



Projet National de recherche et développement

## RAPPORT DE RECHERCHE

### Thème 1 Technologies de séparation à sec des sables et des fines de recyclage Etude bibliographique

Auteurs :  
B. CAZACLIU – F. HUCHET  
IFSTTAR

Avec la participation de J.- M. PAUL

R/15/RECY/019  
LC/13/RECY/28  
Juin 2016

## RESUME

Cette action a pour objectif d'établir une recherche bibliographique sur les technologies de séparation à sec des sables et des fines de recyclage. Il s'agit d'une phase préliminaire avant le choix d'une éventuelle technologie pour réaliser une étude plus approfondies, alors que, à notre connaissance, il n'y a aucun résultat pertinent de chantier C&DW (Concrete and Demolition Waste) à l'échelle industrielle dans cette direction. La chaîne de valorisation des déchets de construction et de démolition passe par une succession de processus dont :

- une phase de réduction de la matière (démolition, concassage, broyage)
- une phase liée au processus d'élaboration comprenant des procédés intermédiaires. Ils visent un traitement des granulats de béton recyclé comprenant des procédés séparatifs précédant la phase d'homogénéisation lors du malaxage en centrale à béton.

C'est sur ce dernier point que porte la présente étude puisqu'il constitue l'un des verrous technologique et environnemental de la chaîne de valorisation des déchets de construction et de démolition. En effet, l'hétérogénéité en termes de nature et de taille des matériaux déconstruits détermine le choix des procédés séparatifs. Ces derniers représenteraient un surcoût économique non négligeable dans le cadre de l'investissement d'une usine de recyclage de C&DW.

Les contraintes de la séparation des fines ( $< 63\mu\text{m}$ ) des granulats recyclés sont semblables aux contraintes des fines de sables de roches concassées. La séparation des fines de sables alluvionnaires bénéficie d'une différenciation entre la taille moyenne des fines (le l'ordre des dizaines de  $\mu\text{m}$ ) et la taille de coupure. Ce n'est pas le cas pour des particules issues du concassage pour lesquelles la distribution granulaire présente une certaine continuité autour de la taille de coupure [58]. De plus, en choisissant une technologie à sec, on doit affronter plusieurs difficultés supplémentaires : une taille de coupure réputée plus haute et d'une efficacité moindre, un effet indésirable de l'agglomération des fines, voir même la non adaptation de la technologie à des matériaux humides.

Malgré tout, de nombreuses informations bibliographiques montrent la possibilité de réaliser la défillérisation d'un sable concassé avec une technologie à sec.

La totalité des équipements pris en considération à ce jour pour cette application sont soit du criblage soit de la classification par courant gazeux.

Pour les cribleurs, un doit considérer des cribleurs vibrés à maille en acier tissé (voir à système Flip-Flop). Le mouvement de vibration doit assurer le dégagement des grosses particules vers la périphérie de la surface criblante. Pour les cribles vibrants, une modulation du mouvement de vibration entre le

haut (zone entrante des particules) et le bas (zone sortante) semble nécessaire. Pour les tamiseuses il semble préférable de profiter de la possibilité d'introduire un mouvement de nutation. Des systèmes de decolmatage peuvent améliorer les rendements.

Pour les classificateurs à air on semble préférer dans la littérature les systèmes dynamiques (donc avec présence des pales en mouvement), inertiels ou par centrifugation (donc basés sur une succession des contre-courants d'air, voir des courants latéraux).

Un problème commun aux cribles et classificateurs à air est le faible rendement induit par une humidité initiale forte du sable soumis à la défillérisation. Des systèmes de préchauffage, voire de désagglomération mécanique, seront sans doute nécessaires pour mettre en place des procédés robustes.

Il faut néanmoins faire remarquer que le cas des sables recyclés n'est pas totalement équivalent à celui des sables de roche concassée. En effet, les particules recyclés ont une minéralogie mixte (béton, roche, brique ...) et une structure hétérogène (pâte de ciment et éléments rocheux pour les particules de béton concassé, par exemple). Cette composition hétérogène génèrent des différences de l'état de surface, densité ... inévitables, et encore plus importantes entre des particules de taille différente. Sur certains systèmes ces différences pourraient améliorer l'efficacité du procédé de défillérisation, sur d'autres systèmes cette efficacité pourrait se voir diminuer. Nous n'avons pas trouvé d'éléments dans la littérature nous résignant sur ces aspects. Nous limitons donc notre analyse à des informations plus générales que celle de la défillérisation des granulats recyclés. Ceci explique par ailleurs l'étendu du périmètre de notre investigation bibliographique, contenant des méthodes qui ne sont pas utilisées à ce jour dans les carrières.

En effet, avant de conclure sur les systèmes à privilégier dans des investigations pour la défillérisation des sables recyclés, il nous semble utile de prendre en considération aussi les systèmes d'élutriation. Un lit fluidisé est caractérisé par une compacité plus grande du matériau granulaire. Les impacts entre les particules pourraient être favorables à une désagglomération des particules fines, qu'il convient à séparer. Aussi, ce système peut paraître plus robuste pour un mélange granulaire contenant aussi des particules de beaucoup plus grande taille. Dans la continuité des systèmes à lits fluidisés, la jig à air ou la table vibrante à air pourront être adaptées à terme pour être efficace sur le problème de la défillérisation.

D'autres principes physiques sont à garder en mémoire. On imagine un potentiel d'utilisation pour ce problème des systèmes de tri électrostatique, techniques magnétiques [52] ou de tri mécanique [37].

L'état de l'art des procédés séparatifs particuliers est divisé en une revue des technologies de criblage/tamassage, gravimétriques, et des technologies physico-chimiques.

Les principaux types de cribleurs sont présentés : les cribleuses proprement dites (particules entraînées le long d'une surface cribante), les cribleuses Flip-Flop, tamiseuses industrielles (de géométrie généralement ronde et évacuant le matériau grossier par la périphérie), les cribles à tambours (ou Trommel). Les différents points importants dans le choix d'un cribleur pour le défillérisation sont passés en revue : le choix de la surface criblante, la vibration et la direction de la vibration, le mouvement de nutation, les ultra-sons et les systèmes de décolmatage. Enfin, des exemples industries sont présentés.

La deuxième grande famille d'équipement destiné au tri par taille à sec, les classificateurs à air, est présentée dans le contexte plus large des technologies gravimétriques. Les principaux principes physiques sont détaillés : la sédimentation, le plan incliné, la jetée des particules, le cylindre classificateur, le frottement différencié, la jig, la table vibrante, la séparation à courant gazeux (élutriation). Dans le cas des classificateurs potentiellement destinés à la défillérisation, on analyse les principes pouvant amplifier la classification dans un courant gazeux : le flux à contre-courant ou courant tangentiel (cyclonage), la centrifugation introduite par des coudes ou défecteurs, la dispersion et la centrifugation introduites par des pales en mouvement (séparateurs dynamiques).

Enfin, les autres familles de séparation, avec un potentiel prospectif d'utilisation pour le problème de la défillérisation, sont présentés : tri automatisé (avec les différents techniques d'imagerie disponibles, Laser, Rayon X, Thermique, Infrarouge, Optique, Radar, TetraHertz, Fluorescence, Raman), le tri magnétique ou électrique (ou électrostatique).

Le document fini par une revue de certains documents de synthèse portant sur les équipements industriels destinés à la défillérisation des sables de carrière, puis par une conclusion analysant de manière croisées les différentes informations.



## *Table des Matières*

1. Contexte et enjeux .....	9
2. Criblage / Tamisage .....	12
2.1 Type de surfaces de cribleurs .....	13
2.2 Cribleurs vibrants .....	13
2.3 Cribleurs à ultra-sons.....	17
2.4 Cribles Flip-flop (ou à effet trampoline).....	18
2.5 Tamiseuses à nutation (« trumbler screening »).....	18
2.6 Crible à tambour (Trommel).....	19
2.7 Systèmes de décolmatage.....	20
2.8 Exemples industriels.....	21
3. Technologies gravimétriques .....	24
3.1 Principes de l'utilisation du champ de pesanteur .....	24
3.1a Sédimentation/Décantation .....	24
3.1b Plan incliné .....	24
3.1c Jetés de particules / cylindre classificateur .....	25
3.1d Frottement différencié .....	27
3.2 Séparation à courant gazeux.....	27
3.2a Elutriation / Lit fluidisé .....	28
3.2b Centrifugation / cyclonage .....	29
3.2c Contraintes transverses : coudes.....	30
3.2d Contraintes transverses : déflecteurs .....	32
3.2e Contraintes transverses : pales en rotation .....	32
3.2f Entraînement de l'air .....	33
3.2g Exemples industriels.....	33

3.2h Exemples d'évaluation .....	38
3.3 Méthodes de tri densimétrique .....	40
3.3a Jig .....	42
3.3b Table vibrante.....	43
3.3c Flux à contre-courant ou courant croisé .....	44
4. Technologies physico-chimiques.....	45
4.1 Tri automatisé .....	45
4.1a Dual Energy X- rayon transmission.....	46
4.1b Fluorescence induite par laser .....	47
4.1c Spectroscopie sur plasma induit par laser (LIBS).....	47
4.1d Spectrométrie de fluorescence X.....	48
4.1e Technologie du capteur visuel.....	49
4.1f Imageries thermiques .....	50
4.1g Spectroscopie proche infrarouge .....	50
4.1h Technologie du TéraHertz .....	50
4.1i Technologie du radar.....	51
4.1j La télédétection par laser.....	51
4.1k Spectroscopie Raman .....	51
4.2 Séparation magnétique .....	52
4.3 Séparation électrique .....	52
5. Avis dans d'autres documents de synthèse .....	54
6. Conclusion .....	57

## 1. Contexte et enjeux

Les déchets de Construction et de Démolition (C&D) constituent une voie d'avenir dans le cadre du **recyclage** dit « **noble** » des matériaux du génie civil. Il s'oppose à un recyclage brutal de ces matériaux dans les sous-couches des chaussées pour lesquels d'autres voies sont imaginées. La construction d'un bâtiment à partir d'un granulats de béton recyclé doit permettre une économie de matière première, et donc une valeur ajoutée environnementale supérieure à la construction d'un bâtiment à partir d'un béton hydraulique issu de la chaîne de production classique (extraction → cimenterie → centrale à béton → mise en œuvre de l'ouvrage).

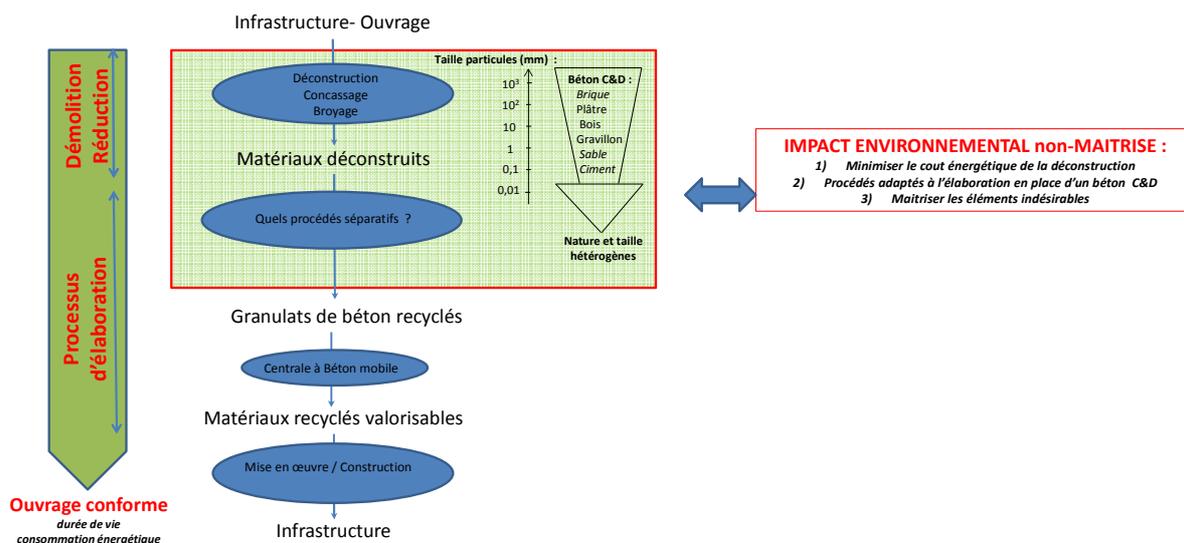
Les **procédés d'élaboration du béton** et la **durée de vie de l'infrastructure** contribue à l'**impact environnemental global**. L'enjeu du recyclage des matériaux de construction réside dans la maîtrise de cet impact environnemental global dont on souhaite, au même titre qu'une chaîne de production classique, maîtriser l'ensemble des processus.

La Figure 1 résume les problématiques environnementales et technologiques toutes deux fortement interdépendantes. La chaîne de valorisation des déchets de construction et de démolition passe par une succession de processus dont :

- Une phase de réduction de la matière (démolition, concassage, broyage)
- Une phase liée au processus d'élaboration comprenant des procédés intermédiaires. Ils visent un traitement des granulats de béton recyclé comprenant des procédés séparatifs.

C'est sur ce dernier point que porte le présent rapport puisqu'il constitue l'un des verrous technologique et environnemental de la chaîne de valorisation des déchets de construction et de démolition. En effet, l'**hétérogénéité** en termes de **nature et de taille des matériaux déconstruits** détermine le choix des **procédés séparatifs**. Ces derniers représenteraient un surcoût économique non-négligeable dans le cadre de l'investissement d'une **plateforme de recyclage de C&D en place**.

Une attention particulière est portée dans ce rapport aux procédés par voie sèche permettant une séparation des classes granulométriques les plus fines.



**Figure 1.** Chaîne de valorisation des déchets de construction. Les procédés d'élaboration en place passent par l'identification d'une nouvelle classe de procédés intermédiaires de type séparatif dont on souhaite maîtriser les verrous technologiques et environnementaux

Dans le sens strict, la taille de coupure des fines de carrière est  $63 \mu\text{m}$ . Actuellement, la chaîne de production en carrière des granulats issus du recyclage comprend deux à trois étapes de concassage, une étape de lavage des éléments fins et plusieurs étapes de tri par classe granulométrique. Considéré comme un déchet, les classes les plus fines sont acheminées vers des bassins de décantation qui desservent des boues en grande quantité devenant une contrainte environnementale.

La défillérisation à sec, où la séparation de la fraction inférieure à  $63 \mu\text{m}$  sans lavage, est une opération réputée peu efficace. Dans les conditions actuelles, un sable 0/4 concassé avec une teneur en fines de 15 à 30% garderait 7 à 12% après une défillérisation à sec, alors qu'il contiendrait moins de 7% après une opération de lavage [58].

Aussi, à la différence des sables alluvionnaires, dont les fines ont majoritairement une taille inférieure à  $20 \mu\text{m}$ , les sables issus du concassage du béton comme d'ailleurs les sables concassés en général, contiennent une proportion importante de particules de taille entre 20 et  $63 \mu\text{m}$ . Cette caractéristique complexifie leur séparation et explique la meilleure efficacité des opérations de séparation des fines pour les sables alluvionnaires en comparaison des sables concassés.

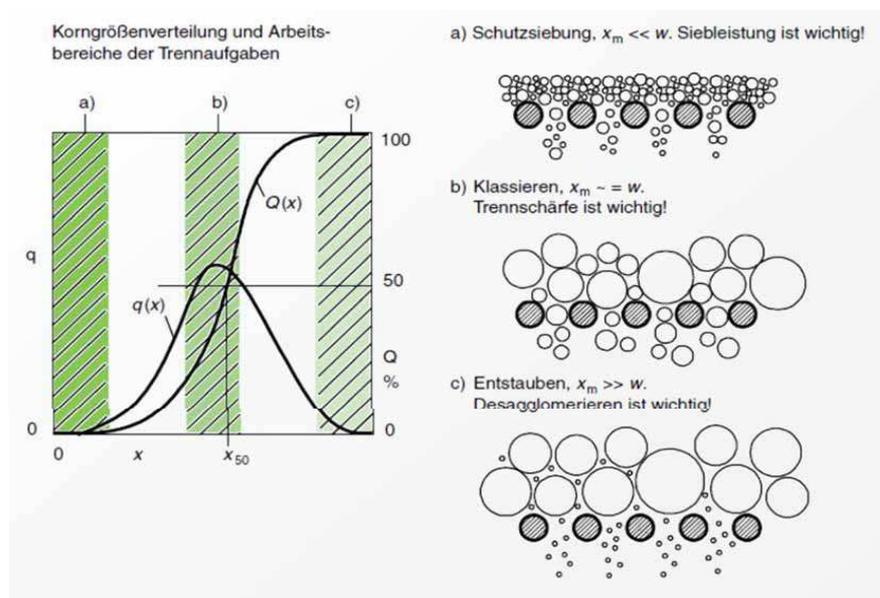
L'objectif du travail est de réaliser un état de l'art des technologies de séparation par voie sèche de milieux granulaires. On inscrit ce travail dans un contexte plus large que la stricte défillérisation à sec, en visant des tailles de coupure plus grande que les 63  $\mu\text{m}$ , mais restant sous millimétriques. Dans l'esprit d'un regard plus large, nous donnons aussi un aperçu de principes de séparation qui ne sont pas traditionnels dans le génie civil. En effet, les fines issues du concassage du béton ne se différencient pas seulement par la taille des particules plus grossières mais aussi par leur composition. Ceci pourrait créer les prémisses des méthodes de défillérisation non envisagées à ce jour.

La plupart des industries (chimiques, agroalimentaires etc.) utilisent des procédés séparatifs en vue de séparer des molécules d'intérêts ou des micro- ou nanoparticules gênantes pour l'organisme. D'autres industries traitant des poudres (Pharmacie, Cosmétologie etc.) ont recours aux procédés séparatifs après des étapes de granulation par exemple. L'industrie minière est également concernée par le tri dont l'efficacité est déterminante à la ségrégation de ressources minérales à fortes valeur ajoutée (platine, or,...). Nous les présentons ici classées en trois catégories : méthodes de séparation par taille, méthodes densimétriques et méthodes physico-chimiques.

## 2. Criblage / Tamisage

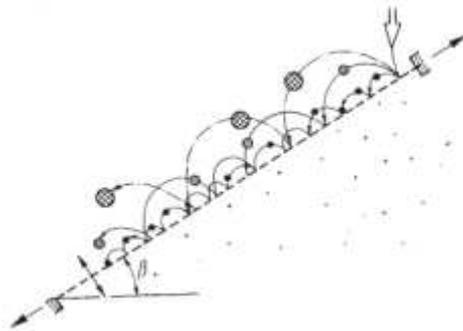
Le moyen de séparation des fines le plus direct est la séparation par taille. On réserve en général le terme de criblage à la séparation grossière (taille de coupure supérieure à quelques millimètres voir centimétrique), et le terme de tamisage à la séparation plus fine (jusqu'au micron).

Les principales applications de l'opération de criblage dépendent de la relation entre la taille moyenne des particules et la taille de l'ouverture du tamis (taille de coupure) [31]. Suivant ce critère (Figure 2) on peut distinguer entre le criblage de protection (particules plus fines que la taille de la maille), le criblage de classification (particules de l'ordre de grandeur de la taille de la maille) et le dépoussiérage (particules plus grossières que la taille de la maille). Pour l'opération de dépoussiérage l'accent est à mettre sur la capacité à de-agglomérer les particules fines qu'il convient de séparer. La séparation des fines (défillérisation) des granulats recyclés fait partie de cette dernière catégorie.



**Figure 2.** Distribution des tailles granulaires  $x_m$  et zone de travail de l'opération de séparation par criblage a) Criblage de protection,  $x_m \ll w$ . Importance de la performance du crible, b) Criblage de Classification,  $x_m \approx w$ . Importance du degré de sélectivité, c) dépoussiérage,  $x_m \gg w$ . Importance de la de-agglomération [44]

Pour le criblage, les particules sont entraînées le long d'une surface cribante (que nous allons aussi appeler par facilité « crible »), par exemple en s'écoulant sur le crible incliné. Dans le cas d'un criblage de classification ou de dépoussiérage, l'écoulement se fait en couche fine permettant ainsi aux particules plus grosses de bondir plus lors de l'écoulement [28] (voir aussi la Figure 6). Les particules les plus fines peuvent plus facilement être piégées par l'irrégularité de la surface criblante. Ceci favorise leur passage éventuel dans les ouvertures du crible (Figure 3).



**Figure 3.** Représentation schématique du mouvement du matériau lors du criblage en couche fine, ici avec un crible vibré [27]

Pour étendre le criblage à sec à la séparation des matériaux difficiles à séparer, et notamment des fines, il faut optimiser la configuration des cribles et des mailles, le choix des matériaux des surfaces criblantes, les procédés d'accélération du nettoyage, la déformabilité et la mobilité des éléments mécaniques [31].

