 % coûte 20 Pf/kg à VEKA hors frais de transport estimés à 16 Pf/kg, la société possédant son propre parc de véhicules (4 semi-remorques).

Pour les vieilles fenêtres, le rendement est plus faible (35 à 40 %) car le gisement est aussi constitué de verre, fer, caoutchouc, mais dans ce cas, VEKA reçoit des collecteurs, 200 DM/T.

50 % du gisement traité par VEKA est récupéré par les collecteurs qui financent leurs prestations amont et aval par le biais d'un montant forfaitaire facturé à la fenêtre (45 DM/élément de 45 kg en moyenne).

Il est clair que le coût de mise en décharge est actuellement le principal concurrent du système VEKA et ce jusqu'en 2005 (au minimum).

### Techniques utilisées

Les techniques utilisées par VEKA se veulent très automatisées puisque l'on compte 3 productifs directs pour assurer le fonctionnement de l'unité. L'unité, qui traitait 3 000 T de PVC en 94, a accru sa capacité pour traiter en 1996 près de 8 000 T de PVC.

Le procédé de fabrication est schématisé sur la figure n° 94 (Rapport final).

### Données techniques :

- Capacité du broyeur à marteau : 36 T/h
- Rendement de régénération des résines : 97,5 %
- Degré de refus : 2,5 %
- Pureté du recyclé PVC : 100 %

- Capacité de stockage : 1 340 T
  - Capacité de traitement : 3 T/h
  - Courants de Foucault → séparation :
    - non ferreux
    - ferreux
    - plastiques/bois/verres
  - Séparation aéraulique → séparation :
    - PVC/bois/caoutchouc
    - verres
  - Tables densimétriques → séparation :
    - PVC
    - caoutchoucs
  - Tri par couleur des résines ==> 4 tris successifs
- \* fin 1997 : 1 tri supplémentaire pour reconnaissance du marron foncé,
- \* à partir de 1997 : introduction d'un microniseur dans le process (600 mm/500 kg/h)

## **Annexe n° 2**

**Tableaux d'adresses**

TABLEAU D'ADRESSES

N°	Nom	Adresse	Code Postal	Ville	Pays	Téléphone
1	A.I.C.	7128 Ambassador Road	21207	Baltimore, MD	USA	(410)9448400
2	AGR GmbH	Gildehofstraße 1 Postfach 10 01 44	45001	Essen	Allemagne	(49)201 24 29 0
3	ANDRIN	34. avenue de Saintignon - BP 79	54406	Longwy Cedex	France	0382440146
4	APME	Avenue E. Van Nieuwenhuysse 4	B-1160	Bruxelles	Belgique	(+32)2 672 8259
5	Argonne National Laboratory	Energy Systems Division 9700 S. Cass Avenue	6 439	Argonne, Illinois	USA	
6	Argonne National Laboratory B.J. Jody and E.J. Daniels Energy Systems Division	9700 South Lass Avenue ES/362	IL 60439-4815	Argonne	USA	
7	ASOMA Instruments Inc.	11675 Jollyville Road	78759	Austin, Texas	USA	(512)2586608
8	Automation Industrial Control	7128 Ambassador Road	21207	Baltimore, Maryland	USA	(410)944 8400
9	Autoscreen MAPROTECH	Postfach 1180	D-2000	Hamburg-Schenefeld	Allemagne	(+49)408304545
10	Axon AB, Nyvang/Sweden	Imexo Handelskontor GmbH, Voßkuhlenweg 2,	D-22941	Bargteheide	Allemagne	045 32/2 38 90
11	BASF Corporation		08728-1234	Mount Olive, New Jersey	USA	
12	Bd Plast, Bondeno/Italy	Volker Lietz, Marktstraße 1,	D-31061	Alsfeld	Allemagne	051 81/1406
13	BELOH GmbH	Georg. Wessel Straße 5 - Industriegebiet Süd	D-3250	Hamel	Allemagne	
14	Beringer Division John Brown Inc.	PO Box 485 - Beringer Way	01945	Marblehead, MA	USA	6176316300
15	BLJK	Zone Industrielle de Chenêt	91490	Milly la Forêt	France	0164987979
16	Bomen (représentée en France par Fondis Electronic)				Pays-Bas	
17	BRGM	Avenue de Concyr - BP 6009	45060	Orléans Cedex 2	France	0238643624
18	Brit AS Recycling Anlagen GmbH	Breslauer Straße 19,	D-63452	Hanau	Allemagne	061 81/9 1870
19	British Petroleum Company Britanic House	1 Finsbury Circus	EC2M 7BA	London	Angleterre	
20	Brüker Spectrospin	34,rue de l'Industrie	67166	Wissenbourg Cedex	France	03.88 73 68 00
21	Buhler Ltd	Analytical Technology Dpt.	CH-9240	Uzwil	Suisse	073 50 37 93
22	CARPCO	ZI du Bearn	54400	Cosnes et Romain	France	0382252300
23	CEA-CEREM-DEM	BP 85 X	38041	Grenoble Cedex	France	
24	CHAUVIN S.A.	13, rue Alfred de Vigny	38000	Grenoble	France	0476093063
25	CMB	Z.I. Ouest, Veyziat - BP 4011	01114	Oyonnax Cedex	France	0474819600
26	Colonel	20, rue des Vosges - Centre de Poulfanc	56860	Sene	France	0297426200

