**PRINCIPALES TECHNIQUES DE TRI**

**Introduction**

Le tri a pour fonction principale de transformer un flux de déchets mélangés et non directement valorisables en plusieurs fractions, dont certaines se prêteront mieux au recyclage matière. De ce point de vue, le tri est une étape intermédiaire du traitement des déchets, les flux sortants étant pris en charge par d'autres filières (recyclage, incinération ...).

Les opérations de tri sont au cœur de la chaîne de traitement des déchets et sont plus particulièrement une étape clé du processus de recyclage promu puis imposé par les instances Européennes. Le tri des déchets a toujours intégré des étapes de tri manuel mais certaines fonctions sont depuis longtemps confiées à des machines comme, par exemple, l'enlèvement des ferrailles par tri magnétique.

Les techniques de traitement mécanique rencontrées sur les unités de traitement sont : les opérations unitaires de réduction granulométrique qui visent à réduire les dimensions des déchets en vue de leur traitement. Les équipements sont les broyeurs, les déchiqueteurs (shredders), des trommels, les cribles, afin de séparer les flux et les diriger vers les techniques les plus appropriées, table densimétrique (aéraulique), tapis sélectionneur hydraulique, tapis balistique etc…

**1. Tri mécanique**

**1.1 Tri par réduction de taille (fragmentation)**

La réduction de la taille est généralement une étape essentielle dans le traitement mécanique des déchets mixtes, lors de ce procédé les déchets encombrants, dont la taille est compatible avec le traitement. Le broyage provoque également une certaine homogénéité au niveau de la réduction de la taille des diverses composantes. Cette uniformité est une exigence de certains systèmes de tri mécaniques. Le terme réduction de la taille a un certain nombre de synonymes dans la gestion des déchets solides, y compris le Déchiquetage (shredding) et le broyage (grinding). En effet Le terme déchiquetage a été largement adopté en référence à la réduction de la taille des déchets.

La fragmentation est l’opération par laquelle on cherche à réduire la taille et/ou à augmenter la surface développée de l’unité de masse (surface spécifique) de particules solides. Son efficacité est toujours évaluée par une mesure de l’accroissement de la finesse.

Les sollicitations mécaniques accroissent l’énergie libre des matériaux, qui va se convertir sous différentes formes. L’énergie de contrainte élastique est ainsi convertie en énergie élastique des défauts de réseau ponctuels (à l’échelle atomique), linéaires (dislocations, macles), plans (défauts d’empilement, joints de grains) ou volumiques (désordres structuraux). La conversion de plus grandes quantités d’énergie libre en énergie de surface engendre la fracturation.

La fragmentation peut avoir des finalités diverses :

 réduire les dimensions, soit pour faciliter la manutention, le conditionnement ou l’utilisation, soit pour libérer les constituants avant une opération séparative ;

 éliminer, avant une mise en œuvre, des zones de rupture potentielles (libération d’unités quasi monocristallines) ;

 augmenter la réactivité vis-à-vis de processus dont la cinétique dépend de la finesse ou du degré de désordre ;

 homogénéiser (mélanges, dilutions solides, dosages) ;

 conférer des spécifications de forme, de texture, de distribution granulaire ;

 modifier la fonctionnalité, soit sous l’effet de l’activation mécano chimique, soit en profitant de la création de nouvelles surfaces pour y implanter les groupes fonctionnels désirés.

**1.2 Tri par criblage**

Le criblage était à l’origine une opération simple et modeste, mais il a évolué et est devenu, même pour le plus classique des cribles vibrants, une opération unitaire incluant beaucoup de fonctions, par exemple :

– la fonction d’origine de coupure granulométrique, comme le scalpage (*éliminer les fractions les plus fines)*, le criblage primaire, le criblage secondaire ou tertiaire dans une opération multi étage (avec séparation finale de plusieurs produits) ;

– le lavage et l’égouttage ;

– la séparation de populations de grains, en jouant sur les formes ou les tailles des particules ;

– la récupération de liquide dense en gravimétrie.

Le produit que l’opérateur désire obtenir guide le choix de la fonction de coupure granulométrique du crible. Dans le cas de minerais métalliques, le crible fournit en général des produits qui seront traités (triés) dans d’autres circuits et une certaine tolérance est admise. En revanche, dans le cas de minéraux industriels ou de matériaux de construction, le criblage fournit souvent des produits directement commercialisés avec des spécifications de plus en plus strictes.

La caractérisation du matériau, en dehors de sa composition, doit permettre de donner, au moins partiellement, les indications essentielles suivantes :

– le pourcentage de passant contenu dans l’alimentation ;

– le pourcentage de particules dans l’alimentation de taille critique (de dimension supérieure à 75 % de la taille de l’ouverture) ;

– le taux d’humidité dans l’alimentation ;

– la répartition des particules selon les formes ;

– la rugosité des surfaces des particules ;

– la densité en vrac.