## 2.1 Type de surfaces de cribleurs

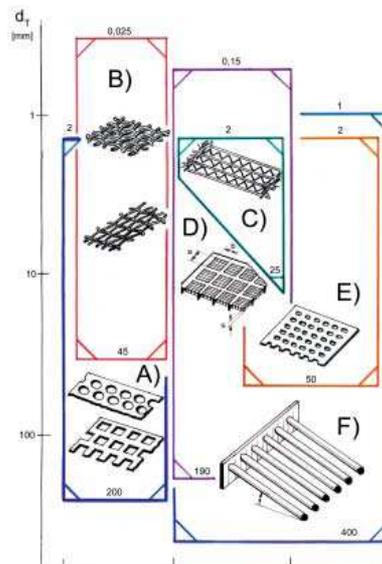
La Figure 4 présente le choix des cribleurs en fonction des propriétés d'écoulement du matériau, non-cohésif, cohésif / humide et très cohésif [27]. La figure montre aussi les plages de taille de coupe pour les différents cribles. Pour une taille de coupure inférieure à 150  $\mu\text{m}$ , pouvant aller jusqu'à 25  $\mu\text{m}$ , l'auteur recommande seulement les cribles métalliques tissés.

Le choix du matériau composant le constant surfaces criblantes, flexibles (caoutchouc, élastomères ...) ou métalliques, est valable surtout pour séparer des matériaux secs. Lorsque le matériau à séparer se trouve à une humidité intermédiaire (quelques pourcents), les surfaces criblantes flexibles devient plus efficaces que celles métalliques (Figure 5).

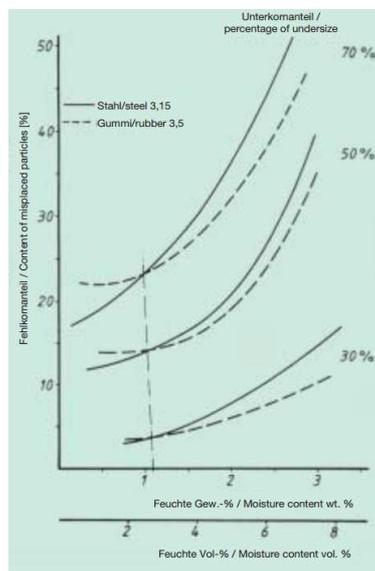
## 2.2 Cribleurs vibrants

L'opération de criblage peut être facilitée par une excitation des cribles. Ces cribles à vibration possèdent un ou plusieurs moteurs qui travaillent ensemble dans un mouvement oscillatoire elliptique [30] ayant deux objectifs : empêcher le colmatage des cribles et augmenter les rendements, notamment assurant un meilleur (plus rapide) écoulement des matières sur le crible [28].

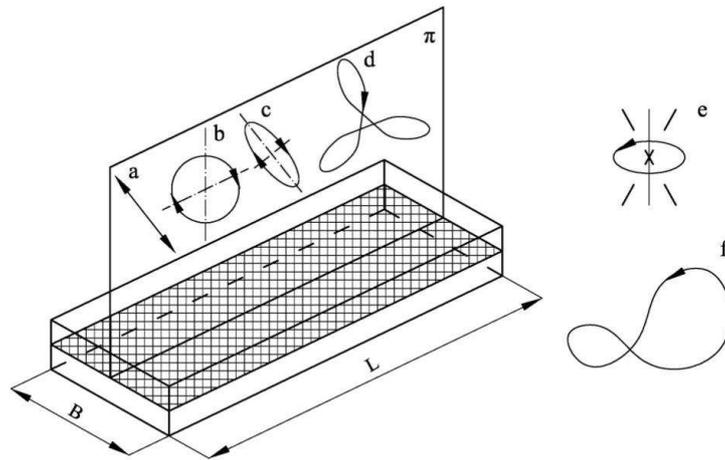
Parmi les nombreux types de cribles vibrants, on peut citer ceux à vibrations à mouvement linéaire sinusoïdale, à mouvement circulaire ou elliptique permettant l'obtention d'une variabilité des accélérations et une augmentation de la performance, ou encore à mouvement giratoire. Des mouvements encore plus complexes peuvent être proposés (Figure 6).



**Figure 4.** Revue du type de cribles (surface et mailles) pour diverses propriétés du matériau à cribler, simples à écouler (à gauche), cohésif et humide (au centre) et colmatants (à droite) et de la taille de coupe ( $d_T$  sur a figure) : A) en plaques d'acier perforées, B) en acier tissé, C) type harpe, D) en plaques de caoutchouc ou polyuréthane perforées, E) en caoutchouc ou polyuréthane tissé, F) à tiges (Grizzly)



**Figure 5.** Pourcentage de particules mal séparées dans l'écoulement sur la surface criblante, en fonction de l'humidité du matériau et du type de la surface criblante caoutchouc ou métalliques [29]



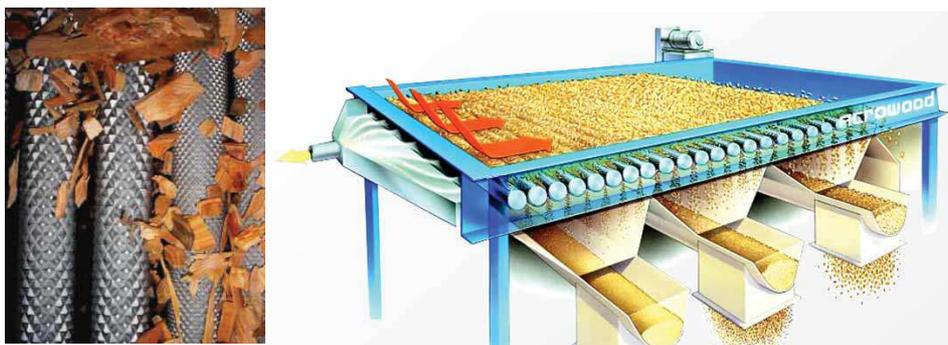
**Figure 6.** Trajectoires de la surface criblante : a) linéaire, b) circulaire, c) elliptique, d) complexe à double fréquence, e) mouvement giratoire (dans le plan de la surface criblante), f) mouvement spatial non-linéaire [2]

Siebguteigenschaften		I) nicht fließend	II) kohäsiv	III) nicht fließend
A)	a)			
	b)			
B)				
C)				

**Figure 7.** Le procédé de criblage pour des matériaux simples à écouler (I), cohésif (II) et ne pouvant pas s'écouler (III) : A. Crible à vibration verticale (a – en couche épaisse, b – en couche mince), B. Crible à vibration horizontale, C. Crible à tiges (Grizzly) ; F représente l'amplitude de la force à appliquer au cribles [29]

L'objectif des vibrations dans un plan vertical, dont la direction peut avoir un certain angle avec le plan du crible, est d'augmenter les accélérations des particules lors de l'écoulement (Figure 3). Dans le cas du mouvement giratoire, la force centrifuge créée par le mouvement circulaire du sommet du tamis rejette vers la périphérie les particules plus grossières, laissant bien dégagées les ouvertures de la partie centrale dans lesquelles tombent les matières plus fines.

Les forces de vibration (notées  $F$  dans la Figure 7) nécessaires à la séparation des matériaux cohésifs, peuvent être plus faibles pour les cribles à mouvement giratoire que pour celles à mouvement vertical. De plus, les cribles giratoires couvrent mieux les applications pour la séparation de matériaux cohésifs (comme par exemple des matériaux recyclés très fins ou légèrement humides), en limite, pouvant aussi être utilisées pour de matériaux faiblement colmatants. Les matériaux très colmatants (comme par exemple des granulats recyclés fins fortement mouillés), ne peuvent être traités que par des cribles à tiges, mais ceux-ci étant limités à des tailles de coupure supérieures au millimètre (voir Figure 4). Un exemple rependu d'utilisation de ce dernier type est le cas des sciures (Figure 8). Pour ce type d'équipement les tiges tournent dans le même sens. La texture et l'espace entre les tiges déterminent les tailles de coupure et leur précision.



**Figure 8.** *Diamond rolls screen, Acrowood [59]*

Le niveau d'accélération des particules sur la surface criblante est un critère primordial pour fixer le niveau de la taille de coupure du crible, mais aussi sa capacité à desagglomérer les particules fines [27], [54]. La Figure 9 présente les valeurs  $K_v$  en fonction de la taille de coupure. Le paramètre  $K_v$  [21] représente le ratio entre l'accélération verticale de la surface de criblage et l'accélération gravitationnelle.

Alors que les cribles vibrantes en plan vertical a couche épaisse fonctionnent à des niveaux d'accélération inférieurs à 10g, en couches mince le niveau d'accélération peut être augmenté à 30g.

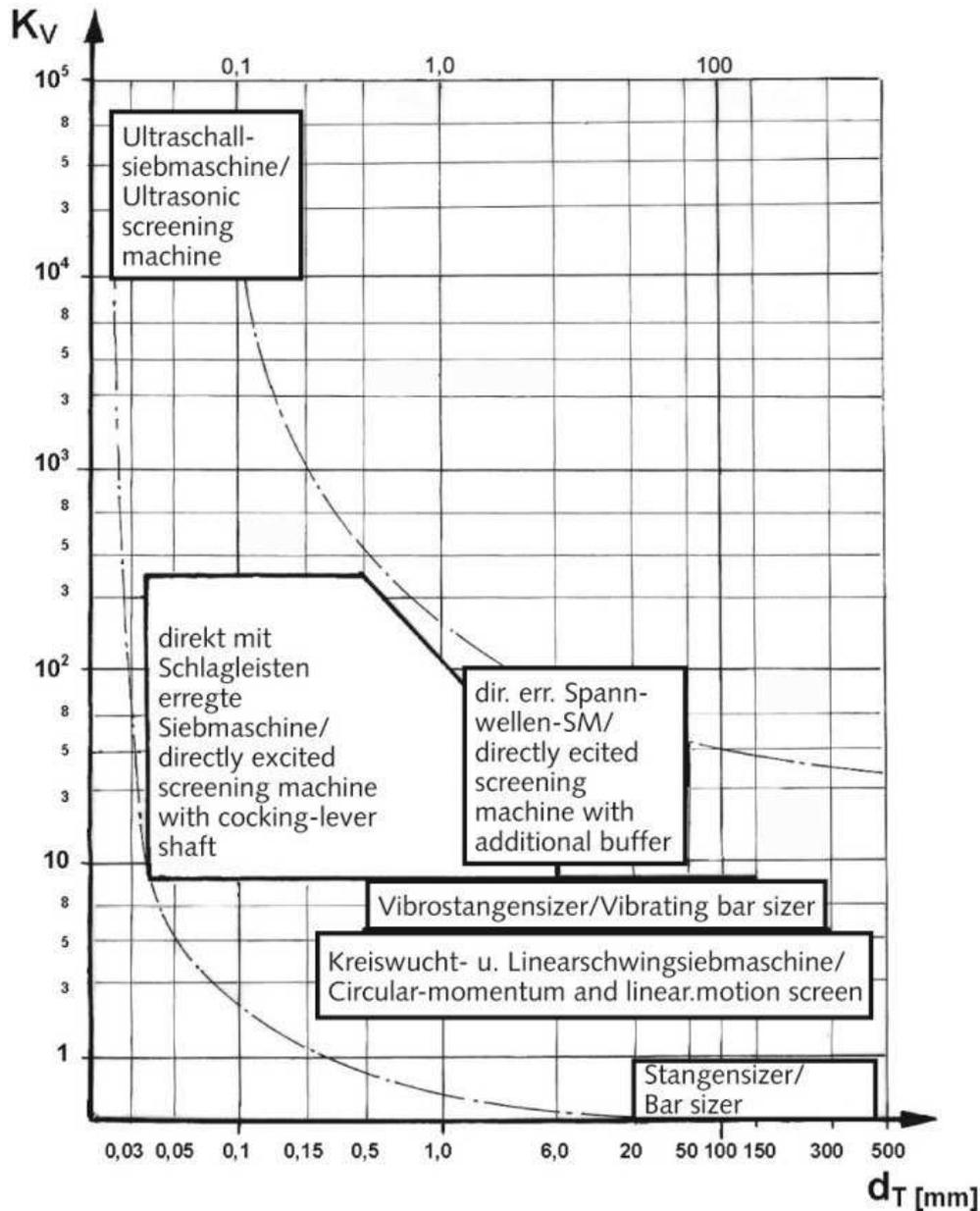


Figure 9. *Domaine de fonctionnement des cribles, accélération verticale en fonction de la taille de coupe [28]*

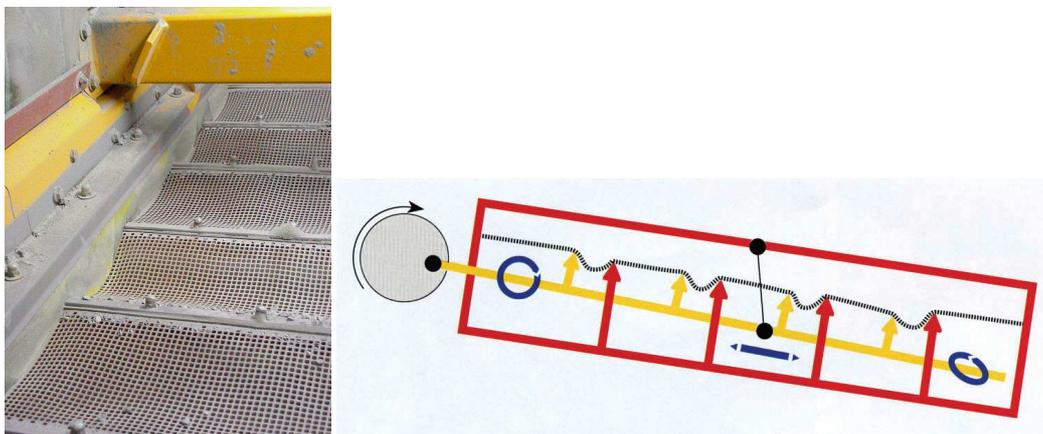
### 2.3 Cribleurs à ultra-sons

Pour de nombreuses applications de classification des poudres, les cribleurs améliorent leur taille de coupe par l'utilisation des ultra-sons [27]. On obtient de cette manière une augmentation très importante des forces exercées par les cribles sur les matières à séparer. Les ultra-sons sont générés par des disques piézoélectriques collés sur les surfaces criblantes puis couplés à un résonateur. Pour ces systèmes a taille de coupe peut être aussi petite que 30µm.

Les Cribleurs à ultra-sons sont parfois utilisés dans des problèmes de dépoussiérage [74] mis l'utilisation semble réservée au tamisage des poudres voir dans leur granulation.

## 2.4 Cribles Flip-flop (ou à effet trampoline)

Une autre manière d'augmenter le niveau d'accélération des particules sur la surface criblante est le système Flip-Flop [27]. Le crible FLIP-FLOP améliore le criblage des fines, et en particulier celui des produits humides ou colmatants. Les toiles flexibles sont tendues et relâchées, pour obtenir des accélérations importantes, allant à 50g [75], avec effet anti-colmatage.



**Figure 10.** Exemple de crible Flip-Flop [63]

La Figure 10 présente un système flip-flop combiné avec des mouvements de rotation verticale dans la partie haute du crible, de translation horizontale dans la partie intermédiaire et de mouvement giratoire avant la vidange du crible. Par conséquent, on favorise l'avancement du produit sur la surface criblante dans la zone d'entrée de la matière, on augmente le contact de la matière avec la surface criblante dans la partie centrale, avec une amélioration du positionnement des particules, et on retarde la sortie pour augmenter la quantité de passant avant l'évacuation des parties plus grossières.

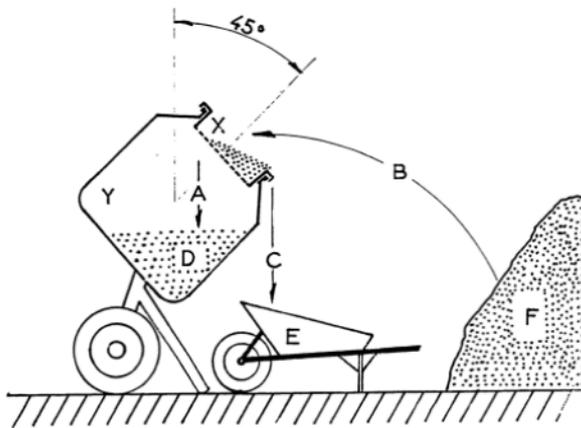
## 2.5 Tamiseuses à nutation (« tumbler screening »)

Le tamisage à nutation est considéré bien adapté au problème de la défillérisation des sables [42]. Ce système reproduit les mouvements d'un tamisage manuel, en superposant des vibrations latérales, en spirale et d'inclinaison radiale résultant dans un mouvement en spirale en 3 dimensions (Figure 11). D'après le fabricant GKM [64] spécialisé dans ce type d'équipement, le débit peut aller jusqu'à 50 t/h pour des tailles des mailles allant jusqu'à 20  $\mu\text{m}$ . Compte tenu du mouvement relativement lent, les accélérations restent faibles, inférieures à 2g.



**Figure 11.** Superposition des mouvements du tamis à nutation [60]

Le mouvement en spirale libère le centre du tamis de particules plus grossières, permettant un passage plus aisé par les mailles du tamis aux particules plus fines. Les particules grossières sont évacuées une fois arrivées à la périphérie du tamis.

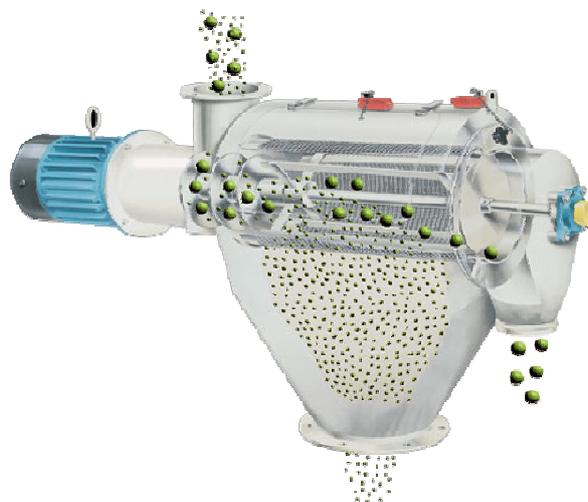


**Figure 12.** Utilisation d'un dispositif semi-automatique pour tamiser des agrégats sur chantier [5]

Un dispositif semi-automatique pour tamiser des agrégats sur chantier utilise le mouvement de la bétonnière pour faciliter le tamisage par un système similaire à un mouvement de nutation (Figure 12).

## 2.6 Crible à tambour (Trommel)

Une alternative à la surface criblante plane est le crible à tambour. Une fois introduit dans le crible en forme de tambour, le matériau est soulevé vers le haut par la rotation et aéré pendant qu'il retombe. Cette action est répétée pour chaque rotation du tambour. Les fines traversent les ouvertures du crible tandis que le matériau plus grossier avance vers la sortie du tambour.



**Figure 13.** Crible centrifuge [65]

Plusieurs brevets proposent l'utilisation directe du trommel pour séparer des éléments fin, mais ces utilisations semblent limités à séparer des éléments de taille bien plus importante que celles des éléments fins (par exemple [8], [57], [51], [25]).

Une manière d'accélérer le criblage est l'utilisation des pales en rotation à l'intérieur du tambour (Figure 13). Ces pales projettent la matière sur la surface criblante accentuant le passage des éléments fins à travers les mailles. La force centrifuge aide également à l'efficacité du tamisage.

Outre le rôle dans le tamisage, les pales aident à nettoyer la surface criblante et à détruire les agglomérats des particules fines.

## 2.7 Systèmes de décolmatage

Lorsque le déplacement de la matière ne se fait pas dans un plan horizontal mais celle-ci est projetés verticalement, les granulats trop gros ou des particules plus fines agglomérées risquent de se coincer dans les mailles. Divers systèmes de décolmatage mécaniques utilisant des billes, des anneaux (Figure 14 gauche) ou des brosses (Figure 14 centre) peuvent aider à déloger les particules ou les agglomérats d'entre les mailles. Ces systèmes sont adaptés aux tamis verticaux, donc à ceux n'entraînant pas la matière à séparer le long de la surface criblante. Pour les cribles du type de ceux schématisés dans la Figure 3, un système de décolmatage mécanique intéressant est celui des billes situées sous le crible entraînées verticalement pour décolmater les mailles (Figure 14 droite).



**Figure 14.** Systèmes de décolmatage mécanique : (gauche) utilisant des billes ou des anneaux sur la surface criblante [72], (centre) utilisant des brosses [60], (droite) utilisant des billes positionnées sous la surface criblante [71]

Une alternative aux systèmes de décolmatage mécanique, s'adressant en particulier aux matériaux fins, est d'associer au tamisage un passage d'air. Un premier exemple, Figure 15 gauche, est un système d'aspiration permettant d'entraîner les petites particules par les mailles. Ce type d'équipement a généralement un débit réduit et s'adresse plus particulièrement à l'analyse granulométrique. Un deuxième exemple, Figure 15 centre, envoie des jets d'air à haute pression par l'intermédiaire de bras se déplaçant au-dessus des mailles. Ces jets d'air délogent les particules colmatant les mailles. Ce système s'adresse plus particulièrement aux produits fortement

agglomérés. Lorsque l'agglomération est produite par un léger taux d'humidité, le décolmatage et le tamisage des éléments fins peuvent être favorisés pour un chauffage des mailles [14].