27	Cornell University	School of Chemical Engineering - 120 Olin Hall	14853	Ithaca, New York	USA	
28	Daimler Benz AG.	Postfach 23 60	89013	Ulm	Allemagne	
29	Davidson Textron Inc.	Industrial Park	03820-1504	Dover, New Hampshire	USA	
30	DAVIDSON TEXTRON INC.	Industrial Park	0 3820-1504	Dover-New Hampshire	USA	
31	DSM N.V.	Mendelstrasse 7	D-48149	Münster	Allemagne	
32	DSM Research	PO BOX 18	6160 MD	Geleen	Pays-Bas	
33	E.I. Du Pont de Nemours and Cie	Central Research and Development	1 9880-0357	Wilmington, Del.	USA	
34	Equipements Scientifiques		92	Garches	France	
35	Erema GmbH	Freindorf, Unterfeldstraße 3,	A-4052	Ansfelden/Linz		0043/732/3190-0
36	ERIEZ (représenté par Dorst France sarl)	142, rue de Charonne	75011	Paris	France	0143489897
37	ESM UK Ltd	Building 41, Satake - Bird Hall lane, Cheadle Heath	SK30RY	Stockport, Cheshire	Angleterre	(+44)1614914775
38	Filtertechnik GmbH Willy Spee	Rurtalstraße 29,	D-41849	Wassenberg	Allemagne	02432/49402
39	Ford Motor Cie Ltd	Brentwood	CM13 3BW	Essex	Angleterre	0277 25 3000
40	Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie	Joseph von Fraunhoferstr.7	D-76327	Pfinztal	Allemagne	
41	GEMINI (représenté par DELANE S.A.R.L.)	1, rue de Molkenrain	68100	Mulhouse	France	0389540577
42	Gneuß Kunststofftechnik GmbH	Mönichhusen 42,	D-32549	Bad Oeynhausen	Allemagne	05731/5307-0
43	HAMOS Recycling-Technik	Ruhe am Bach 5	D-82377	Penzberg	Allemagne	(088)56/2011
44	Herbold ZT	Industriestraße 33	D-74909	Meckesheim	Allemagne	(+49)62261506
45	High-Technology, Corp. (HI-TECH)	97 SO. State St.	07601	Hackensack, N.J.	Angleterre	(+44)2014880010
46	Hoechst Celanese Corporation			Sommerville, New-Jersey	USA	
47	Ingenieursozietät Abfall	Griegstraße 27b	D-7000	Stuttgart 1	Allemagne	(+49)711692031
48	Institute de Ciencia y Tecnologia de Palmineros C.S.I.C.	Juan de la Cierva 3	28006	Madrid	Espagne	
49	Josef Trendelkamp Stahl-und Maschinenbau GmbH & Co. KG	Bahnhofstraße 39-43,	D-48356	Nordwalde	Allemagne	02573/925-0
50	Kali und Salz GmbH	Friedrich-Ebert-Straße 160	D-34119	KASSEL	Allemagne	
51	Kaliforschungs institut	In der Ave 1	D-36266	HERINGEN	Allemagne	
52	Key-Filters	100 Goldstein Drive Highland Industrial Park	02895	Woonsocket, RI	USA	(401)7622100
53	KHD Humbold Wedag AG		D-51057	Köln	Allemagne	(+49)2218226530
54	Kreyenborg GmbH	Coermühle 1,	D-48157	Münster	Allemagne	0251/21405-0

