

## Classification par dimension (cribles et cyclones)

### 6.1 Objectifs de la classification

Lors de la réalisation pratique de la comminution, il est préférable de séparer les particules ayant la dimension requise de celles qui ont une dimension trop grande et que l'on va fracturer. Nous sommes donc amenés à classer les particules en deux ou plusieurs fractions suivant leur dimension.

Également, de nombreux procédés de séparation des minéraux ne fonctionnent bien qu'entre des limites - parfois précises - de dimension. D'autre part, dans la plupart des procédés, les très fines particules (moins d'un micron) qui représentent parfois des minéraux altérés (argiles, etc.) doivent être séparées du reste car elles ne sont pas traitables ou nuisent au bon fonctionnement du procédé de traitement. Dans certains cas, le produit commercial doit répondre à certaines normes au point de vue dimensions - d'où la nécessité encore de classer les particules par dimension (cas de l'amiante).

La méthode la plus évidente pour classer des particules est sans aucun doute le tamisage, qui consiste à passer les particules sur un crible qui laisse passer seulement les particules ayant une dimension inférieure à la grandeur de la maille.

### 6.2. Principe du criblage

Le criblage est réalisé par projections périodiques de matériaux sous l'effet de vibrations qui ont pour rôle :

- de disperser le matériau à cribler et de présenter les particules devant les vides de la surface criblante ;
- de dégoujonner les mailles ;
- de transporter le matériau vers l'extrémité de l'appareil.

La composante verticale du mouvement vibratoire disperse les matériaux et casse les agglomérats ; la composante d'avancement permet la progression des produits.

Les valeurs fondamentales intervenant sur le processus de criblage sont :

- l'amplitude  $a$  des vibrations ;
- la vitesse de rotation  $\omega$  ;
- l'angle de projection  $\alpha$  des particules ;
- l'angle d'inclinaison  $\beta$ .

Les constructeurs distinguent deux accélérateurs spécifiques :

- l'**accélération mécanique**  $\gamma_m$  qui s'exerce sur tous les composants du crible et qui a pour expression :  
$$\gamma = a \cdot \omega^2 / g$$

Avec  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  ;

- l'**accélération des matériaux**  $\gamma_p$  qui est l'accélération verticale à laquelle sont soumises les particules au moment où elles retombent sur la toile et qui a pour expression :

$$\gamma_p = \gamma_m \sin(\alpha + \beta) / \cos \beta$$

L'angle de projection  $q$  par rapport à la verticale s'écrit :

$$\theta = \sin^{-1}(g/a \omega^2 \sin \alpha) = \sin^{-1}\left(\frac{1}{\gamma_p}\right)$$

Et la vitesse initiale de projection :

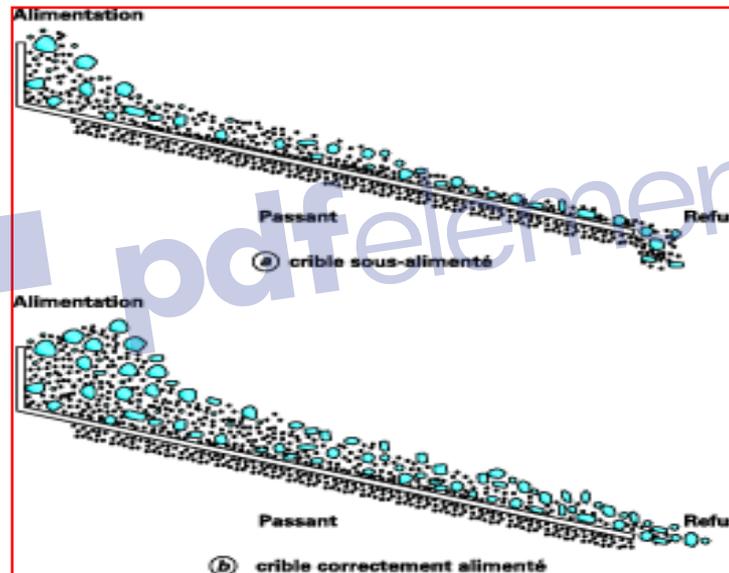
$$v = \omega \cos \beta$$

L'ampleur des micro-projections doit être en relation avec la dimension des mailles. L'idéal serait que, à chaque bond, la particule retrouve une ouverture. En conséquence, les grandes amplitudes sont utilisées pour le criblage dont les mailles sont grossières et les petites amplitudes pour le tamisage fin. La pente du crible est inversement proportionnelle à la dimension des mailles donc aux amplitudes du crible.