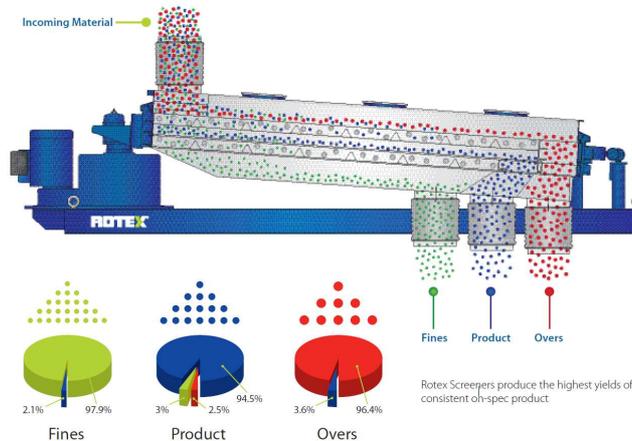
Enfin, un système de décolmatage s'adressant particulièrement aux maillages fins, tailles de coupure de 20 à 1000 µm, est le système utilisant des ultrasons (Figure 15, droite).



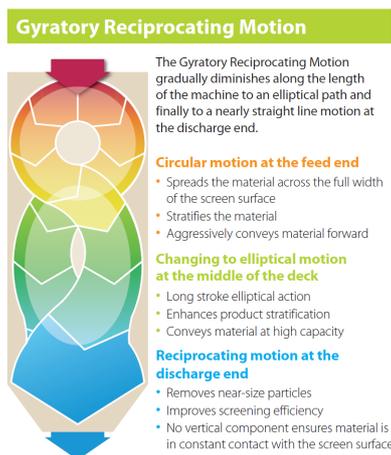
**Figure 15.** (Gauche) Systèmes de décolmatage par aspiration [66], (centre) par jets d'air sous pression [60] et (droite) par ultrasons [60]

## 2.8 Exemples industriels

La surface criblante de l'équipement Rotex (Figure 16) est en mouvement giratoire, avec une diminution de la composante elliptique vers le bas du crible (zone de sortie des matériaux) – Figure 17. Un système des billes positionné sous le crible assure le décolmatage des mailles. Suivant Blazy et al. [6] la taille de coupure sur ce type de crible vibrant pourrait se situer au-dessous de 100 µm. Parmi les défauts du système, les auteurs considèrent que le glissement des particules sur la toile est un facteur important d'usure.

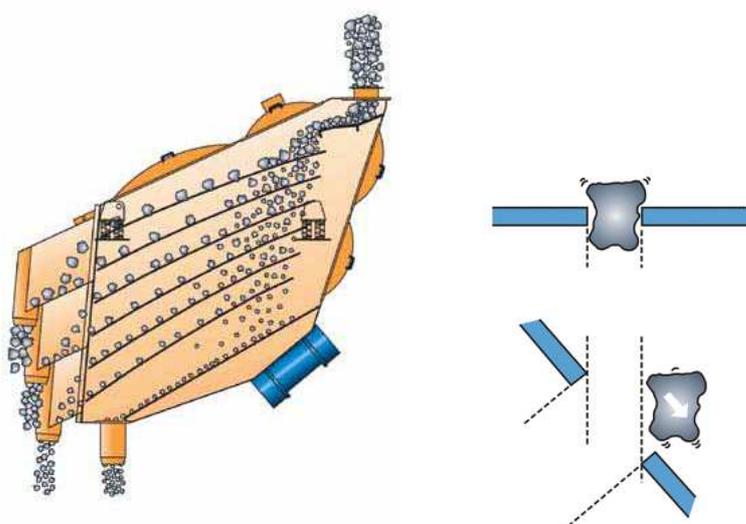


**Figure 16.** Crible Rotex et description du mouvement giratoire de la surface criblante [71]



**Figure 17.** Description du mouvement giratoire de la surface criblante [71]

Mise au point dans les années 1960 [35] le system Mogensen diminue fortement l'effet de l'usure des cribles. Ce système associe un assemblage de surfaces criblantes obliques, à un mouvement vibratoire perpendiculaire à ces surfaces. Les surfaces criblantes sont positionnées et séquencées dans la direction de la chute libre d'une veine de matériau à trier. De cette manière les particules ne forment pas un lit de matière sur la surface de criblage, seulement les particules plus grosses que la taille de maille étant déchargée dans le sens de l'inclinaison de la surface criblante. Ceci est favorisé par la chute oblique des particules sur la surface criblante. En effet, la taille de coupe est plus faible que la largeur des mailles (Figure 18) ; elle correspond à la surface projetée des ouvertures de la maille dans la direction de la trajectoire de vol des particules criblées. Ceci augmente la probabilité de passage de particules à travers la surface criblante et diminue la probabilité de colmatage des mailles. En effet, il a été montré que les particules produisant le colmatage des mailles ont une taille maximum de 1,1 fois celle de l'ouverture de la maille [50].



**Figure 18.** Le principe de fonctionnement du classificateur Mogensen [53]

Le domaine d'utilisation des cribles Mogensen est donné dans la Figure 19, suivant la taille de coupure. En effet, ce type de crible est utilisé pour la défillérisation des sables concassés (voir par exemple la référence [39] [20]). Un exemple industriel est présenté en détail par Hansen [14]. La plateforme est construite afin de pouvoir produire 100 t/h de granulats dans les fractions 0/2, 4/8, 8/11, 11/16, 16/22 et > 22 mm, avec la consigne de défillériser le sable à 100 µm, à moins de 5% en masse. Un concasseur à mâchoires produit un 0/200 mm dans une première phase. Dans une deuxième phase, le matériau est concassé à 0-45(60) mm par un concasseur à impact. Ce matériau est ensuite transporté vers la première phase de criblage. Une première surface criblante aère le matériau et le scalp à 30 mm. Les trois surfaces criblantes suivantes séparent les fractions 0/8, 8/11, 11/16 et > 16 mm. Cette dernière fraction est ré-concassée à 0/16 (22) mm et ce matériau est réintroduit dans le crible. Le crible est donc dimensionné à 200 t/h. La fraction 0/8 – 56 t/h au total – est transférée vers un deuxième équipement de criblage pour être séparée dans les fractions 0/2, 2/4 and 4/8 mm. De plus, le filler des deux plus fines fractions est enlevé. Pour pallier à l'humidité inhérente, les deux surfaces criblantes correspondantes sont équipées d'un chauffage électrique pour un chauffage à 40-50 °C. La teneur en filler obtenue sur le produit final est autour de 2 à 3% en masse.

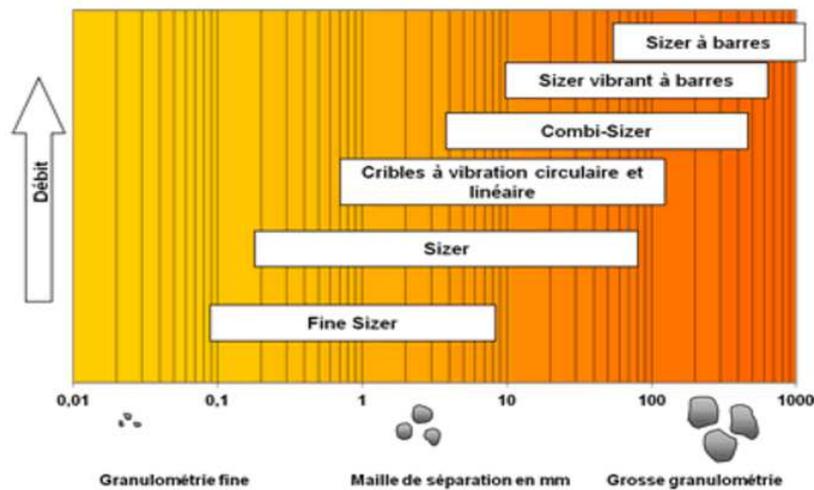


Figure 19. Domaine de séparation des cribles Mogensen [69]

### 3. Technologies gravimétriques

#### 3.1 Principes de l'utilisation du champ de pesanteur

##### 3.1a Sédimentation/Décantation

Les techniques de sédimentation gravitaires, séparent deux phases non miscibles grâce à la différence de masse volumique entre ces phases. Dans la décantation, seule intervient la gravité.

##### 3.1b Plan incliné

Une manière d'amplifier les phénomènes de séparation est d'imposer une longueur du parcours effectué par les particules sur un plan incliné à la surface duquel s'écoule par gravité un film liquide dépend de deux actions :

- la sédimentation de la particule ;
- le déplacement sur le fond.

L'un des phénomènes mis en jeu est l'alluvionnement au cours duquel les grains lourds et gros sont les premiers à rencontrer le support et peuvent se trouver piégés alors que les grains légers et fins sont emportés par le courant. Les grains qui ont atteint le support se meuvent par saltation et la vitesse d'entraînement dépend peu de leur dimension mais de la racine carrée de leur masse volumique apparente. Ainsi, les grains ayant la masse volumique la plus élevée se trouveront à la partie basse (ou intérieure s'il y a rotation) et ceux de masse volumique la plus faible, à la partie haute (ou extérieure).

La répartition résultante des grains est à l'opposé de la sédimentation libre, d'où l'appellation de **sédimentation inverse**. Deux exemples très répandus de ce type d'appareil sont illustrés dans la Figure 20, le cône Reichert et les séparateurs à spirale.

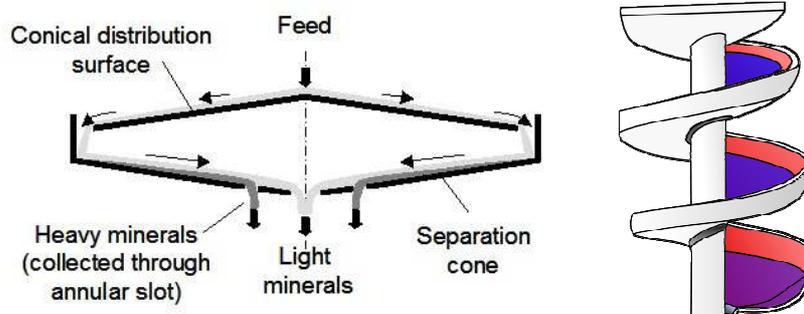
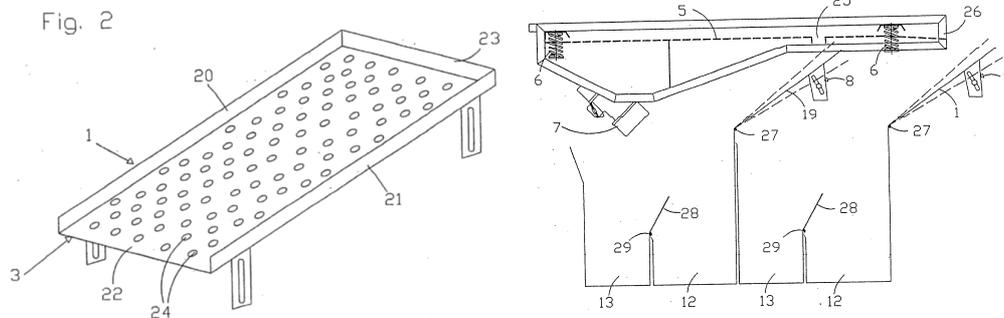


Figure 20. a) Eléments et mode opératoire du Cône Reichert [67], b) séparateur à spirale

Un exemple d'utilisation du plan incliné à sec, est donné dans la Figure 21. Le mélange coule sur une certaine longueur d'un plan incliné (1, 19) Le plan incliné est constitué d'une surface criblante, mais les particules sont recueillies sélectivement aussi après le point de décharge (3). On dispose de plusieurs unités collectrices (12, 13) pour des particules à différentes tailles.

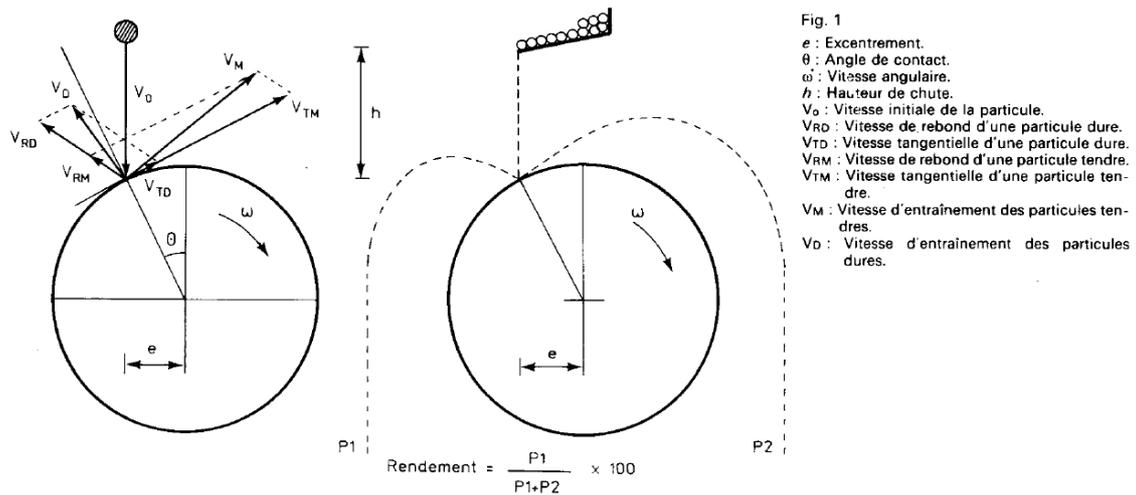


**Figure 21.** *Système de plan incliné pour séparation à sec des particules par taille [13]*

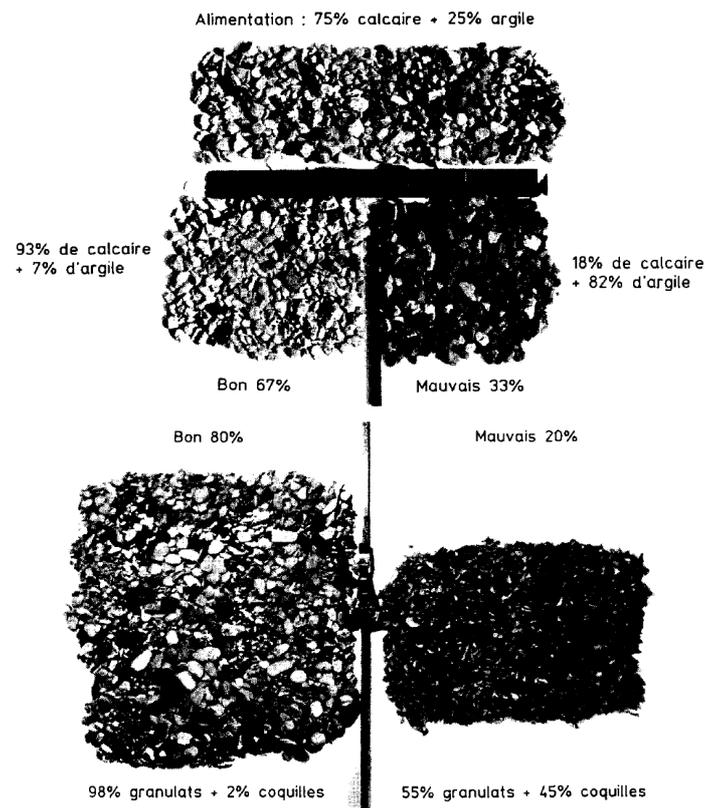
### 3.1c Jetés de particules / cylindre classificateur

Le système présenté dans la Figure 21 utilise aussi le comportement différent suivant la taille des particules à la jetée d'un plan incliné ou d'un tapis convoyeur. En effet, dans ces conditions les particules avance d'autant plus loin que leur ratio de force de frottement surfacique dans l'air et de force d'inertie est faible. Une manière de faire fructifier encore plus cette différence de comportement est l'utilisation d'un cylindre classificateur : les particules tombent sur un cylindre tournant qui remonte certaines particules ou les laissent tomber du même côté du cylindre, suivant certaines de leur propriétés ; par exemple leur densité, les propriétés de surface, voir les propriétés élastiques des particules pour des tailles plus grossières [18].

Lebas et al. [24] affirment que le cylindre classificateur pourrait être utilisé valablement pour l'élimination de certains éléments indésirables contenus dans un produit hétérogène : ainsi par exemple l'élimination des boulettes d'argiles contenues dans un produit calcaire ou la séparation des coquilles de moules au sein d'un matériau alluvionnaire. La Figure 22 présente le résultat des tests en laboratoire permettant d'évaluer l'efficacité de ce dispositif. Un dispositif de tri comprenant deux cylindres travaillant en série à un débit de 60 t/h a été implanté en Union Soviétique dans les années 1980' (projet SOYUZDORNII - Institut fédéral d'études et de recherches routières de l'URSS).



**Figure 22.** Présentation du principe d'un cylindre classificateur [24]; des résultats d'essais de laboratoire sont présentés dans la Figure 23

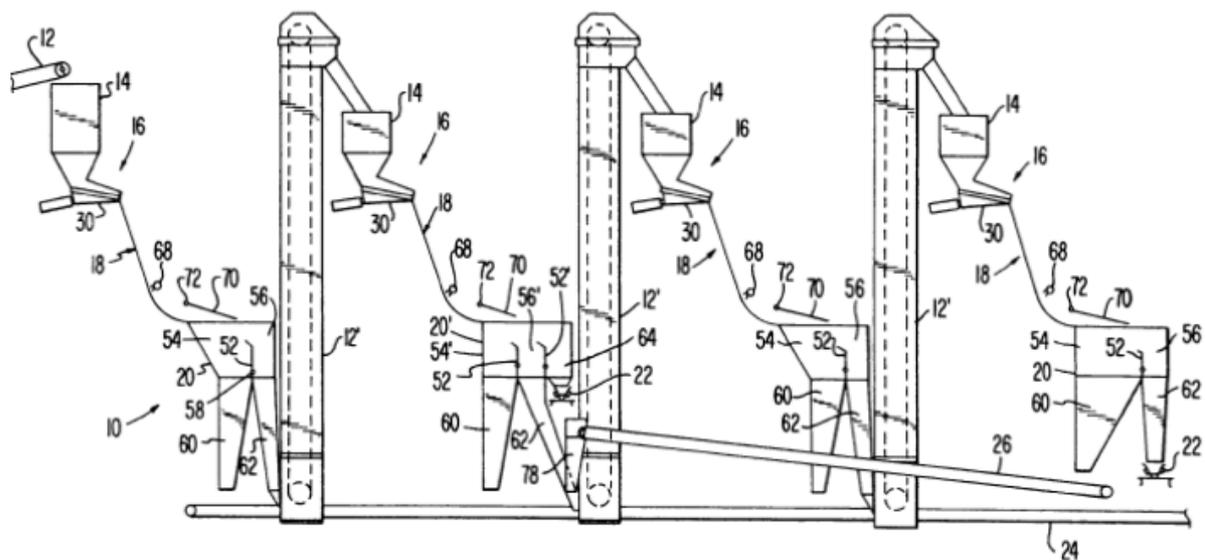


**Figure 23.** Résultats d'essais de laboratoire avec un cylindre classificateur [24]

Un système de cylindre classificateur destiné à la séparation des poudres et matériaux de fines particules de parties non-désirées est proposé dans la référence [40]. Il utilise un chargement électrostatique de la surface photoconductrice des tambours afin de retenir ou pas certaines particules sur celle-ci. Pour le même type de système voir aussi la Figure 56 dans la section 4.3.

### 3.1d Frottement différencié

D'autres possibilités de tri existent, s'appuyant sur l'exploitation directe d'autres propriétés de matériaux. L'exemple décrit en [36] est un équipement de séparation des particules solides de petite taille, suivant leur coefficient de frottement. Le mélange coule sur une surface et est dévié par une succession de déflecteurs (Figure 24).



**Figure 24.** Equipement de séparation des particules solides de petite taille, suivant leur coefficient de frottement [36]

### 3.2 Séparation à courant gazeux

Les techniques utilisant uniquement la pesanteur sont associées dans la grande majorité des cas à de la séparation en voie humide et ne concernent que très rarement la séparation à voie sèche. En vue de rendre plus efficace la séparation à sec, l'ajout de champs de force supplémentaires à la gravité est nécessaire. Une technique spécifique au cas de séparateurs par gravité à sec, consiste dans l'ajout d'un flux d'air ascendant ou latéral. Lors de l'évacuation de l'air la fraction fine est emportée tandis que la fraction grossière descend par gravité. Pour améliorer la séparation, on utilise des pièges (les riffles), des contraintes transverses et/ou la force centrifuge (Figure 25). Les zones de sélection sont généralement multipliées et les particules se séparent en deux fractions sous l'effet des changements de direction répétés et des forces de trainées correspondant à des vitesses de l'air variables.