55	Krupp Forschungsinstitut GmbH	Postfach 10 22 52	D-4300	Essen I	Allemagne	
56	Laser Labor Adlershof	Rudower Chaussee 6 Geb. 19.7	12484	Berlin	Allemagne	(49)30 6719 8376,77,78
57	Laser Zentrum Hannover	Hallerithallee 8	30 419	Hannover	Allemagne	
58	Lazer Zentrum Hannover (LZH)	Hollerithallee 8	30419	Hannover	Allemagne	
59	LJUNGBO Sven	P.O.Box 111	S-74623	Balsa	SE (Suède)	
60	Magnetic Separation Systems, Inc.	3738 Keystone Avenue	37211	Nashville, Tenn	USA	(615)7812669
61	Magnetic Separation Systems, Inc.	624 Grassmere Park Drive Suite 8	37211	Nashville, Tenn	USA	(615)7812669
62	MARTIPLAST	Z.A. du Borrey	01100	Martignat	France	0474811320
63	MASSEN	Am Seerhein 8	D-78467	Konstanz	Allemagne	(07531)57502
64	MICRONYL-WEDCO	3, rte de la Grande Paroisse	77130	Monterea	France	
65	MONSANTO Compagny	800 North Lindbergh Blvd.	63167	Saint Louis, M.O.	USA	
66	National Recovery Technologies, Inc.			Nashville, Tenn.	USA	
67	National Technical University of Athens (M.Papaspnyrides)	Laboratory of Polymers Technology Zographou	15780	Athènes	Grèce	
68	Newell Magnetics (Unimag)	Burnt Meadow Road Redditch, Worcs.	B989PA	North Moons Moat	Angleterre	(+44)52765432
69	Nicolet Instrument Corporation			Madison Wisconsin	USA	
70	NOELL GmbH	Abt.Neue Technologien Alfred-Nobel-Str.20	97 080	Würzburg	Allemagne	(0931)9031900
71	NORDBERG France SA	41, rue de la République	71000	Mâcon	France	0385396200
72	OPT RESEARCH Inc.	3-1-6 Nihonbashi-Honcho Nagatani Bldg. 612		Chuo-ku, Tokyo	Japan 103	(81)3-3270 2722
73	Pallmann	Postfach 1652	D-66466	Zweibrücken	Allemagne	(+49)63328020
74	PIOVAN France	Chemin du Pagnat	01460	Brion	France	0474767709
75	Plastic Recovery Systems Inc.			Toledo, Ohio	USA	
76	Plastics Laboratory PMF	Nederlandse P. Bedrijven BV PO BOX 218	5600 MD	Eindhoven	Pays-Bas	
77	Préciméca	220, rte de Grenade	31700	Blagnac	France	0561712523
78	Product Developments Ltd.	Cecil Road, The Hyde,	NW9 5EL	Londres	Angleterre	0044/181/2054101
79	PUR RRC	SPI Polyurethane Division 355 Lexington Avenue	10017	New York, N.Y.	USA	
80	RADIX System Ltd	Unit D3/D4 - Premier Centre - Abbey Park	SO519AQ	Romsey, Hampshire	Angleterre	(+44)1794830240
81	REMEX SA	126, route de Reims	02200	Soissons	France	0323735050
82	Rensselaer Polytechnic Institute	The Isemann Department of Chemical Engineering	12180-3590	Troy, New-York	USA	(518)276 6931
83	RESULT (représenté par Mannesmann Ind. SA)	12, rue Tronchet	75008	Paris	France	0144718888
84	RUTGERS University Center for Plastics Recycling Research	Busch Campus Bldg 3529	08855	Piscataway, New Jersey	USA	
85	S+S Metallsuchgeräte und recycling GmbH	Regener StraBe 30	D-94513	Schönberg	Allemagne	(+49)85543080