Les constructeurs possèdent des banques de données comprenant les caractéristiques de plus d’un millier de types de matériaux à traiter. Ils peuvent combiner ces connaissances de base avec la théorie du criblage de façon à développer rapidement et systématiquement un choix sûr de la conception du crible. Cette démarche prend en compte les paramètres identifiés du matériau qui s’ajoutent aux paramètres *appareil*:

– le type de crible et de mouvement ;

– la pente, la vitesse et la longueur du crible ;

– le type de surface criblante, les dimensions des ouvertures et le taux de vide.

Deux types de criblage sont utilisés dans le procédé de séparation des déchets :

1) le criblage grossier

Le criblage est réalisé par un crible à 1 ou 2 plateaux (trommels). Le double plateau trouve son emploi dans les circuits de broyage autogène intégral (*fully autogenous grinding*) qui utilise des galets extraits d’un premier broyeur comme moyen de broyage pour un deuxième broyeur. La dimension des mailles du crible est comprise entre 0,5 et 2 mm pour le plateau inférieur et de 6 à 40 mm pour le plateau supérieur. Il est fréquent que 90 % en masse de l’alimentation du crible passe à travers le plateau supérieur. L’épaisseur du lit doit permettre d’une part, un bon écoulement de l’eau, d’autre part, une bonne efficacité du criblage sur le plateau inférieur.

2) Le criblage fin

Les exemples d’utilisation du criblage fin sont aussi divers que son emploi comme classificateur, ou comme concentrateur, ou encore comme moyen d’augmenter la récupération d’opérations subséquentes de séparations par gravité, par flottation, etc…


**Figure 1** : Trommel à deux mailles

L’insertion d’un criblage fin dans un circuit de broyage est avantageuse quand il existe un contraste entre les masses spécifiques des minéraux à récupérer et celles des éléments de la gangue (dans le cas d’une récupération d’un rejet minier). Les classificateurs habituels (à vis, hydrocyclones, etc.) séparent les particules selon leurs vitesses de sédimentation. Quand il existe un fort contraste entre les masses spécifiques, on retrouve ensemble des particules grossières légères de gangue, des mixtes de constitution, et des fines particules lourdes.

On distingue plusieurs types de cribles :

- Le crible cylindrique (trommel) (voir figure 1)

- Le crible à godet

- Le crible à disque ou étoile

- Le crible plan

L’opération de déchiquetage primaire (ou le broyage grossier) est utilisée pour réduire la taille des déchets à une taille maximale de particules d'environ 10 cm, elle est une caractéristique de nombreuses installations de traitement des déchets mixtes. Le shredding secondaire et/ou tertiaire est utilisé pour des déchets ayant des tailles inférieures à 10 cm (cas de la production d’un combustible dérivé de déchets de faible granulométrie). On utilise un type de shredder appelé hammermil.

Le hammermil est un type de déchiqueteur à grande vitesse fréquemment utilisé pour la réduction de la taille des déchets solides. Les hammermils à basse vitesse; à couple élevé ; shear shredders (figure III.4) sont d’autres types de shredders, ils sont utilisés dans certains cas pour la réduction de la taille les déchets solides. Cependant, l'utilisation est généralement pour le déchiquetage grossier.

Les hammermils sont de deux types selon l'orientation du rotor à savoir : horizontal et vertical. Les deux types ont des marteaux qui tournent à l'intérieur de la déchiqueteuse et provoquent la réduction de la taille des particules par collision avec le matériau d'alimentation. Les marteaux peuvent être montés sur le rotor de broyage d'une manière fixe ou tournant librement. Le hammermil d'oscillation horizontale est couramment utilisé dans le traitement des déchets mixtes. Ses principaux éléments sont le rotor, des marteaux, des grilles, cadre, et le volant, sa vitesse de rotation est généralement dans la gamme de 1000 à 1500 tours par minute (Figure 2). Dans le cas du hammermil vertical (figure 3) l’axe de rotation est vertical. Le matériau d'alimentation descend parallèlement à l'axe de l'arbre et est exposée à l'action des marteaux rotatifs. Le matériau est alors déchiqueté en fonction du temps et est récupéré au bas de l’appareil. Dans le cas du shear shredding (figure 3) le procédé est caractérisé par la réduction du temps de séjours du matériau dans l’appareil, la réduction de la vitesse de rotation. Ces deux derniers paramètres mènent à la réduction élevée de la taille des déchets. L’appareil est constitué de deux arbres tournants, compteur horizontal. Chaque arbre contient des couteaux pour déchirer et cisailler le matériau. Les éléments de coupe fonctionnent généralement dans une plage de 20 à 70 tours par minute. En raison de l'action de cisaillement et un couple de torsion élevé, les shear shredders (figure 4) sont couramment utilisés pour réduire la taille des objets qui sont difficiles à broyer, comme les pneus.