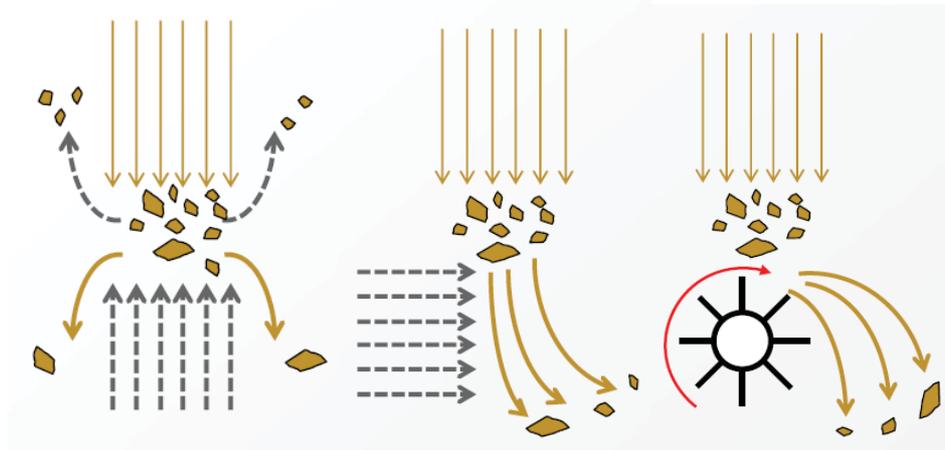


Figure 25. Courant d'air ascendant, courant d'air transversal, déviation mécanique par palettes

### 3.2a Elutriation / Lit fluidisé

De manière générale, l'élutriation sert à déterminer la taille des particules en envoyant dans une colonne un fluide à une vitesse connue dans le sens contraire de la chute des particules. Les particules en chute restent en suspension quand la vitesse du fluide est égale à la vitesse terminale des particules suite à la force de traînée. Pour utiliser ce principe à la classification par taille, le moyen classique est le lit fluidisé. Le principe est d'injecter un gaz (ou un liquide) ascendant à la base d'un mélange granulaire. Les particules sont mises en suspension et l'ensemble des particules acquièrent des propriétés spécifiques des fluides. Plusieurs régimes sont possibles (Figure 26). Enfin, le système peut être imaginé en circuit fermé (système discontinu) ou en circuit ouvert (système continu) – Figure 27.

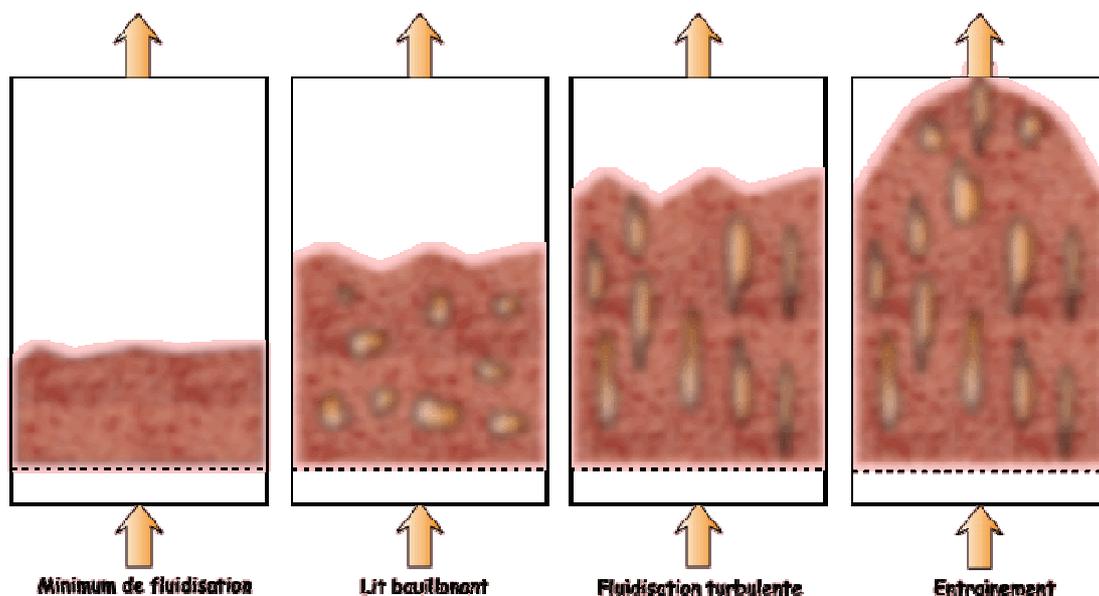


Figure 26. Régimes de fluidisation (lits fluidisés)

Il a été montré que les particules le plus fines (de l'ordre des dizaines de  $\mu\text{m}$ ) ne sont pas le plus faciles à séparer de particules poly-dispersées de silice par élutriation en lit fluidisé [7], suite aux phénomènes d'agglomération. Il s'agit en particulier de l'agglomération des fines avec les particules plus grossières [4]. Un nombre de cohésion limite (ratio entre la cohésion des particules fines et le produit entre leur taille, densité et accélération de la gravitation) semble pouvoir décrire la taille de coupe de la séparation par lit fluidisé [26]. Pour un mélange des particules fines de l'ordre de 20 à 50  $\mu\text{m}$  et des particules grossières de l'ordre de 300  $\mu\text{m}$ , le nombre de cohésion limite proposé est 4,5 [26].

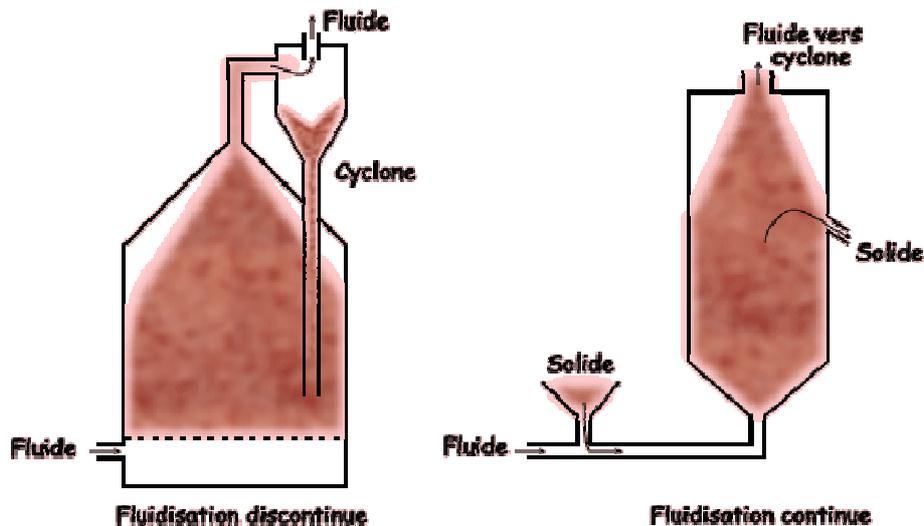
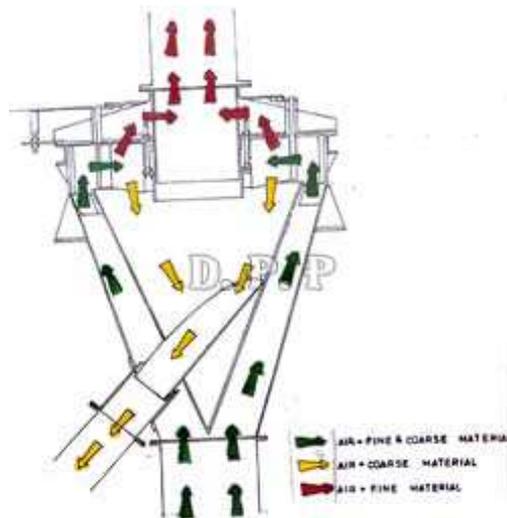


Figure 27. Lit fluidisé en système discontinu et continu

### 3.2b Centrifugation / cyclonage

Dans la centrifugation, la gravité est remplacée par la force centrifuge dont l'intensité peut-être beaucoup plus grande augmentant le champ de force et améliorant l'efficacité des séparateurs. Dans leurs versions les plus classiques, les séparateurs par centrifugation utilisent l'eau comme fluide d'entraînement des fractions granulaires à séparer. Cependant, le principe de cyclonage peut également utiliser l'air comme fluide d'entraînement (cyclone pneumatique). Le plus souvent, on combine une entrée d'air « primaire », entraînant l'ensemble du matériau à séparer dans un vortex avec un flux d'air « secondaire » ascendant, intersectant le flux « primaire » pour emporter les fines et laisser descendre les grosses particules.

Un exemple des plus simples des cyclones pneumatiques est présenté dans la Figure 28. L'air et l'ensemble de la matière sont introduites de manière ascendante (flèches vertes), la partie grossière redescend par le deuxième cône (flèches jaunes) alors que les éléments fins ressort par le haut de l'équipement (flèches rouges).

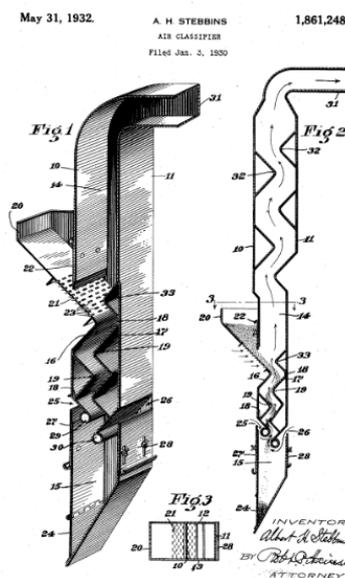


**Figure 28.** Principe du cyclonage double cône [62]

### 3.2c Contraintes transverses : coudes

L'idée d'introduire des chicanes dans le flux ascendant des lits fluidisés n'est pas récente. La Figure 29 présente un système proposé dans les années 1930.

Les lits fluidisés ont la capacité à séparer les éléments fins, même cohésifs, des sables. L'introduction de zones de circulation déviée (coudes) améliore l'efficacité de la séparation. Le résultat expérimental sur 2 systèmes de lit fluidisés (Figure 30), un vertical, l'autre en arche, est donné dans la Figure 31. La concentration des particules dans les coudes est plus grande que dans les zones verticales, ce qui est fourni comme explication pour la plus grande efficacité ce système [46].



**Figure 29.** Classificateur à air avec séparation produite par un courant d'air ascendant dans un flux de matière en chute gravitationnelle [49]

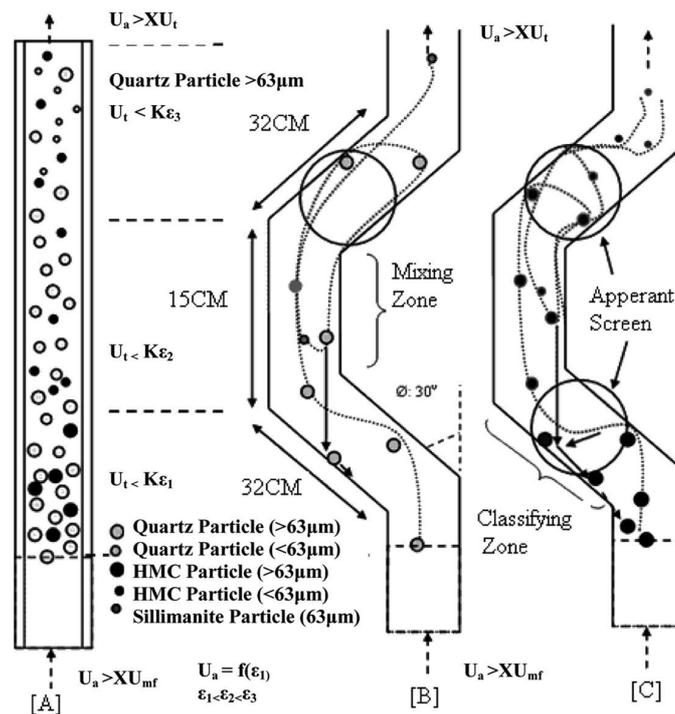


Figure 30. Classification de particules de sable en 2 géométries [46]

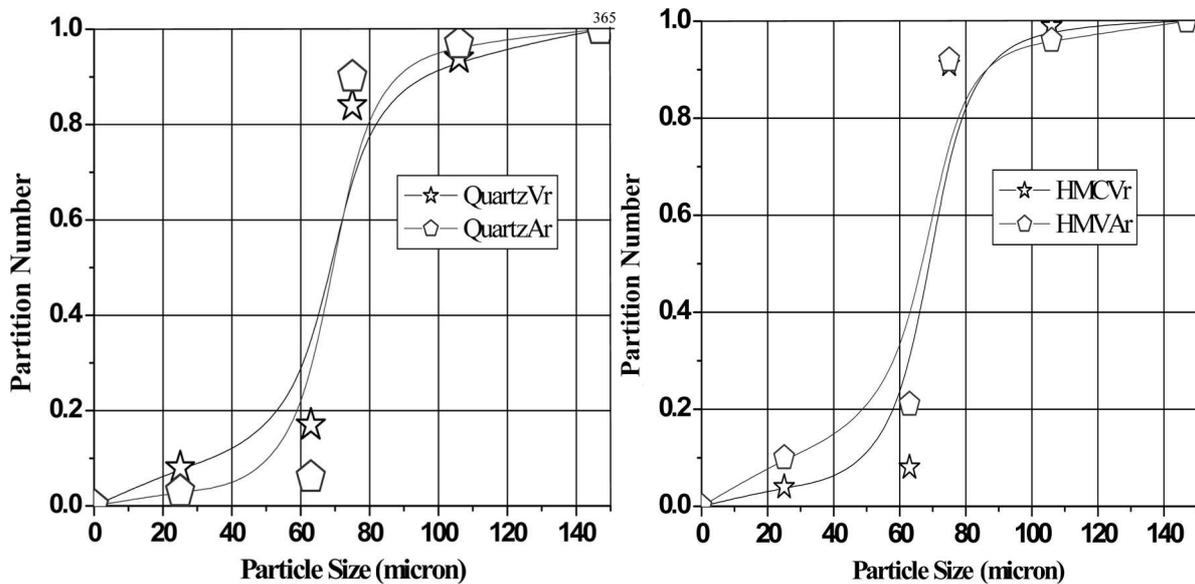
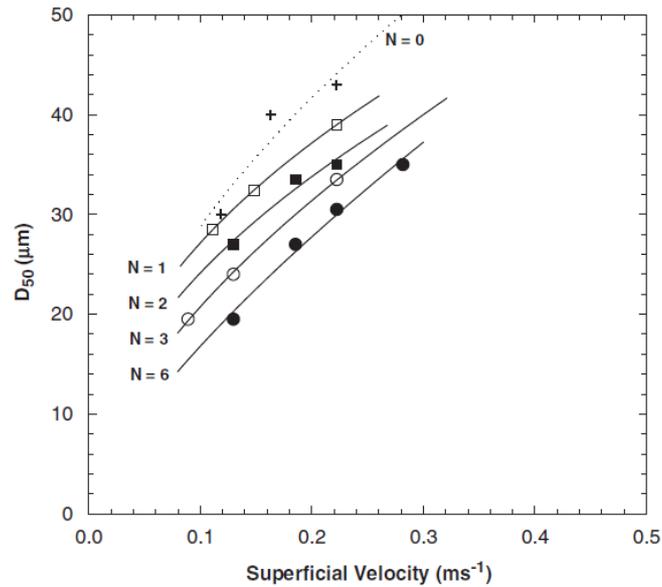


Figure 31. Efficacité de la séparation par les 2 géométries représentées dans la Figure 30 (Ar – Arche, Vr – Vertical); dans ces essais les particules de sable (quartz) sont mélangées à des particules de plus forte densité (HMC) [46]



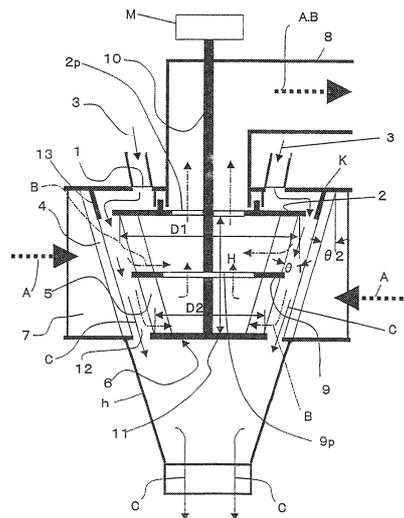
**Figure 32.** Evolution de la taille de coupure,  $D_{50}$ , versus la vitesse de surface du gaz, pour différents nombres  $N$  de canaux inclinés dans un lit fluidisé. Le lit fluidisé conventionnel correspond aux données ( $N = 0$ ) [85]

### 3.2d Contraintes transverses : déflecteurs

Une manière d'augmenter les forces centrifuge est d'obstruer le flux de la matière par des déflecteurs. Leur rôle est d'induire des trajectoires à faible rayon de courbure (donc fortes forces centrifuges). La présence des déflecteurs produit une augmentation significative de zones de sédimentation du classificateur [50]. L'introduction de un ou plusieurs déflecteurs a un effet dans le changement de la taille de coupure du système. Par exemple, la Figure 32 montre l'effet de l'introduction de 1 à 6 déflecteurs parallèles sur la relation entre la taille de coupure et la vitesse ascendante de l'air dans un lit fluidisé.

### 3.2e Contraintes transverses : pales en rotation

Une manière « dynamique » d'augmenter les forces centrifuge est d'inclure un système d'agitation obstruant le flux de la matière (voir un exemple dans le Figure 33). Le rôle des pales en rotation est non seulement d'induire des trajectoires à faible rayon de courbure (donc fortes forces centrifuges) mais aussi de disperser les particules ayant tendance à l'agglomération.



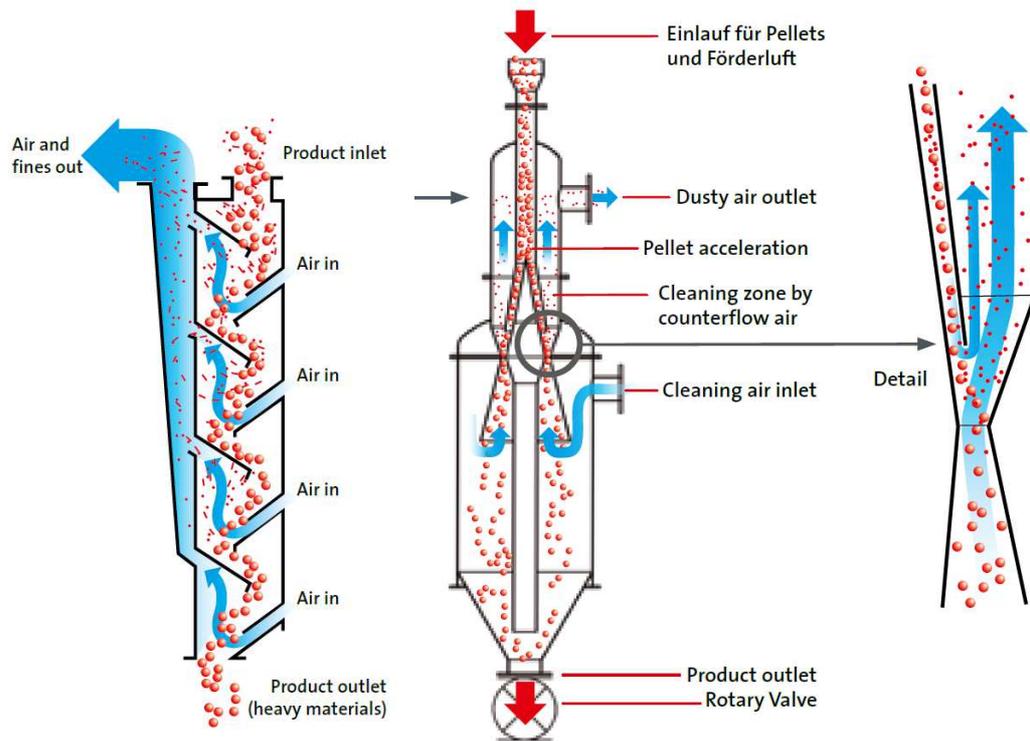
**Figure 33.** *Classificateur centrifuge content un disperser [19]*

### 3.2f Entraînement de l'air

Alors que des premières versions de classificateurs à air utilisaient des systèmes aspirations les systèmes les plus courants actuels utilise de l'air introduit à pression, en général en contre-courant ou de manière transversale à l'entrée des matériaux (Figure 34).

### 3.2g Exemples industriels

Plusieurs exemples d'équipements destinés à au dépoussiérage des granulés en bois sont présentés dans la Figure 35. Un de ces équipements (à gauche) a été testé avec des bons résultats jusqu'à un débit de 5t/h. Malgré la complexité et la variété des classificateurs à air, les principes physiques les régissant résident toujours dans l'équilibre des forces gravitationnelles, centrifuges et de traînée. Pour un même équipement, les deux variables du procédé, débit de la matière et débit de l'air, seront différentes d'un type de matière à un autre, suivant la densité, la forme, la taille et la surface spécifique des particules. La géométrie des équipements peut également être un facteur de réglage du procédé, comme par exemple l'inclinaison des certains déflecteurs ou la vitesse de rotation d'organes en mouvement.