86	SCAMIA	18-20 Rue des Entrepreneurs - ZA Plaine Haute	91560	Crosne	France	0169493150
87	SOREMA	Via per Cavolto 17	22040	Arzano del Parco Como	Italie	(+39)31631637
88	SRTI System	18, av. du Maréchal Juin	92366	Meudon la Forêt Cdx	France	0139455400
89	Steinert	Widdersdorfer Straße 329-331	D-50933	Cologne	Allemagne	
90	SWECO Europe	83, rue Jacques Potel	95190	Goussainville	France	0139338777
91	SYDEL	BP 2834	56312	Lorient Cedex	France	0297880202
92	TNO Institute of Environmental Sciences Technology and Process Innovation	Laan Van Westenek 501 PO BOX 342	7300	AH Apeldoorn	Pays-Bas	(+31)555493493
93	TOA Electronics Ltd	1-29-10 Takadanobaba Shinjyuku	169	Tokyo	Japon	81 3 3202 0225
94	Toyota Central R&D Labs., Inc.	Nagakute, Aichi	480-11		Japon	(81) 561 63 5419 5386
95	Trendelkamp Stahl- und Maschinenbau GmbH	Westring 18	D-4418	Nordwalde	Allemagne	(+49)25732048
96	TU Delft	Mijnbonwstraat 120	2628RX	Delft	Pays-Bas	(+15)2781545
97	University of Bradford			Bradford	Angleterre	
98	University of Illinois Office of solid waste research	Institute for Environmental Studies - 1101 W. Peabody Drive	61801	Urbana, Illinois	USA	
99	University of Pittsburgh	Chemical Engineering Department - 1249 Beredum Hall	15261	Pittsburgh, Pennsylvania	USA	(412)6249630
100	University of Southampton	Department of Cheminsty Highfield	SO 17 1BJ	Southampton	Angleterre	
101	US Bureau of Mines	Tuscaloosa Research Center PO BOX L, Univ of Alabama Campus	35486	Tuscaloosa, Alabama	USA	
102	VAUCHÉ SA	19, Bd Gambetta	08200	Sedan	France	0324290350
103	VEKA Umwelttechnik GmbH	Industriegebiet Im Strabeld 1	D-99947	Behringen/ Thüringen	Allemagne	(036254) 725-0
104	WIL-MAN Polymer Filtration GmbH	Am Kirchplatz 2,	D-48493	Wettringen	Allemagne	02557/8368

## **Annexe n° 3**

### **Glossaire**

## GLOSSAIRE

∅	Diamètre
µm	micromètre
ABS	Poly(acrylonitrile-butadiène-styrène)
ABS-FV	ABS chargé fibre de verre
Ag	Argent
Al	Aluminium
ASA	Poly(acrylonitrile-styrène-acrylonitrile)
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
Cu	Cuivre
dB	décibels
DIB	Déchets Industriels Banals
DSD	Dual System Deutschland
ε	Résidus
EPDM	Ethylène-propylène-diène monomère
FR	retardateurs de flamme
FT-MIR	Spectrométrie moyen Infrarouge, à transformée de Fourier
FT-NIR	Spectrométrie proche Infrarouge, à transformée de Fourier
FT-R	Spectrométrie Raman, à transformée de Fourier
HIPS	Polystyrène choc
IR	Infrarouge
IRLT	Thermographie Infrarouge par impulsion laser
LIESA	"Laser Induced Emission Spectroscopy" : spectrométrie ionique laser
MIR	Moyen Infrarouge
MMA	Méthacrylate de méthyl
NaOH, KOH	Hydroxyde de sodium, de potassium
NIR	proche Infrarouge
OM	Ordures Ménagères
PA	Polyamide
PA 6	Polyamide 6 (nylon)
PA 66	Polyamide 6-6
PBDE	composés
PBT	Polybutadiène téréphtalate
PC	Polycarbonate
PE	Polyéthylène
PEbd	Polyéthylène basse densité
PEEK	Polyether cétone
PEhd	Polyéthylène haute densité
PEN	Polyéthylène naphthalate
PET	Polyéthylène téréphtalate
PMMA	Polyméthacrylate de méthyl
POM	Poly(oxyméthylène)
PP	Polypropylène
PP-FV	Polypropylène chargé fibre de verre
PPE	Polyphénylène
ppm	partie par million
PPO	Oxyde de polyphénylène
PS	Polystyrène
PTM	Prescriptions Techniques Minimales
PU	Polyuréthane