**Figure 2** : Coupe d’un hammermil horizontal



**Figure 3** : Hammermil vertical



**Figure 4** : shear shredding

**2 Tri Aéraulique des déchets (air classification)**

La classification par l’air ou aéraulique est un processus de séparation de catégories de matériaux à titre de différences dans leurs caractéristiques aérodynamiques. La caractéristique aérodynamique d'un matériau est essentiellement fonction de sa taille, sa géométrie et sa densité. Le procédé consiste à l'interaction d'un courant de déplacement d'air, la matière de déchets déchiquetés, et la force de gravitation à l'intérieur d'un volume confiné. Dans l'interaction, la force de traction et la force de gravitation est exercée dans les directions différentes sur les particules, il en résulte que les particules les plus lourdes tombent, tandis que les composants les plus légères tendent à se déposer sur le courant d'air.

Dans le traitement des déchets, l’air contrôlé est un moyen de séparation parfait, à la fois en termes de technologie de procédés de fabrication et de solutions commerciales. L’air contrôlé représente une des technologies de base de séparation. Il est polyvalent et offre une plus grande flexibilité que les technologies de séparation mécanique et garantit une grande efficacité dans le tri. En utilisant de l’air, le séparateur à tambour associe un ventilateur de recirculation, une section de séparation avec un tambour rotatif et une chambre d’expansion connectée. C’est la meilleure solution de séparation fondée sur la densité des matériaux à des capacités d’entrée pouvant atteindre 100 t/h.

Il existe plusieurs types de séparateurs aérauliques (figure 5) :

 l’unité de séparation est en diagonale.

 l’unité de séparation est à la verticale.

 l’unité de séparation est en zigzag.

Le séparateur aéraulique peut être aussi utilisé pour la séparation et/ou la valorisation des types de déchets suivants:

 Déchets solides municipaux.

 Déchets commerciaux et industriels.

 Section de raffinage du compost.

 Recyclages de la biomasse/du bois.

 Combustibles dérivé des déchets.

 Valorisation de la cendre résiduelle.



**Figure 5 :** Unités de séparation aéraulique

**3 Tri Hydraulique /Pneumatique**

La classification hydraulique/pneumatique est basée sur les théories des mouvements des solides dans une phase liquide, et donc sur la résistance opposée par un fluide lors du déplacement d’un solide dans celui-ci. Elle utilise un liquide (le plus souvent de l’eau additionnée ou non d’un soluté destiné à augmenter et à ajuster sa densité à une valeur prédéfinie) dans lequel on va conjuguer les actions simultanées de la gravité (et parfois d’une force centrifuge) et les forces résultant de la résistance à la pénétration des particules dans le milieu plus ou moins fluide.

De manière simplifiée, cette technique met en jeu la densité du fluide, sa viscosité, la densité des matériaux, la forme des particules et, éventuellement, les mouvements du fluide. On distingue alors la séparation flotté/coulé pratiquée en bac de flottation/décantation, selon le principe de la poussée d’Archimède où les particules solides sont immergées dans un liquide de densité intermédiaire entre celles des solides à séparer (figure III.6).



**Figure 6** : Comparaison des masses volumiques de quelques métaux et polymères.

La classification pneumatique utilise un flux d’air et est basée sur les mouvements relatifs des particules, les unes par rapport aux autres, et par rapport au fluide. Divers paramètres influent fortement sur l’efficacité du procédé, tels que la siccité des particules à séparer, leur forme, le champ d’accélération du flux d’air. On trouve des classificateurs pneumatiques à courant ascendant de type zig-zag, par centrifugation ou, encore, du type "air-knife" (Figure 8).

**Tableau III.1** : Masses volumiques moyennes des principaux matériaux métalliques et non métalliques



**Figure 7** : Principe d’un hydrocyclonne.



**Figure 8** : Schéma de principe du séparateur à Air-Knife

Principe de séparation par liqueur dense :

C’est une séparation utilisant le principe de rapport des densités des matériaux (déchets non creux en générale). En effet cette méthode de tri consiste à plonger dans un liquide dense, de densité préalablement ajustée, les objets à trier caractérisés par des densités différentes. Les plus lourds sont décantés et les plus légers plongent à la surface.

La liqueur dense est une suspension aqueuse de particules denses, utilisée souvent pour des déchets particulièrement précieux (l’or, le platine, etc…), elle est composé de particules magnétiques afin de pouvoir les récupérer facilement. On utilise le plus souvent, pour réaliser des liqueurs de masses volumiques variant de 1,5 à 3,2 t/m3 :

— du ferrosilicium broyé ou atomisé (r = 6,8 t/m3) ;

— de la magnétite (r = 5 t/m3).

Les installations fonctionnent avec des valeurs médiums dont les masses volumiques sont comprises entre 1,7 et 3,2 t/m3.