**Figure 34.** *Système Aspirateur et Elutriateur [70]*

Une classification des équipements (ou des certaines de leur zones) peut se faire suivant la direction du mouvement d'air par rapport à celui de la matière et par l'ampleur des forces centrifuges (Figure 36). D'après les auteurs [45] les classificateurs gravitationnels à contre-courant sont à utiliser pour séparer des matières avec des différences de taille significatives (particules de 1 à 10 mm contaminées par des particules de 100 à 200  $\mu\text{m}$ ). Les classificateurs gravitationnels à courant transversal ont une efficacité plus modeste, et sont plus utilisés pour la séparation par densité. Une augmentation de l'efficacité est obtenue par l'utilisation des classificateurs en zigzag (Figure 37a). Pour ce type la taille de coupure peut descendre à 100  $\mu\text{m}$  et le débit peut monter à 10 t/h. Cependant, comme pour le système à étages (Figure 37b), la perte de charge est très grande. Le système à balayage horizontal (Figure 37c) présente l'avantage d'éliminer les collisions entre particules. Sur ce système on peut espérer des débits plus élevés avec un niveau plus bas de la perte de charge.

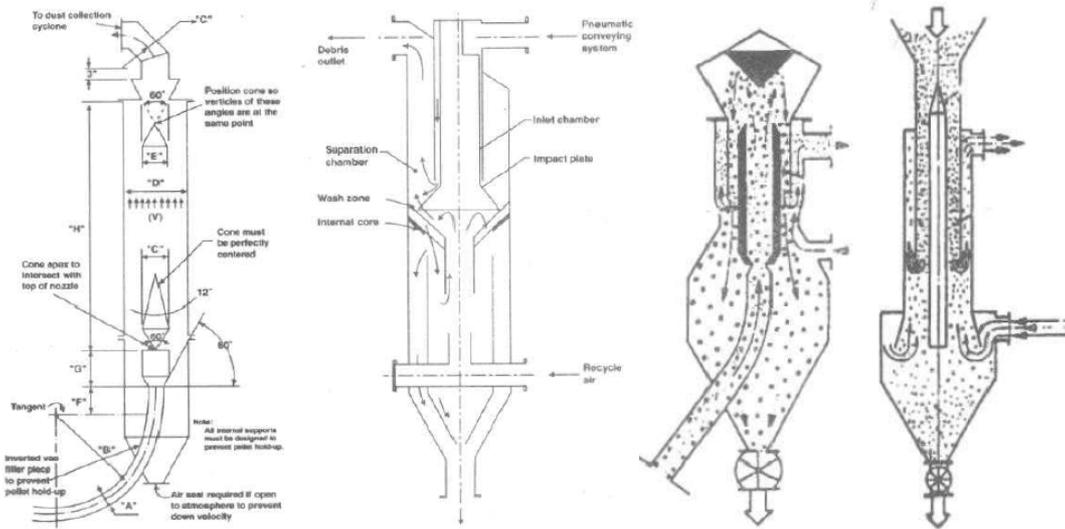


Figure 35. Equipements destinés à au dépoussiérage des granulés [15]

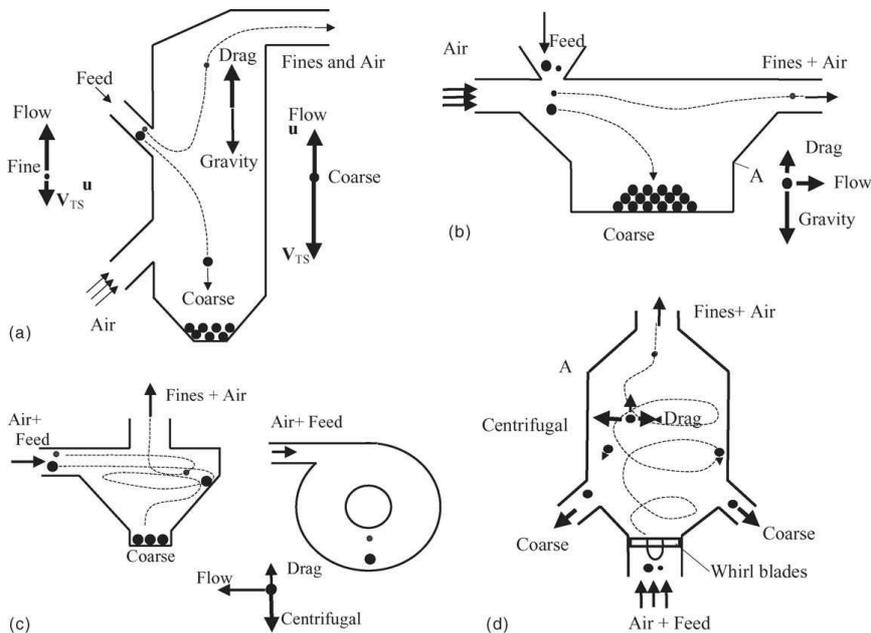
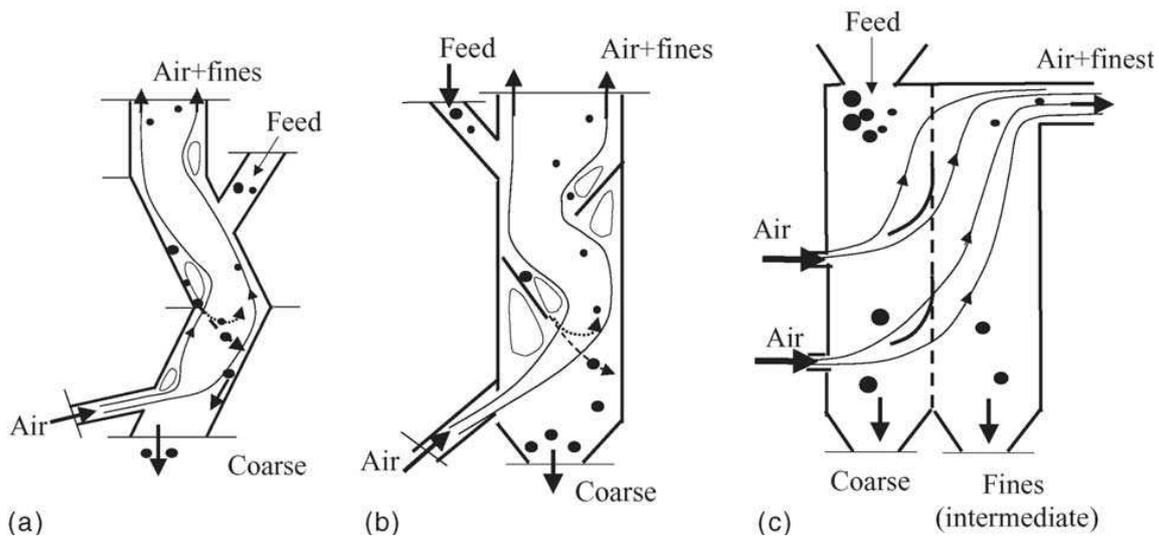


Figure 36. Types de classificateurs à air : a. zone gravitationnelle à contre-courant, b. zone gravitationnelle à courant transversal, c. zone centrifuge à contre-courant, d. zone centrifuge à courant transversal. [45]

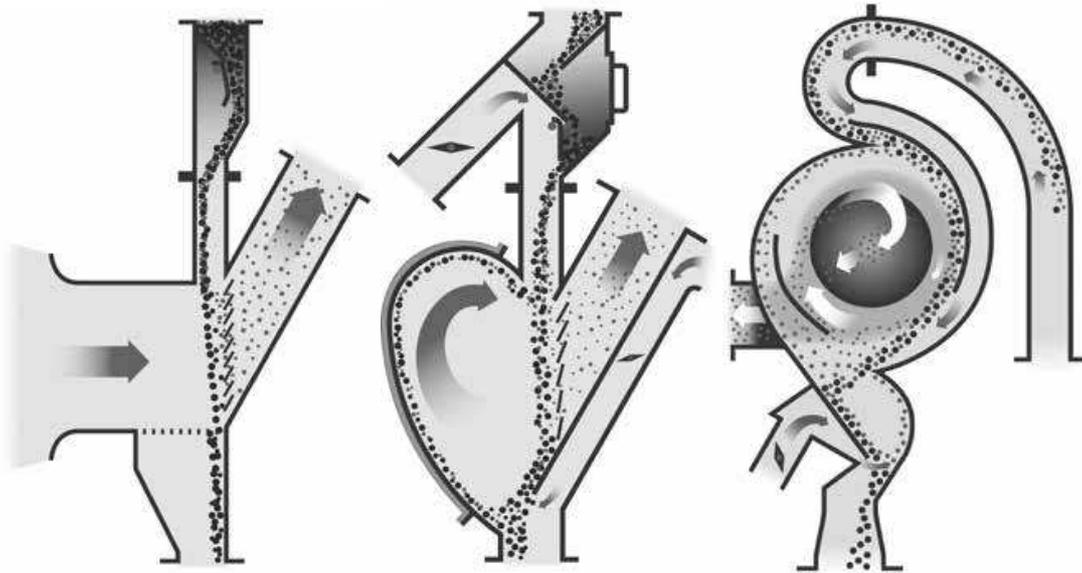


**Figure 37.** *Classificateurs en cascade a. à zigzag d. à étages c. à balayage horizontal [45]*

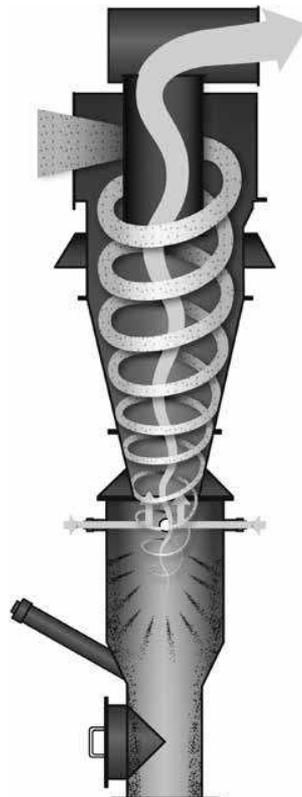
Les classificateurs à lit fluidisé permettent des débits plus importants (par exemple 40 t/h avec une taille de coupure de 160 $\mu$ m [11]) mais nécessite une hauteur importante et permettent l'apparition des zones mortes à l'intérieur du séparateur.

A l'interface des classificateurs gravitationnels et des ceux à centrifugation, le classificateur inertiel (Figure 38b) permet une taille de coupure de 63 à 300  $\mu$ m, pour une taille maximum des particules entrantes limitée à 1 mm [45]. Pour comparaison, les équipements du même fabricant, gravitationnel (Figure 38a) et à centrifugation (Figure 38c), ont les tailles de coupure préconisées de 150 $\mu$ m à 1.4mm respectivement 15 à 100  $\mu$ m [68]. Le débit de ce type d'équipement peut être très important (600 t/h).

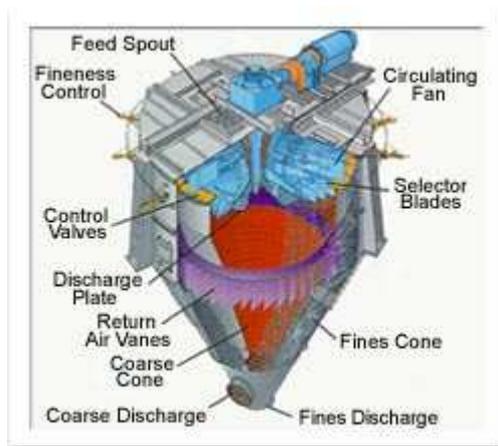
Les classificateurs à centrifugation sont généralement utilisés pour séparer par taille, ou par densité, de particules fines entre elles. Typiquement toutes les particules entrantes à séparer ont une taille inférieure à quelques centaines de  $\mu$ m. Néanmoins, des systèmes hybrides de cyclones pneumatiques (Figure 39) affichent des tailles de coupure inférieures à 100  $\mu$ m avec des tailles maximum des particules entrantes de jusqu'à 5 mm [68]. Un autre exemple est la solution de défillérisation des sables concassés proposée dans la Figure 40. Le fabricant indique une réduction à un tiers de la quantité de fines pour un produit entrant calcaire avec une teneur en fines de 18.6% et une humidité de 2.5% [73].



**Figure 38.** *Classificateur a. gravitationnel, b. inertiel, c. par centrifugation [68]*



**Figure 39.** *Hybride Cyclone / Classificateur statique [68]*



**Figure 40.** *Classificateur à air Whirlwind® [73]*

### 3.2h Exemples d'évaluation

Un prototype d'elutriateur est testé à l'échelle de laboratoire dans la référence [15] pour une application de défillérisation. Des particules de quartz entre 100 et 700  $\mu\text{m}$  sont contaminées par des particules de calcaire de taille inférieure à 100  $\mu\text{m}$  avec une concentration de 10% en masse. La Figure 41 présente les résultats obtenus à différents débits. Pour des débits supérieurs à 200 kg/h les fines séparées entraînent des plus grosses particules et les résultats sont significativement moins bons. La proximité des tailles entre les particules de sable et les contaminants est mise en cause par les auteurs. Néanmoins, dans tous les cas, le défillérisation donne des bons résultats, donc la teneur en fines des particules plus grossières est réduite (inférieure à 0.1%).

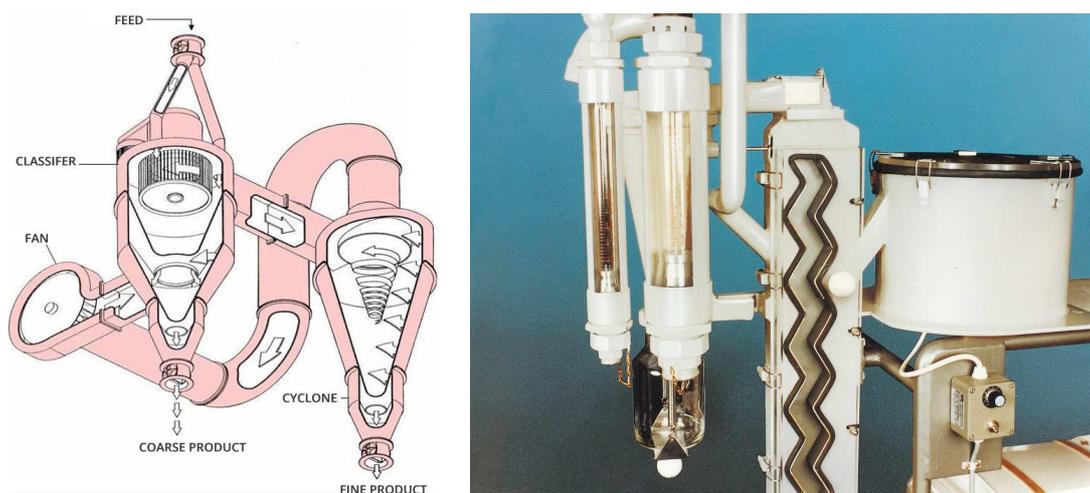
Feed Rate, kg/h	Feed, kg	Fines, kg	Coarse, kg	Loss, kg
50	10	0.869	9.056	0.075
100	10	0.844	9.116	0.040
200	10	0.870	9.111	0.019
400	10	1.018	8.98	0.002
600	10	1.229	8.591	0.180
800	10	1.509	8.442	0.049
1000	10	2.721	7.194	0.085

**Figure 41.** *Résultats de la séparation des particules de quartz entre 100 et 700  $\mu\text{m}$  contaminées par des particules de calcaire de taille inférieure à 100  $\mu\text{m}$  avec une concentration de 10% en masse [15]*

Un système basé sur le lit fluidisé est testé pour la séparation des sables de quartz avec des tailles de 50 à 800  $\mu\text{m}$  [11]. Les expérimentations de laboratoire montrent qu'il est aisé de fixer la taille de

coupure et d'obtenir une pureté du produit defillérisé de 85 à 95%. La charge de l'équipement ne semble pas changer les résultats de l'expérimentation.

Un projet du British Geological Survey a testé des possibilités de défillérisation des sables par des séparateurs à air [34] [78]. Deux équipements ont été testés dans cette expérimentation : un matériel de classificateur de laboratoire type zig-zag est un classificateur pilote à cône et rotor (Figure 42).

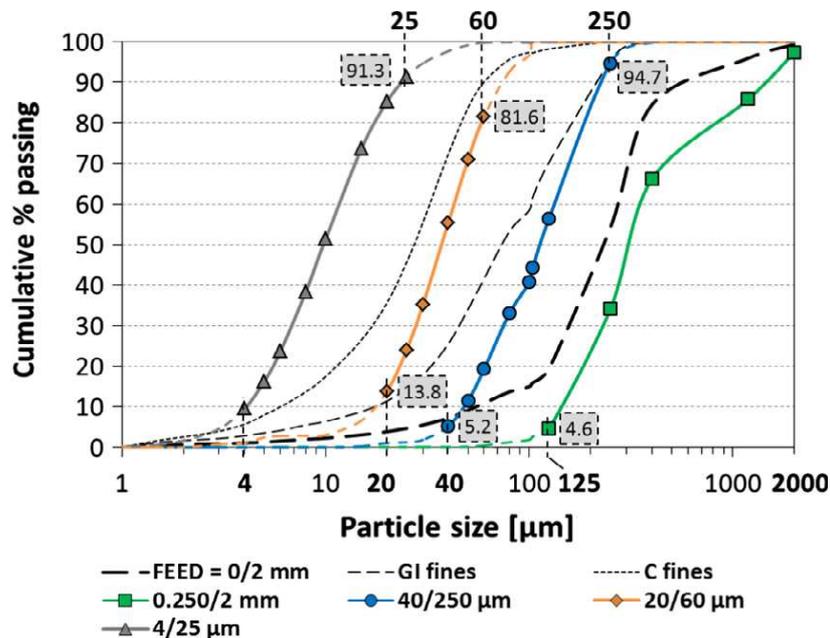


**Figure 42.** *Bradley Pulverizer Windsifter (station pilote) [80] et classificateur en zig-zag (laboratoire) [79]*

Quatre sables concassés sont utilisés dans l'évaluation ; 1 – sable humide 0/2, 2 – sable sec 0/4, 3 – sable sec 0/6 et 4 – sable humide 0/4. Le succès de ces expérimentations a été disparate. Dans certaines combinaisons équipements/sable ont permis d'enlever jusqu'à 84% des particules fines (< 63  $\mu\text{m}$ ) alors que d'autres n'ont réussi enlever que 12%. Il sembler que la différence entre les résultats est dépendante du niveau d'agglomération des fines entrante dans l'équipement.

Cepuritis et al. [87] utilise une séquence de 3 classificateurs (présentés dans la Figure 38). Du sable 0/2 est séparé à une taille de coupure de 250  $\mu\text{m}$  dans un classificateur inertiel. Le produit 0/250 $\mu\text{m}$  est ensuite séparé à une taille de 60 $\mu\text{m}$  dans un classificateur centrifuge. Le produit 0/60 $\mu\text{m}$  est rétrié dans le même classificateur pour obtenir une fraction 0/25 $\mu\text{m}$ . Le résultat de ces classifications est présenté dans la Figure 43. On remarque notamment le bon résultat de défillérisation par la première étape de classification. La taille de coupure lors de cette opération est néanmoins située autour de 125  $\mu\text{m}$ , avec moins que 5% des plus fines dans la fraction grossière. Cependant, les particules fines obtenues lors de cette opération contiennent plus de 20% de particules plus grandes

à la taille de coupure. Ceci justifie les 2 opérations de classification suivantes, nécessaires à l'obtention d'un filler de qualité.



**Figure 43.** Courbes de distribution granulométrique, du sable initial 0/2, des deux étapes intermédiaires et des fractions 0.250/2, 40/240μm, 20/60μm et 4/25μm.

### 3.3 Méthodes de tri densimétrique

En complément des méthodes plus classiques qu'on peut citer pour la séparation par taille des fines, on s'intéresse ici à des méthodes qui a priori ne concerne pas la séparation par taille mais la séparation par densité. En effet, dans le cadre des granulats recyclés il est reconnu que des différences de densité sont présentes, dans le cadre d'une même taille de particules [9] mais aussi entre les particules ayant des tailles différentes [81]. Par ailleurs, les principes physiques du tri par taille à courant gazeux sont souvent très semblables à ceux de certains principes de tri densimétrique à sec. A titre prospectif et informatif on récapitule alors l'ensemble des principes de tri gravimétriques.