## GLOSSAIRE (suite)

PUR	Polyuréthane réticulé
PVC	Polychlorure de vinyle
PVDC	Poly(di-chloro vinylidène)
Py-IR	Pyrolyse Infrarouge
Py-MS	Pyrolyse couplée spectrométrie de masse
RB	Résidus de Broyage
SB	Poly(styrène-butadiène)
SBS	Poly(styrène-butadiène-styrène)
SF <sub>6</sub>	Hexafluorure de soufre
Tf	Température de fusion
Tg	Température de transition vitreuse
THF	Tetrahydrofurane
UV	Ultra - Violets
VHU	Véhicules Hors d'Usage

## **LISTE DES FIGURES**

## Liste des figures

Généralités
-------------

**Figure n° 1 : Les techniques de séparation des matières plastiques**

**Figure n° 2 : Démontage de pièces plastiques issues de VHU**

**Figure n° 3 : Broyeur à couteaux**

**Figure n° 4 : Concasseur à impact**

**Figure n° 5 : Concasseur à marteaux**

**Figure n° 6 (a) : Concasseur à cylindre**

**Figure n° 6 (b) : Concasseur à cylindre denté**

**Figure n° 7 : Concasseur giratoire (ou à cône)**

**Figure n° 8 : Surfaces de criblage**

**Figure n° 9 : Crible statique**

**Figure n° 10 : Crible vibrant**

**Figure n° 11 : Principe de fonctionnement du Zig-Zag**

**Figure n° 12 : Principe de fonctionnement de « l'Air-Knife »**

**Figure n° 13 : Séparateur à tambour**

**Figure n° 14 : Séparateur à cyclones**

**Figure n° 14bis : Fonctionnement d'un cyclone**

**Figure n° 15 : Table densimétrique à lit fluidisé**

**Figure n° 16 : Hydrocyclone**

**Figure n° 17 : Principe du procédé CENSOR**

**Figure n° 18 (a, b) : Courbes de CO<sub>2</sub> (densité/T°/Pression)**

**Figure n° 19 (a, b) : Courbes de CO<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>**

**Figure n° 20 : Appareillage de laboratoire (séparation par fluide supercritique)**

**Figure n° 21 : Appareillage industriel (séparation par fluide supercritique)**

**Figure n° 22 : Tri balistique (par rebonds)**

**Figure n° 23 : Equipement de flottation-moussage**

**Figure n° 24 : Colonne d'Hallimond (Appareillage de laboratoire)**

**Figure n° 25 (a, b) : Séparateurs magnétiques**

**Figure n° 26 : Poulie magnétique**

**Figure n° 27 : Mouvement de particules chargées**

**Figure n° 28 : Techniques de chargement des particules**

**Figure n° 29 : Séparateur électrostatique Hamos**

**Figure n° 30 (a) : Traitement par dissolution sélective (RPI)**

**Figure n° 30 (b) : Pilote de traitement par dissolution sélective (RPI)**

**Figure n° 31 : Tableau comparatif des techniques d'identification**

**Figure n° 32 : Analyses Infrarouges**

**Figure n° 33 : Principe de détection IR (transmission)**

**Figure n° 34 : Pyrolyse IR**

**Figure n° 35 : Principe de détection IRLT**

**Figure n° 36 (a, b) : Séparation à chaud par adhésion des particules**

**Figure n° 37 (a,b) : Filtres traditionnels à tiroir coulissant**

**Figure n° 38 (a, b) : Filtres continus à double tiroir coulissant WILMAN**

**Figure n° 39 : Filtres continus à double tiroir coulissant KREYENBORG**

**Figure n° 40 : Filtre continu à bandeau déroulant Autoscreen**

**Figure n° 41 : Filtre continu à bloc Gemini**

**Figure n° 42 : Filtre continu à racloir Gneuß**

**Figure n° 43 : Filtre continu à racloir Erema**

**Figure n° 44 : Filtre continu rotatif Beringer**

**Figure n° 45 (a, b) : Filtre continu rotatif Gneuß**

**Figure n° 45 bis : Principe de filtration Scamia**

## Déchets Ménagers

**Figure n° 46 (a) : Techniques de tri filaire**

**Figure n° 46 (b) : Techniques de tri planaire**

**Figure n° 46 B : Tableau récapitulatif des procédés de séparation de corps creux entiers**

**Figure n° 47 : Procédé de séparation NRT**

**Figure n° 48 (a,b) : Ligne de traitement MSS**

**Figure n° 49 : Ligne de traitement AIC**

**Figure n° 50 : Module de tri CRITERION**

**Figure n° 51 : Ligne de traitement Binder + Co (intégrant le CRITERION)**

**Figure n° 52 : Procédé de séparation Sydel (DIBOP)**

**Figure n° 53 : Procédé de séparation Vauché (NEUROPLAST)**

**Figure n° 54 : Procédé de séparation Pellenc (PLANECO)**

**Figure n° 55 : Schéma de traitement Carpco**

**Figure n° 56 : Schéma de traitement Kali une Salz**

**Figure n° 56 (bis) : Schéma de traitement Systec**

**Figure n° 57 : Procédé de séparation par flottaison Rutgers**

**Figure n° 58 : Procédé de séparation par micronisation Micronyl**

**Figure n° 59 : Schéma de traitement Agfa**

## Automobile

**Figure n° 60 : Schéma de traitement Hamos**

**Figure n° 61 : Lit fluidisé Daimler-Benz**

**Figure n° 62 : Ligne de traitement proposée par RECAP**

**Figure n° 63 : Schéma de traitement d'appareils ménagers Metallgesellschaft**

**Figure n° 64 : Broyeur à cône Daimler-Benz**

**Figure n° 65 : Schéma de traitement des pare-chocs Daimler-Benz**

**Figure n° 66 : Schéma de traitement des pare-chocs Sumitomo**

- Figure n° 67 : Schéma de traitement des pare-chocs Nissan Motor**
- Figure n° 68 : Schéma de traitement par hydrocyclonage Teijin**
- Figure n° 69 : Schéma de traitement par flottation-moussage Daimler-Benz**
- Figure n° 70 : Techniques de séparation voie humide/voie sèche**
- Figure n° 71 : Etude économique du traitement des matières plastiques**
- Figure n° 72 : Appareil de détection MIR de Brüker**
- Figure n° 73 : Appareil de détection NIR d'Opt Research Inc.**
- Figure n° 74 : Principe d'identification par pyrolyse IR de Nicolet**
- Figure n° 75 : Procédé de séparation par dissolution sélective de l'A.N.L.**

**Produits Electriques/Electroniques**

- Figure n° 76 : Ligne de traitement de câbles électriques, Roumanie**
- Figure n° 77 : Ligne de traitement de câbles de télécommunication, Roumanie**
- Figure n° 78 : Séparation électrostatique Corona, Hamos**
- Figure n° 79 : Procédé de traitement P.R.S.**
- Figure n° 80 : Procédé de traitement Varray**
- Figure n° 81 (a,b) : Procédé de traitement NEC Corp.**
- Figure n° 82 (a, b) : Séparation mécanique Hüls AG**
- Figure n° 83 : Schéma de traitement Arra Terra Recycling**
- Figure n° 84 : Identification par NIR, LLA**
- Figure n° 85 : Identification par IRLT, LZH**
- Figure n° 86 : Identification par ionisation couplée détection, AGR**
- Figure n° 87 : Traitement par flottation-moussage, Kansai University**

**Moquettes**

- Figure n° 88 : Structures multicouches de moquettes**
- Figure n° 89 : Schéma de traitement des moquettes Monsanto**
- Figure n° 90 : Schéma de traitement des moquettes BASF**

**Figure n° 91 : Séparation par extrusion BASF**

**Figure n° 92 : Schéma de traitement CENSOR**

**Figure n° 93 : Identification NIR de moquettes, Brüker**

**B T P**

**Figure n° 94 : Ligne de traitement VEKA**

**CONCLUSIONS**

**Figure n° 95 : Tableau récapitulatif des techniques de séparation des matières plastiques**