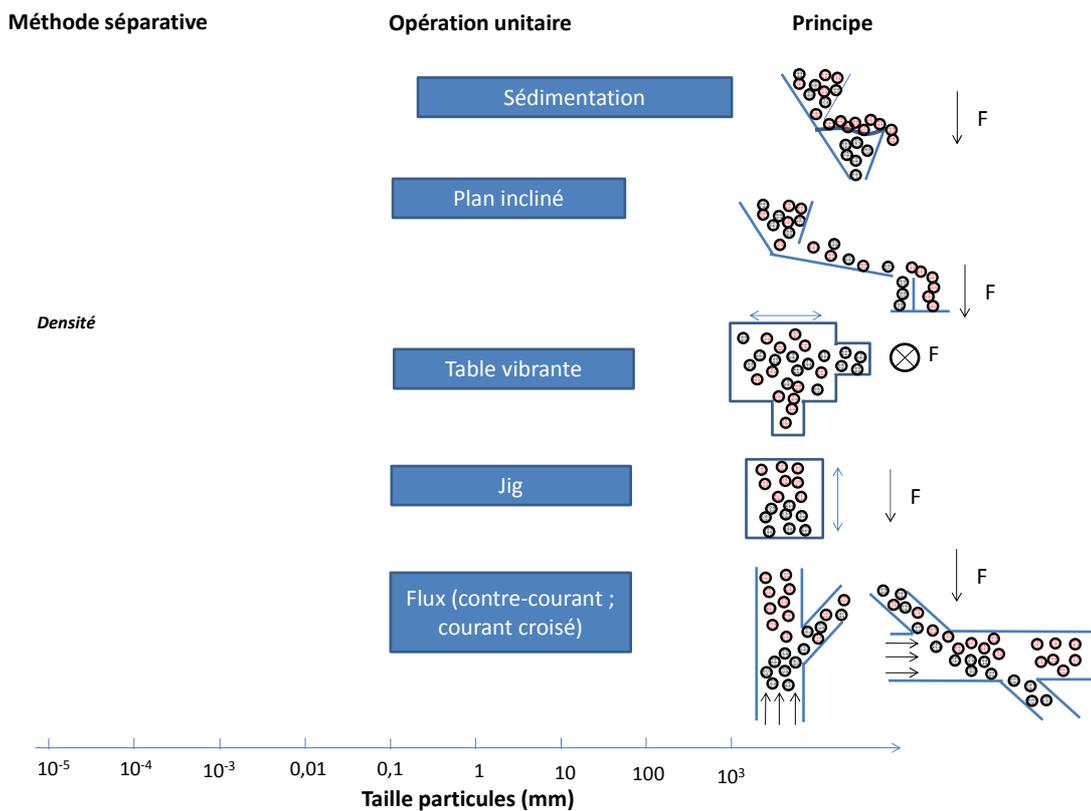
Dans le cadre de la séparation, on retrouve une gamme granulométrique étendue. L'ensemble peut convenir suivant la taille moyenne des particules en jeux.

La définition issue de l'ingénierie des minerais des méthodes de classification par densité est la suivante [17] :

« La concentration gravimétrique s'effectue dans un champ de forces de masse, en général celui de la pesanteur, combiné à l'action d'autres forces telles que la résistance offerte par le fluide (en général

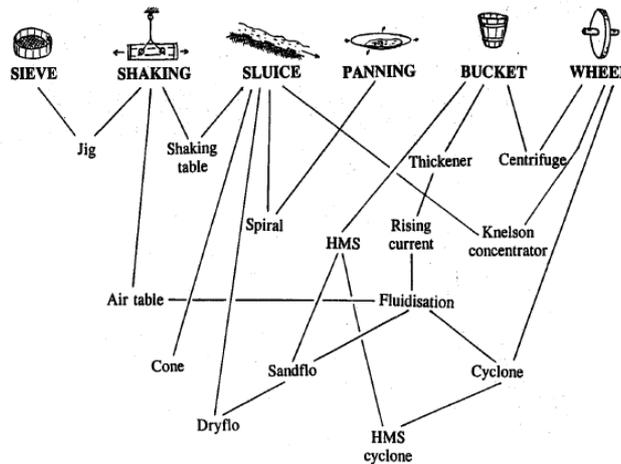
de l'eau pour la gravimétrie en voie humide, plus rarement de l'air pour la gravimétrie en voie sèche) au mouvement des grains à séparer ou les forces de frottement entre ces particules et une surface support fixe ou mobile. Lorsque la pesanteur ne suffit pas, on a recours à une force centrifuge. »

La Figure 44 présente un diagramme récapitulatif des moyens technologiques capable de séparer, dans une gamme étendue de classes granulométrique, comme cela est le cas des granulats recyclés, deux types de particules et se concentre sur les méthodes visant à séparer des particules de densités différentes.



**Figure 44.** Principes des procédés de séparation gravimétrique

Une présentation schématique des principaux équipements de classification gravimétrique est donnée dans la Figure 45.



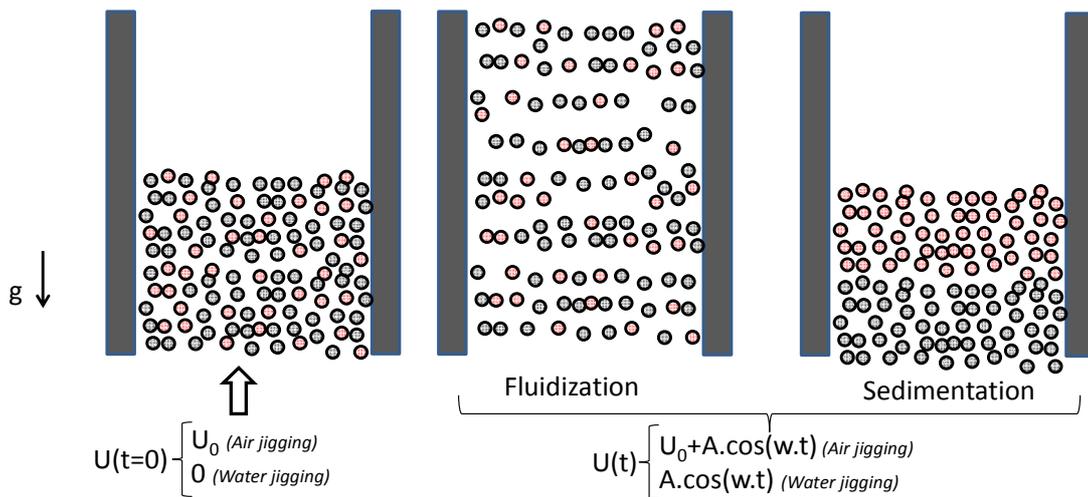
**Figure 45.** Evolution des classificateurs par densité [83]

### 3.3a Jig

La Jig est une méthode de séparation physique par densité (Figure 46). Le principe est d'exercer une force sous forme d'un échelon de pression sur les particules. L'ensemble des particules est alternativement fluidisé puis sédimentés. Après la sédimentation de l'ensemble des particules, on obtient une nouvelle organisation de l'assemblage granulaire. Les particules de faible de densité se retrouvent en partie haute et les particules de forte densité sont retrouvent en partie basse de l'enceinte de la Jig. Il existe deux types de Jig : la Jig à eau et la Jig à air.

La consommation énergétique d'une Jig à air est plus élevée par rapport à une JIG à eau. Une pompe puissante pour l'alimentation en air et un aspirateur (pour extraire la poussière) sont requis pour une Jig à air. La Jig à eau nécessite un piston permettant d'assurer les mouvements successifs de la phase dispersée.

La Jig opère généralement pour des tailles de particule dont la taille minimale se situe entre 3 mm et 10 mm. Cependant, lorsque la différence de densité est importante, on peut s'attendre à une récupération de particule pouvant atteindre 200  $\mu\text{m}$  [55]. Les premiers travaux sur des matériaux C&D ont été réalisés sur des tailles de grains supérieures au millimètre [9].



**Figure 46.** Jig - Séparation sous l'effet d'un échelon de pression

### 3.3b Table vibrante

La table vibrante a recours aux phénomènes physiques du plan incliné et de la vibration, puisqu'une circulation d'eau est alimentée perpendiculairement à un mouvement transversal (Figure 47). La sédimentation des particules s'effectue sur une surface plane inclinée transversalement. La concentration a lieu dans un film d'eau peu épais. Des raffles peuvent être placés perpendiculairement au courant d'eau, freinant le mouvement des lourds. Un mouvement asymétrique ou orbital du plan permet, grâce à leur inertie plus élevée, une progression longitudinale plus rapide des minéraux lourds qui sont alors recueillis sur la portion haute du plan incliné. Cette séparation peut être favorisée par la progression du plan incliné ou par des racleurs spéciaux (séparateur multigravité). Les particules se classent en fonction de leurs granulométries et de leurs masses volumiques.

Au même titre que pour la jig, le système de table vibrante semble s'adresser aujourd'hui plus souvent à la séparation par voie humide, mais il peut être conçu pour une séparation à sec [82], [84]. Pour ce système, une pression faible traverse la surface de la table et fluidise le milieu granulaire. Les particules plus denses sédimentent vers le bas du mélange où les mouvement le long de la surface de la table est obstrué par des raffles. Leur mouvement est alors orienté le long de ces raffles. Les particules plus légères, en surface du mélange traversent les raffles et descendent de manière transversale aux trajectoires des particules plus denses.

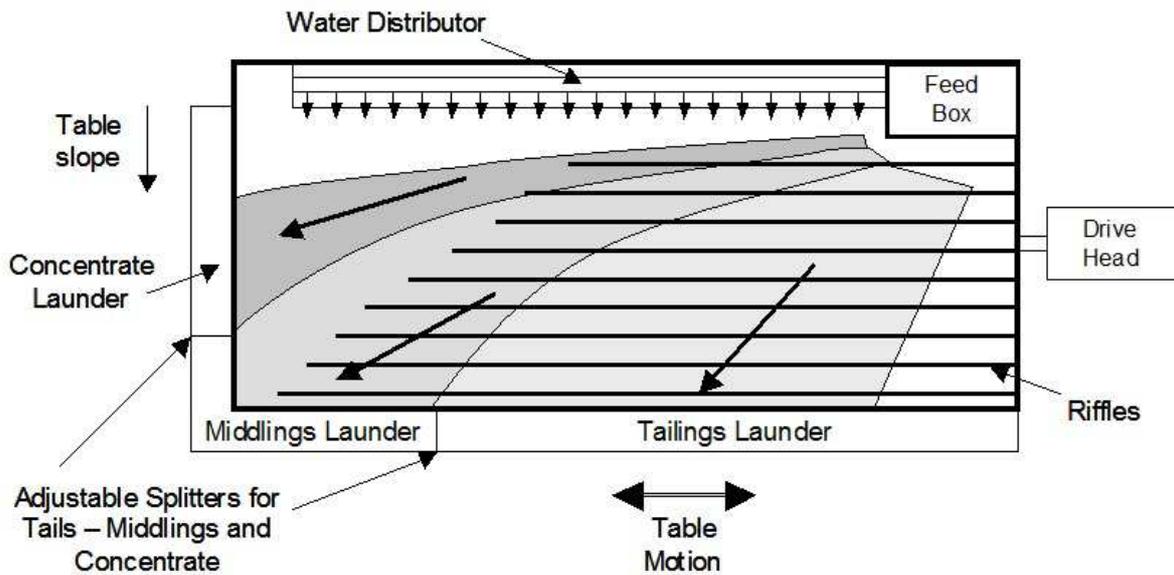


Figure 47. Principe d'une table vibrante

### 3.3c Flux à contre-courant ou courant croisé

Comme cela a été discuté, l'élutriation permet au premier lieu de réaliser du tri densimétrique pour des particules fines. Un exemple est donné par Kökkiliç et al. [22] qui analyse la séparation à air des particules de tungstène et de quartz dont la taille est autour de  $100 \mu\text{m}$ . L'équipement est présenté dans la Figure 48.

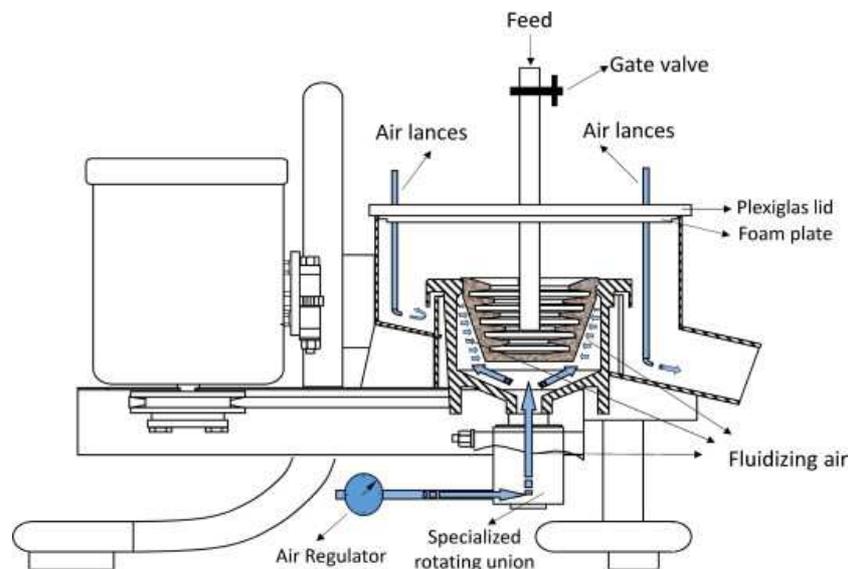
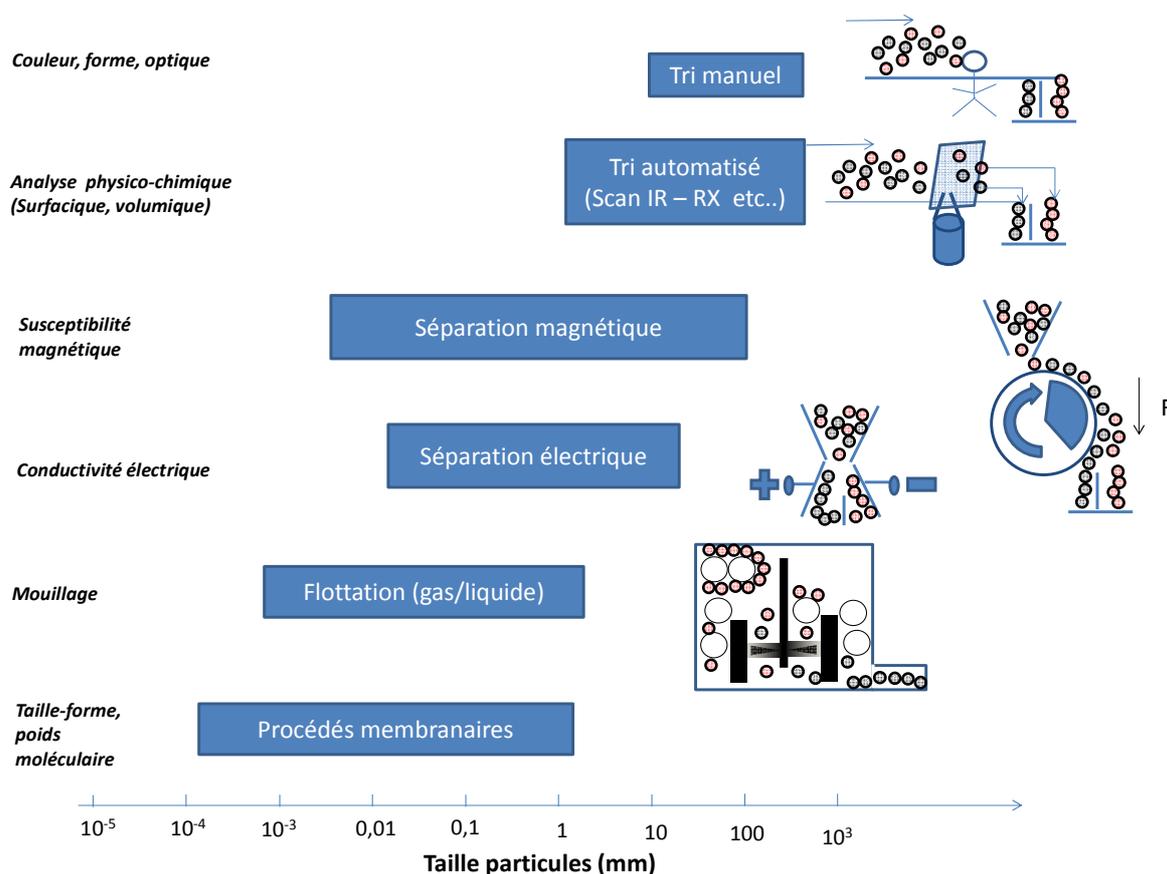


Figure 48. Le concentrateur Knelson [22]

## 4. Technologies physico-chimiques

Dans le même esprit que pour les méthodes de tri densimétriques, nous présentons ici les autres technologies de classification, basées sur différentes propriétés physiques ou chimiques (autres que celles utilisant la gravité, présentées dans la section précédente). La Figure 49 présente l'ensemble des technologies permettant de différencier les propriétés physico-chimiques des particules.



**Figure 49.** Procédés de séparation de particules sur critères physico-chimiques de type automatique

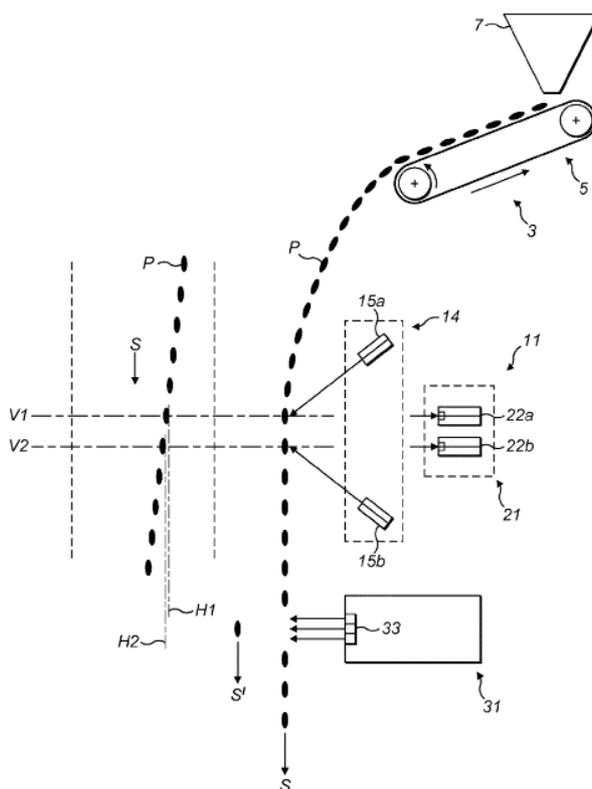
Parmi ces techniques, les procédés membranaires et de flottation s'adressent exclusivement à la séparation par voie humide et ne seront pas traités ici.

### 4.1 Tri automatisé

Le tri automatisé est constitué d'une zone destinée à détecter les particules non désirables et une zone de séparation mécanique de ces particules.

La zone destinée à détecter les particules non désirables est généralement située sur un tapis convoyeur. Un capteur scanne et détecte l'ensemble des particules. Les informations fournies par le capteur sont analysées en l'espace de quelques millisecondes par un ordinateur qui le compare avec les informations de sa base de données. En fonction des l'information reçue et donc de la composition des particules, les particules sont ensuite soufflées grâce à de l'air comprimé vers différentes goulottes, à la jetée du tapis convoyeur (voir Figure 49).

Dans le cas des particules trop lourdes, des systèmes de « soufflage mécanique » par pales actionnées par des vérins peuvent être proposés. Aussi, en principe, le capteur peut analyser les particules lors de leur chute libre comme dans le cas présenté dans la Figure 50.



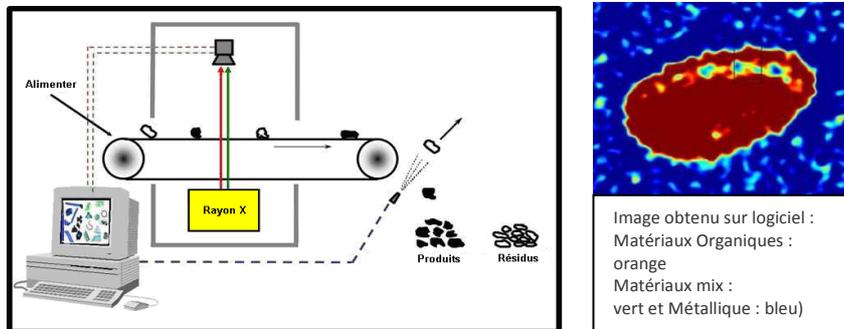
**Figure 50.** Dispositif de séparation lors de la chute libre [33]

Les méthodes de tri mécanique par capteur, parfois nommées par abus de langage « tri optique », se différencient suivant le type de capteur analysant la matière composant les particules (ou d'autres caractéristiques de ces particules). Nous listons dans la suite les principaux types de capteurs pouvant être utilisés.

#### 4.1a Dual Energy X- rayon transmission

Cette méthode peut analyser et catégoriser les échantillons sans les casser. Contrairement aux autres capteurs, il est possible de détecter la composition intérieure d'objets et de différencier la

densité moyenne sur un plan d'échantillon grâce à ses doublets d'énergies (rayons issus de deux intensités énergétiques différentes). Mais la trace organique et la corrosion sont des sources de risques pour les mesures.



**Figure 51.** Exemple de résultat obtenu par technologie rayons X (Dual Energy X- rayon transmission)

Le principe est basé sur une ceinture qui transmet les échantillons entre le capteur et la source de rayon (Figure 51). Un détecteur mesure l'intensité de rayon X, le logiciel calcule, puis envoie un signal à un séparateur. La technologie rayons X pouvant être générés par un tube à rayons X. La méthode doit être réalisée protégée à cause du rayonnement. Cette technologie est déjà utilisée dans plusieurs procédés de traitement de la matière. (Diamant, Or, tungstène...)

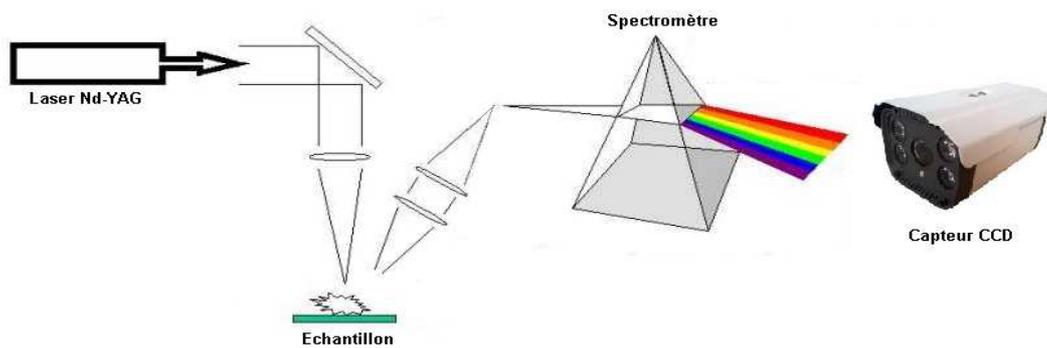
Cette méthode mesure la densité d'objet directement et correspondrait à notre demande. Elle peut mesurer la composition intérieure d'un échantillon et pas seulement sa surface ce qui évite le concassage des résidus. L'humidité n'influencerait pas la mesure. Cette méthode peut très bien adapté au procédé industriel.

#### 4.1b Fluorescence induite par laser

LIF est une analyse appliquée de la vibration moléculaire. Il s'adapte aux liquides ou gazeux, réactifs ou non réactifs. Cette méthode n'est pas adaptée au matériau solide. Par conséquent, pour analyser nos échantillons mélangés, cette méthode ne semble pas adaptée.

#### 4.1c Spectroscopie sur plasma induit par laser (LIBS)

LIBS est une méthode analytique en utilisant l'émission atomique spectroscopique. Un laser très puissant émet en un point sur l'échantillon pré-analyse, l'énergie est concentrée sur la surface de l'échantillon (Figure 52). Cette énergie produit une évaporation ionique (micro-plasma), ce plasma émet un rayonnement transmis à un spectromètre, un capteur permet d'obtenir la composition de cette échantillon.



**Figure 52.** Principe de mesure par LIBS

L'avantage de cette méthode est :

- Qu'elle peut mesurer de nombreuses substances organiques ou inorganiques en une seule étape.
- La gamme de mesure est très large.
- Il n'y a pas besoin de préparer les échantillons.
- On peut analyser sur tout type d'échantillon (liquide, solide, gaz...).
- Le temps d'analyse est court (milliseconde pour tous les éléments dans le tableau périodique).
- La mesure est quantitative.

L'inconvénient est qu'elle est :

- Sensible à l'eau et la pollution de l'air

Cette méthode est utilisée dans les laboratoires de recherche mais n'est pas totalement complète. Il existe encore des incertitudes sur le résultat.

#### 4.1d Spectrométrie de fluorescence X

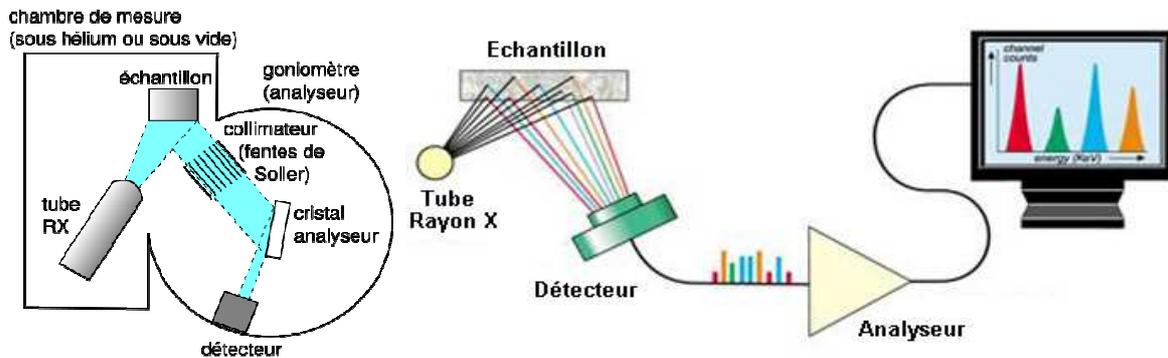
Cette technique (Figure 53) est accomplie par la détection du rayonnement secondaire d'objet. Elle peut s'appliquer à toutes sortes de matériaux. Elle s'adapte aux fortes quantités d'échantillon. C'est une méthode non-destructive. Sa mesure est faite dans un système de protection à cause du rayonnement. Il existe 2 types de méthodes : l'analyse dispersive en longueur d'onde WD-XRF (wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry) et l'analyse dispersive en énergie ED-XRF (energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry). Un rayon X est émis en un point de l'échantillon, la fluorescence X s'analyse à l'aide d'un analyseur (analyseur cristal pour WD-XRF) – Figure 53b.

L'avantage de cette méthode est :

- la gamme de capteurs est entre le béryllium (4) et l'uranium (92)
- Très sensible à l'élément lourd, sensibilité raisonnable pour l'élément léger.

- Bons résultats pour l'élément léger, moins pour l'élément lourd.
- Mesurer simultanément ou successivement.

La difficulté pour WD-XFR provient du fait que la position entre le cristal analyseur et détecteur doit être très précis.



**Figure 53.** Principe de mesure par fluorescence X

L'inconvénient est les points suivants :

- semi-quantification des échantillons qui ne sont pas plats, polis et homogènes
- restrictions de tailles sur les échantillons
- des échantillons doivent être compatibles avec le vide (pas l'idéal pour les matériaux organiques humides).
- l'analyse (et le revêtement) peut nuire à l'analyse ultérieure de la surface.
- moins de précision et sensibilité pour l'élément léger.
- mauvais résultats pour l'élément léger.

Cette méthode est très utilisée dans l'industrie, elle est capable d'analyser la composition d'un liquide, d'un solide ou d'un film. Elle est disponible en machine fixe ou portable selon le besoin. Cette méthode ne peut pas mesurer directement la densité de matière mais la composition élémentaire (utiliser dans le MEB).

#### 4.1e Technologie du capteur visuel

Un capteur qui sensible à la lumière reçoit les lumières visibles et les convertit aux tensions électriques. Une image numérique créée à l'aide de signaux (comme le fonctionnement d'un appareil photo numérique). Cette technique peut être utilisée pour trier un mélange contenant les impuretés

colorées (exemple : les briques). Il existe une autre méthode dans ce domaine : Spectroscopie ultraviolet-visible généralement appliquée pour les liquides.

Les particules à trier sont déversées sur un plan incliné translucide (3) au-dessous duquel est disposée une source de lumière et au-dessus duquel est placée une caméra. En bas du plan incliné (3), sont disposés côte à côte des marteaux (8) pouvant basculer autour d'un axe (9) entre une position de repos et une position d'éjection de la particule indésirable lorsque celle-ci est détectée par la caméra. Sur chaque marteau (8), est fixé une biellette (47) dont le déplacement vers le bas place le marteau (8) en position d'éjection. La biellette (47) est reliée à la tige (61) d'un vérin pneumatique (62) à double effet commandé par un distributeur (43) qui est piloté par un élément opto-sensible de la caméra. Utilisable pour le tri du débris de verre. [76]

#### **4.1f Imageries thermiques**

Cette méthode s'applique sur le rayonnement infrarouge (IR), un capteur détecte les différentes ondes IR émis d'un objet. Le rayonnement IR est un rayonnement électromagnétique d'une longueur d'onde entre la lumière visible (0,7  $\mu\text{m}$ ) et des micro-ondes (1 mm). C'est une méthode indirecte et non-destructive, la lumière d'ambiance est négligeable. Il n'est pas sensible à la poussière et à l'humidité.

#### **4.1g Spectroscopie proche infrarouge**

Cette méthode s'applique pour un spectre électromagnétique dans une gamme de longueur d'onde 0,7-3  $\mu\text{m}$  en lumière visible. C'est une mesure surfacique et non destructrice. Il est possible de déterminer la composition moléculaire de la surface d'un objet ou celle d'un mélange. Par contre elle n'est pas utilisable pour un corps d'échantillon noir qui absorbe ou reflète toutes les lumières. Elle est très utilisée pour analyser une matière organique, inorganique ou polymère.

Dans le cadre de la matière première industrielle, NIR est utilisé pour identifier la structure surfacique de la terre (eau, rocher et matière organique...).

#### **4.1h Technologie du TéraHertz**

L'échelle de TéraHertz est comprise entre 0.1 THz à 10 THz dans le domaine des fréquences et, entre 30  $\mu\text{m}$  à 3 mm dans le domaine des longueurs d'ondes. Méthode peu développée, l'application de cette technologie est récente on remarque que :

- le TéraHertz s'absorbe dans l'eau, et donc l'humidité influence la mesure.
- il n'est pas possible de déterminer le métal à cause de la réflexion. Par contre le pourcentage du métal dans l'échantillon est déterminable.

Cette technique n'est pas très utilisée dans la production industrielle, non seulement le problème du prix mais le problème de détection de THz.

Un dispositif de trier des semences par spectroscopie térahertz dans le domaine temporel est présenté dans [16].

#### 4.1i Technologie du radar

Cette technologie peut déterminer la direction et la position d'un objet. Mais pas la composition. Un radar envoie le rayonnement électromagnétique défini, certains rayonnements interagissent avec l'objet. Une petite partie de cette énergie est absorbée dans l'échantillon le reste est réfléchi sous forme de signaux captés par le radar.

#### 4.1j La télédétection par laser

Le principe de LADAR ressemble au Radar. Les longueurs d'ondes du LASER sont situées entre 200 nm à 2 ou 3  $\mu\text{m}$ . Chaque mesure est faite sur un point, et une seule distance peut être calculée.

#### 4.1k Spectroscopie Raman

Le principe de la spectroscopie Raman ressemble à la spectroscopie infrarouge (Figure 54). La spectroscopie Raman envoie une onde monochromatique sur l'échantillon, le reflet traverse un filtre élémentaire. Ce reflet filtré peut être analysé grâce à un spectrographe relié à un capteur.

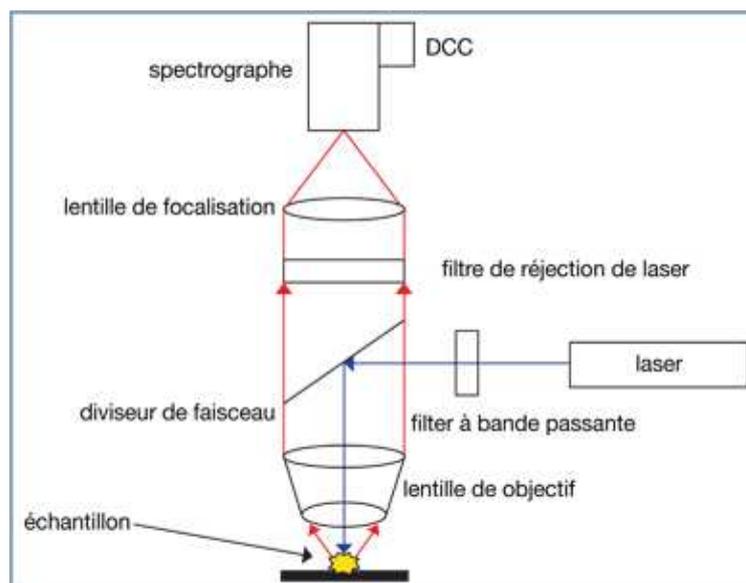


Figure 54. Principe de mesure par spectroscopie Raman

L'avantage de cette méthode est :

- sa méthode non-destructive
- une préparation d'échantillons non nécessaire
- la possibilité de déterminer la qualité et la quantité de la composition et la structure chimique d'un échantillon
- la possibilité de mesurer la contamination d'un gaz, d'un liquide ou d'un solide.

L'inconvénient de cette méthode est :

- c'est une mesure surfacique
- cette méthode ne peut pas mesurer certains matériaux à cause de leur structure moléculaire.

## 4.2 Séparation magnétique

L'intérêt réside dans la séparation de matériaux non-ferromagnétiques. La séparation à courant de Foucaud permet par exemple la récupération de métaux d'origine non-ferreux comme l'aluminium par exemple.

Des travaux récents [52] montre que la séparation magnétique de matériaux C&D est rendu possible grâce notamment à la différence de susceptibilité magnétique entre le sable et les particules de pâte de ciment. Les auteurs préconisent le procédé ReRoll.

## 4.3 Séparation électrique

Les systèmes de tri électrostatiques sont souvent basés sur le principe de cylindre classificateur (Figure 55 – voir aussi la section 3.1c). Un exemple alternatif, proposé pour le tri électrostatique des particules inférieures à 200  $\mu\text{m}$  est proposé dans [41]. La méthode permet la séparation d'une fraction enrichie en cellulose, d'une part, d'une fraction enrichie en lignine, en hémicelluloses et en minéraux d'autre part. La technologie inclue la déviation de trajectoire dans le champ électrique des particules chargées pour trier les particules (Figure 56).

L'entrée 105 de particules ultrafines est configurée pour permettre le versement d'une poudre de particules ultrafines issues du broyage. Les particules ainsi versées dans l'entrée 105 de particules traversent un moyen 110 de charge assurant le transport de particules vers l'entrée du moyen 120 de tri. La charge tribo-électrostatique est réalisée par collision entre les particules et la surface

intérieure du conduit. Cette surface comporte au moins une partie en polychlorure de vinyle, en téflon, en verre ou en acier (matériaux ayant des propriétés optimales pour la charge de particules riches en ligno-cellulose). Le moyen 120 de tri électrostatique principal des particules transmises comporte au moins une électrode 125 polarisée de façon positive ou négative. Ainsi, les particules chargées sont attirées ou repoussées par l'électrode 125 et sont dirigées de manière préférentielle vers un des deux contenants 130 et 135.

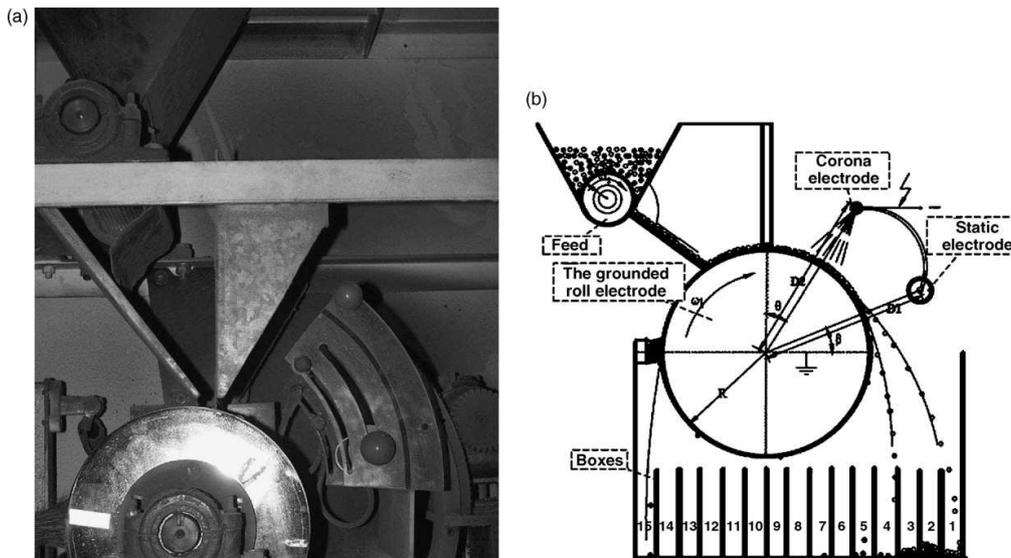


Figure 55. a. Séparateur électrostatique de laboratoire et b. schéma de fonctionnement

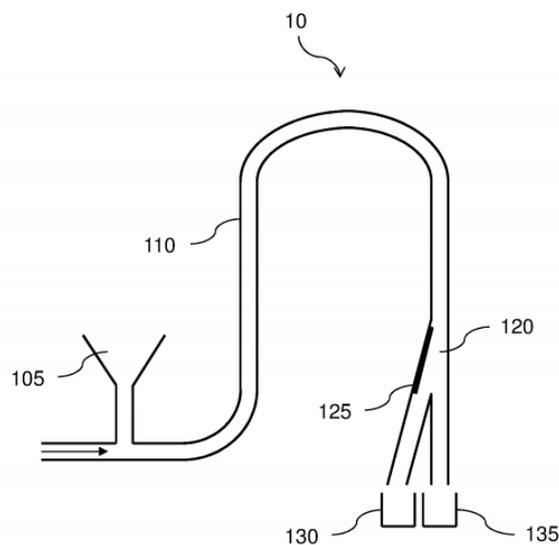


Figure 56. Coupe d'un moyen de prétraitement par voie sèche par un gaz pour séparation électrostatique [41]

## ***5. Avis dans d'autres documents de synthèse***

Les contraintes de la séparation des fines (< 63 $\mu$ m) des granulats recyclés sont semblables aux contraintes des fines de sables de roches concassées. La séparation des fines de sables alluvionnaires bénéficie d'une différenciation entre la taille moyenne des fines (le l'ordre des dizaines de  $\mu$ m) et la taille de coupure. Ce n'est pas le cas pour des particules issues du concassage pour lesquelles la distribution granulaire présente une certaine continuité autour de la taille de coupure [58]. De plus, en choisissant une technologie à sec, on doit affronter plusieurs difficultés supplémentaires : une taille de coupure réputée plus haute et d'une efficacité moindre, un effet indésirable de l'agglomération des fines, voir même la non adaptation de la technologie à des matériaux humides.

Malgré tout, de nombreuses informations bibliographiques montrent la possibilité de réaliser la défillérisation d'un sable concassé avec une technologie à sec.

L'étude de « SINTEF Building and Infrastructure » [54] propose l'utilisation d'un crible Trisomat "flip-flop" avec des vibrations verticales dans la partie supérieure et giratoires dans la partie basse [63]. Une deuxième proposition pour le criblage est le crible vibré Mogensen [39]. L'étude propose aussi deux équipements de classification par courant gazeux : le classificateur à air Sturtevant Inc.'s Whirlwind (Figure 40) et les classificateurs Buell (aujourd'hui Metso, Figure 39). Dans une deuxième étude les mêmes auteurs présentent une étude utilisant ces classificateurs à air [1]. Enfin, Johansson [77] présente à son tour plusieurs études expérimentales et numériques sur ces mêmes équipements.

L'étude du British Geological Survey [34] [78] cite l'utilisation de classificateurs Sturtevant Inc.'s Whirlwind et Metso-Buell sur des sites de production en Amérique du Nord. L'étude cite également l'utilisation des classificateurs à air en République Cheque et Malaisie. Dans leur étude, les auteurs utilisent un classificateur Zig-Zag et un classificateur dynamique (Figure 42).

Le rapport CTP/UNPG [48] donne un aperçu large et approfondie des méthodes de classification utilisées dans les carrières pour défillérisation des sables concassés. On reprend dans le Tableau 1 le résultat de leur recherche bibliographique. Le rapport observe que les classificateurs dynamiques (présentés en section 3.2e), et dans une moindre mesure les sélecteurs gravitationnels (3.2a) à inertie (3.2b) sont ceux le plus souvent présents dans la littérature.

Tableau 1. Méthodes de classification utilisées dans les carrières pour défillérisation des sables concassés [48]

Technique	Plage de coupure	Gamme de débit	Puissance électrique	Particularités
Crible vibrant	2 mm à 1 m (min. 500 $\mu$ m)	10' t/h à 100' t/h	15-180 kw (sources : Metso)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilité de traiter de grandes quantités de matière</li> <li>• Difficile d'obtenir des coupures fines si la matière n'est pas parfaitement sèche</li> <li>• Nécessite la mise en place d'un dispositif évitant le colmatage</li> </ul>
Tamissage	75 $\mu$ m à 10 mm (min. 32 $\mu$ m)	Max. 50 t/h	Max. 5,5 kW (modèle Allgaier TSI 290)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permet d'avoir plusieurs coupures assez précises</li> <li>• Capacité de traitement limitée</li> <li>• Nécessite la mise en place d'un dispositif évitant le colmatage</li> <li>• Risque de création de davantage de fines par attrition</li> </ul>
Classificateur de type Zig-Zag	80 – 300 $\mu$ m (Max. 10 mm)	10 kg/h jusqu'à 200 t/h	1,5-15 kw (Sép. ZZ Zerma)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bonne efficacité et imperfection limitée</li> <li>• Peu de pièces d'usure et faible coût de maintenance</li> <li>• Nécessite une humidité limitée</li> <li>• Qualité peu affectée par les variations d'alimentation</li> </ul>
Classificateur gravitationnel	150 $\mu$ m – 2 mm			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bonne efficacité</li> <li>• Peu de pièces d'usure et faible coût de maintenance</li> <li>• Possibilité d'adapter les ailettes pour l'utilisation avec des matériaux abrasifs.</li> <li>• Nécessite d'avoir une humidité limitée</li> </ul>
Cyclone pneumatique	10...40 - 100 $\mu$ m	100' m <sup>3</sup> /h	(ventilateur)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coupure peu précise et grande imperfection</li> <li>• Peu de pièces d'usure et faible coût de maintenance</li> <li>• Plus employé pour le dépoussiérage de l'air que la défillérisation</li> </ul>
Classificateur à rotors horizontaux	3 – 150 $\mu$ m	50 kg/h - 3t/h	4 – 45 kW (Turboplex Alpine)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Débit massique supporté assez faible</li> <li>• Pour une coupure stable, une usure accélérée ainsi qu'une consommation d'énergie accrue</li> <li>• Diminution de la récupération des fines si la quantité de particules est trop importante</li> </ul>
Sélecteur dynamique	5 – 250 $\mu$ m	10' kg/h à 100' t/h	7,5 – 65 kW (Microdyn Poittemill)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plus grande netteté de coupure que les cyclones</li> <li>• Possibilité d'avoir des coupures relativement basses</li> <li>• Coût de maintenance élevé dû à l'usure</li> <li>• Possibilité de débits importants</li> </ul>
Classificateur gravitationnel à inertie	63 – 300 $\mu$ m	Max. 85 t/h (par unité)	50 – 85 kW (Metso-Buell)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de pièces mobiles (coûts de maintenance moindres)</li> <li>• Réglage aisé de la coupure désirée</li> <li>• Grande efficacité de la coupure</li> <li>• Grande sensibilité à l'humidité du matériau</li> </ul>

Pour finir, on cite le projet Re-Maud dédié à l'extrapolation de diverses techniques de tri en centre de valorisation des matériaux de constructions [38], [43] et le projet C2CA entre différents partenaires académiques et industriels [61] qui a notamment étudié l'utilisation d'une technique de tri automatique (ADR) visant la rupture de ponts capillaires dans un matériau CDW.

## 6. Conclusion

L'apriori sur l'habilité de différents systèmes pour la défillérisation à sec des sables recyclés est surtout appuyé sur la proximité de ce matériau avec les sables de roche concassé.

La liste des équipements utilisés dans les carrières pour défillérisation des sables concassés présenté dans le Tableau 1 [48] concorde bien avec les différentes informations obtenues dans la recherche bibliographique présentée ici.

La totalité des équipements pris en considération à ce jour pour cette application sont soit du criblage soit de la classification par courant gazeux.

Pour les cribleurs, un doit considérer des cribleurs vibrés à maille en acier tissé (voir à système Flip-Flop). Le mouvement de vibration doit assurer le dégagement des grosses particules vers la périphérie de la surface criblante. Pour les cribles vibrants, une modulation du mouvement de vibration entre le haut (zone entrante des particules) et le bas (zone sortante) semble nécessaire. Pour les tamiseuses il semble préférable de profiter de la possibilité d'introduire un mouvement de nutation. Des systèmes de decolmatage peuvent améliorer les rendements.

Pour les classificateurs à air on semble préférer dans la littérature les systèmes dynamiques (donc avec présence des pales en mouvement), inertiels ou par centrifugation (donc basés sur une succession des contre-courants d'air, voir des courants latéraux).

Un rendement plus élevé peut être atteint en combinant plusieurs cellules en étages [3] ou différents séparateurs à air [10] dans un agencement en cascade. Des combinaisons de classificateurs à air avec des zones de criblage sont parfois proposées [47].

Un problème commun aux cribles et classificateurs à air est le faible rendement induit par une humidité initiale forte du sable soumis à la défillérisation. Des systèmes de préchauffage, voire de desagglomération mécanique, seront sans doute nécessaires pour mettre en place des procédés robustes.

Il faut néanmoins faire remarquer que le cas des sables recyclés n'est pas totalement équivalent à celui des sables de roche concassée. En effet, les particules recyclés ont une minéralogie mixte (béton, roche, brique ...) et une structure hétérogène (pâte de ciment et éléments rocheux pour les particules de béton concassé, par exemple). Cette composition hétérogène génèrent des différences

de l'état de surface, densité ... inévitables, et encore plus importantes entre des particules de taille différente. Sur certains systèmes ces différences pourraient améliorer l'efficacité du procédé de défillérisation, sur d'autres systèmes cette efficacité pourrait se voir diminuer. Nous n'avons pas trouvé d'éléments dans la littérature nous résignant sur ces aspects. Nous limitons donc notre analyse à des informations plus générales que celle de la défillérisation des granulats recyclés. Ceci explique par ailleurs l'étendu du périmètre de notre investigation bibliographique, contenant des méthodes qui ne sont pas utilisées à ce jour dans les carrières.

En effet, avant de conclure sur les systèmes à privilégier dans des investigations pour la défillérisation des sables recyclés, il nous semble utile de prendre en considération aussi les systèmes d'élutriation. Un lit fluidisé est caractérisé par une compacité plus grande du matériau granulaire. Les impacts entre les particules pourraient être favorables à une désagglomération des particules fines, qu'il convient à séparer. Aussi, ce système peut paraître plus robuste pour un mélange granulaire contenant aussi des particules de beaucoup plus grande taille. Dans la continuité des systèmes à lits fluidisés, la jig à air ou la table vibrante à air pourront être adaptées à terme pour être efficace sur le problème de la défillérisation.

D'autres principes physiques sont à garder en mémoire. On imagine un potentiel d'utilisation pour ce problème des systèmes de tri électrostatique, techniques magnétiques [52] ou de tri mécanique [37].

---

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Aasly K.A., Danielsen S.W., Wigum B.J., Norman S.-H., Cepuritis R., Onnela T. Review report on dry and wet classification of filler materials for concrete : State-of-the-art : FA 2.3 High quality manufactured sand for concrete : SP 2.3.1 Filler technology. 2014. COIN Projet report (52) (2014)
- [2] Bąk Ł., Loginov I.G., Michalcewicz J., Slepian V.I., Stachowicz F., Construction of screener oriented on application of parametric resonance, *Mechanika* 85 p.2-13 (2013)
- [3] Bamber A., Csinger A., Poole D. Brevet WO 2013163759 A1, Machine de tri de minéraux haute performance de type cascade et procédé afférent (2013)
- [4] Baeyens, J., D. Geldart, and S. Y. Wu. Elutriation of Fines from Gas Fluidized Beds of Geldart A-Type Powders — Effect of Adding Superfines. *Powder Technology* 71 (1): 71–80, (1992)
- [5] Barquissau J. Brevet EP 0330000, Dispositif de tamisage semi-automatique des agrégats sur chantier, (1989)
- [6] Blazy P., Joussement R. Criblage. Surfaces criblantes et appareillages. *Techniques<sup>i</sup> de l'ingénieur*, J3 101
- [7] Briens, C. L., M. A. Bergougnou, I. I. Incullet, T. Baron, and J. D. Hazlett. Size Distribution of Particles Entrained from Fluidized Beds: Electrostatic Effects. *Powder Technology* 70 (1): 57–62, (1992)
- [8] Carlsson D. Brevet WO 1992004135 A1, Procédé et dispositif servant à tamiser de la terre, du gravier ou des matières similaires. (1992)
- [9] Cazacliu B., Sampaio C.H., Miltzarek G., Petter C., Le Guen L., Paranhos R., Huchet F., Kirchheim A.P., The potential of using air Jigging to sort recycled Aggregates. *Journal of Cleaner Production* 66, 1 46-53 (2014).
- [10] Czech A. Brevet WO 2015080608 A1. Dispositif de nettoyage et de tri fin de déchets métallurgiques fins en grains et procédé de nettoyage et de tri fin de déchets métallurgiques fins en grains (2005)
- [11] Galperin V. Industrial tests of the Air Classifiers with Fluidized Bed, *Proceedings of Mines and Chemistry Institute for Raw Materials*, issue 57, Moscow, (1985)
- [12] Galperin V., Shapiro M. Separation of Solid Particles in a Fluidized Bed Air Classifier, *Powder Handling and Processing*, 11, No. 2, April–June 1999.
- [13] Gisquiere C. Brevet WO 2004041452 A1, Procédé et dispositif de séparation de particules d'un mélange. (2004)
- [14] Hansen H.. Fundamentals and Further Development of Sizer Technology. *AT. Aufbereitungs-Technik* 41 (7): 325–29. (2000)
- [15] Haugen B. E., S.R. de Silva, B .K. Datta. A de-Dusting Device for Removing Fines from Pellets, Granules and Coarser Powders. In , 2:453–68. NML Jamshedpur-831 007, India: P Bhattacharvra. R. Singh and N. G. Goswanii. (2000)
- [16] Hilscher E., Friedhoff F., Hirschmann C. Brevet WO 2015096827 A1. Procédé pour la classification de semences (2014)
- [17] Houot R., Joussement R., Concentration gravimétrique. *Technique de l'ingénieur, traité de génie des procédés* (2005)
- [18] Hwang Y., Byoung Gon Kim, Kwang-Hyun Bae, and Hyung Seok Kim. Mechanism and Performance of a Dry Particle Separator Using an Elastic Drum. *International Journal of Mineral Processing* 125: 34–38, (2013)
- [19] Ito M. Brevet US 8353408 B2. Centrifugal air classifier (2006)
- [20] Klein K., Gering D. Fine Screening of Sanding Dust, *AT-Mineral Processing* 46 (7), 23–26 (2004)
- [21] Kluge, W.: *Neuzeitliche Siebmaschinen in der Aufbereitung*, *Erdöl und Kohle* 4, S. 705/711 (1951)
- [22] Kokkilić O., Lanlois R., Waters E., Kristian, A design of experiments investigation into dry separation using a Knelson Concentrator, *Minerals Engineering* 72 73-86 (2015)
- [23] Kroll-Rabotin J.S., Bourgeois F., Climent E., Fluid dynamics based modelling of the Falcon concentrator for ultrafine particle beneficiation. *Mineral Engineering* 23 4 313-320 (2010)

- [24] Lebas S., Maldonado A., Sidoroff G.V., Matrosov A.A., Semenstovki Y.M., Yumashev V.M. Soyuzdornii, Séparation par dureté d'un granulat sur un tambour classificateur, Bulletin de Liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées, 148, 7-12 (1987).
- [25] Luckner M. Brevet EP 1516680 A1 Dispositif et procédé pour le tamisage ou le tri de matières (2005)
- [26] Ma X., Kato K. Effect of Interparticle Adhesion Forces on Elutriation of Fine Powders from a Fluidized Bed of a Binary Particle Mixture. Powder Technology 95 (2): 93–101, (1998)
- [27] Meinel, A. Fine and Very Fine Screening. Mineral Processing 51: 2–8 (2010)
- [28] Meinel, A., The Role and Optimization of Screen Deck and Material Movement on Throw Screens, AT-Mineral Processing 46(7), 42–62 (2004)
- [29] Meinel, A.. Theory and Practice of the Use of the Screening Surface in Throw Screening, Aufbereitungs-Technik/Mineral Processing 46 (7): 4–22. (2005)
- [30] Meinel, A., Design principles and elements for realizing the principal functions of the screening surface of throw screens, AT-Mineral Processing 47 (7), 4–27 (2006)
- [31] Meinel, A.: Sizing difficult-to-screen bulk materials : Fundamental considerations, AT-Mineral Processing 42 (7), 315–326 (2001)
- [32]\*[69] Meinel, A.: Zur Fein-, Mittel- und Grobklassierung auf Wurfisiebmaschinen, AT-Mineral Processing 39 (7), 317-327 (1998)
- [33] Mills S. Brevet EP 2907592 A1 Appareil et procédé de tri (2015)
- [34] Mitchell C., Waterless Fines Removal, Final report Project MA/4/5/002 British Geological Survey, (2007)
- [35] Mogensen, F.: Theorie des Sizer-Verfahrens und Betriebsergebnisse in der Feuerfest-Industrie. Tonindustrie-Zeitung Nr. 4, S. 88/93 (1960)
- [36] Nichols C.W. Brevet EP 0478280 A2, Small particle separator. (1990)
- [37] Nienhaus K., Pretz T., Wotruba H., Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredlung "Sensor Technologies: Impulses for the Raw Materials Industry"(eds.) (2014)
- [38] Paranhos R.S., Cazacliu B., Sampaio C.H., Petter C.O., Neto R.O., Huchet F., A sorting method to value recycled concrete, Journal of Cleaner Production (2015)
- [39] Pettingell, H. An effective dry sand manufacturing process from japan potential to replace natural sand entirely in concrete. Quarry Management Magazine, June. (2008)
- [40] Pezzoli R., Quarantelli C. Brevet EP 0752281 B1, Equipement sélecteur pour poudres et matériaux de fines particules (2002)
- [41] Piriou B., Barakat A., Rouau X., Vaitilingom G. Brevet WO 2015097298 A1, Procédé de fractionnement par voie sèche de biomasse lignocellulosique (2014)
- [42] Ressel J.B. *Particle screening*, CAS Wood Based Panels, Module 1: Process Technology September 7-12, Biel, CH (2015)
- [43] Sampaio C. H., Cazacliu B., Miltzarek G. L., Huchet F., Le Guen L., Petter C. O., Paranhos R., Ambrós W. M., Oliveira M. L. S., Stratification in air jigs of concrete/brick/gypsum particles, Construction and Building Materials 109, 63-72 (2016)
- [44] Schmidt P., Körber R., Coppers M. Sieben und Siebmaschinen: Grundlagen und Anwendung, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2003)
- [45] Shapiro, M., and V. Galperin. Air Classification of Solid Particles: A Review." Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 44 (2): 279–85. (2005)
- [46] Singh, V., Rao S. M. Selective Classification of Mineral Sand Slimes in an Air Fluidized Bed. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review 31 (2): 59–72, (2010)
- [47] Sparks R.E. Brevet WO 2003013743 A1. Trieuse pneumatique de séparation de particules (2003)

- [48] Staquet F., Grymonprez B. Rapport d'études et essais CTP/UNPG, Recensement et étude comparative des méthodes industrielles de séparation des fines des sables de carriers concassés 0-4 mm, Doc-16O-03, (2013)
- [49] Stebbins A. H. Brevet US 1861248 A. Air classifier (1932)
- [50] Tsakalakis, K, Some Basic Factors Affecting Screen Performance in Horizontal Vibrating Screens', the European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection, vol.1303, pp. 42-54 (2001)
- [51] Turnbull S.D.S. Brevet EP 1511559 A1, Crible/malaxeur (2005)
- [52] Ulsen C., Khan H., Hawlitschek G., Masini E.A., Angulo S.C., Separability studies of construction and demolition waste recycled sand. Waste Management 33 656-662 (2013).
- [53] van der Putten W., Gering D. Mogensen Sizer technology for processing sand for renders and mortar renders. ZKG INTERNATIONAL 62 (8)51-56 (2009)
- [54] Wigum, B.J., Danielsen S.W., Hotvedt O., Pedersen B. Production and Utilisation of Manufactured Sand. COIN Project report 12. SINTEF Building and Infrastructure. (2009)
- [55] Wills B.A. Napier-Munn T.J., Mineral Processing Technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. Elsevier Science & Technology Books, 7<sup>th</sup> Edition (2005)
- [56] Xing W., Hendricks R., Decontamination of granular wastes by mining separation techniques. Journal of Cleaner Production 14 748-753 (2006)
- [57] Yates A.J. Brevet EP 0972435 A2, Dispositif pour le criblage de terre, (2000)
- [58] Champeau B., Potin J-N. Valorisation des sables, Mines et Carrières, n°207, 41-49 (2003)
- [59] Acrowood, [www.acrowood.com/diamondroll-screens/diamondroll-particle-screens](http://www.acrowood.com/diamondroll-screens/diamondroll-particle-screens) consulté le 16 juin 2016
- [60] Allgaier, [www.allgaier.de, Tumbler Screening Machines TSM / tsi. Maximum screening quality for fine and ultra-fine products](http://www.allgaier.de/Tumbler%20Screening%20Machines%20TSM%20-%20tsi.%20Maximum%20screening%20quality%20for%20fine%20and%20ultra-fine%20products), consulté le 16 juin 2016
- [61] C2CA , [www.c2ca.eu/custom/page/page\\_block/c2caproject-1.pdf](http://www.c2ca.eu/custom/page/page_block/c2caproject-1.pdf) consulté en 12 mai 2016
- [62] DP Pulveriser, [www.dppulveriser.com/air\\_classifier.htm](http://www.dppulveriser.com/air_classifier.htm) consulté le 20 juin 2016
- [63] Fuji Kogyo, [www.fujikogyo.co.jp/HP-English/triso/triso.html](http://www.fujikogyo.co.jp/HP-English/triso/triso.html) consulté le 20 juin 2016
- [64] Gkm, [www.gkm-net.de/fr/tamiseur-a-nutation-ultime](http://www.gkm-net.de/fr/tamiseur-a-nutation-ultime) consulté le 16 juin 2016
- [65] Kason, [www.kason.com/Centrifugal-Screeners-Separators](http://www.kason.com/Centrifugal-Screeners-Separators) consulté le 20 juin 2016
- [66] Lleal, [www.lleal.com/fr/producto/tamis-micra-200](http://www.lleal.com/fr/producto/tamis-micra-200), Micra 200, consulté le 16 juin 2016
- [67] Met-Solve, [www.met-sovelabs.com/library/articles/mineral-processing-introduction](http://www.met-sovelabs.com/library/articles/mineral-processing-introduction) consulté le 2 juin 2016
- [68] Metso, [www.metso.com](http://www.metso.com), Basics in Minerals Processing, consulté le 3 juin 2016
- [69] Mogensen, [www.mogensen.de/fra/technique-de-criblage-cribles.htm](http://www.mogensen.de/fra/technique-de-criblage-cribles.htm) consulté le 2 juin 2016
- [70] Pelletron, [www.pelletroncorp.com](http://www.pelletroncorp.com), DeDuster® Anthology – The Complete Guide, consulté le 25 juin 2016
- [71] Rotex, [www.rotexscreeners.co.uk](http://www.rotexscreeners.co.uk), Product bulletin, Rotex® screener, consulté le 25 mai 2016
- [72] Russell, [www.russellfinex.com/fr/service-apres-vente/options-tamiseurs-vibrants/systemes-de-decolmatage](http://www.russellfinex.com/fr/service-apres-vente/options-tamiseurs-vibrants/systemes-de-decolmatage) consulté le 16 juin 2016
- [73] Separator Engineering, [www.separatorengineering.com/Sturtevant\\_Whirlwind\\_Air\\_Classifier.htm](http://www.separatorengineering.com/Sturtevant_Whirlwind_Air_Classifier.htm) consulté le 3 juin 2016
- [74] Telsonic, [www.telsonic.com/en/screening/dedusting](http://www.telsonic.com/en/screening/dedusting) consulté le 20 juin 2016
- [75] Tema, [www.tema.co.uk/products/screening-machines/liwell-flip-flow-screening-machines](http://www.tema.co.uk/products/screening-machines/liwell-flip-flow-screening-machines) consulté le 20 juin 2016
- [76] Duong J-C. Brevet EP 0263015 A2. Dispositif de tri optique pour séparer deux catégories de particules ayant des transmissivités optiques différentes (1988)
- [77] Johansson, R. Air Classification of Fine Aggregates. Doktorsavhandlingar Vid Chalmers Tekniska Högskola, N.S., 3817. Göteborg: Chalmers Univ. of Technology (2014)

- [78] Wagner, D., Mitchell C. J. Waterless Fines Removal: Technical Feasibility of Using Air Classification to Separate Fines from Sand and Gravel. British Geological Survey, Report CR/07/010N, (2007)
- [79] Hosokawa, [www.hosokawa.co.uk/product/mzm-and-mzf-zigzag-classifiers](http://www.hosokawa.co.uk/product/mzm-and-mzf-zigzag-classifiers) consulté le 28 juin 2016
- [80] Bradley Pulverizer, [www.bradleypulverizer.com/windsifter-air-classifier](http://www.bradleypulverizer.com/windsifter-air-classifier) consulté le 28 juin 2016
- [81] Florea, M. V. A., Brouwers H. J. H. Properties of Various Size Fractions of Crushed Concrete Related to Process Conditions and Re-Use. Cement and Concrete Research 52: 11–21. (2013)
- [82] Patil, D. P., Parekh B. K. Beneficiation of Fine Coal Using the Air Table. International Journal of Coal Preparation and Utilization 31 (3-4): 203–22. (2011)
- [83] Jong, T.P.R. de, Density separation of non-ferrous metals by jigging and fluidization. Ph.D.-Study Delft University of Technology, Delft. (1999)
- [84] Houwelingen J.A. van, Jong, T.P.R. de, Dry cleaning of coal : review, fundamentals and opportunities, Geologica Belgica 7/3-4: 335-343, (2004)
- [85] Callen, A., Moghtaderi B., Galvin K. P. Use of Parallel Inclined Plates to Control Elutriation from a Gas Fluidized Bed. Chemical Engineering Science, Fluidized Bed Applications, 62 (1–2): 356–70. (2007)
- [86] Lu H., Li J., Guo J., Xu Z. Movement Behavior in Electrostatic Separation: Recycling of Metal Materials from Waste Printed Circuit Board. Journal of Materials Processing Technology 197 (1–3): 101–8. (2008)
- [87] Cepuritis R., Jacobsen S., Onnela T. Sand Production with VSI Crushing and Air Classification: Optimising Fines Grading for Concrete Production with Micro-Proportioning. Minerals Engineering 78: 1–14. (2015)
-