### 6.2.1. Stratification

Du fait de la vibration de la surface criblante, les particules les plus grosses se retrouvent dans la partie la plus haute du lit de matière, tandis que les plus fines passent à travers les interstices et se concentrent dans la partie la plus basse du lit. Ce phénomène de différenciation se nomme *stratification*.

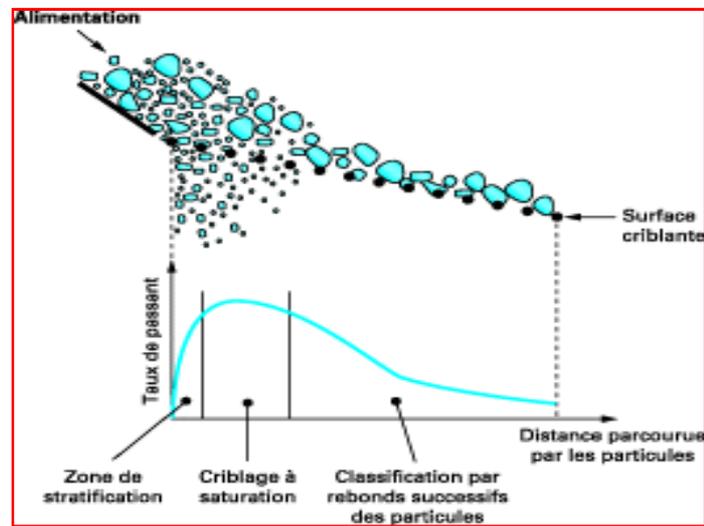
Sans stratification de la matière, la séparation ne serait pas envisageable. Il existe une épaisseur optimale du lit de matière pour que la stratification intervienne dans les meilleures conditions : un lit trop fin (figure 2a) entraîne une réduction de l'efficacité, tandis qu'un lit trop épais provoque l'altération de la stratification, amortit le mouvement du lit et diminue la précision de la coupure.



**Figure 2** - Influence de la stratification sur la classification

Le phénomène de stratification est cependant très complexe. En effet, pendant le criblage, se combinent le processus de stratification-ségrégation et le passage des grains suffisamment fins à travers les ouvertures du tamis. Le processus de ségrégation est plus rapide que celui du passage à travers la surface de criblage. Les vitesses des deux processus sont distinctes. La vitesse de passage dépend en priorité des dimensions relatives des particules et des ouvertures.

La vitesse du processus de stratification-ségrégation dépend de l'épaisseur du lit de matière sur le crible et des dimensions des particules dans leur environnement. Une représentation du phénomène doit ainsi tenir compte des différentes fractions granulaires du matériau : le lit de matière au contact avec le crible comporte différentes couches contenant des proportions variables des fractions granulaires considérées (figure 3).



**Figure 3** - Pourcentage relatif passant à travers une surface criblante (Doc. Hewitt-Robins Int.)

En pratique, on considère que la fraction granulométrique critique est constituée par les grains de dimension comprise entre 0,7 et 1,5 fois celle de la maille de la surface criblante.

Lors de la conception d'une installation de criblage, il faut tenir compte de l'épaisseur optimale du lit qui varie avec la dimension des particules à séparer. Pour ce faire, la largeur d'un crible doit être prévue de telle façon que l'épaisseur du lit soit optimale. Pour régler la marche d'un crible (surtout dans le cas des cribles à haute fréquence), si l'on désire que les matériaux grossiers soient bien criblés, il faut choisir une grande amplitude de vibration et une fréquence faible. Pour les matériaux fins, on a des conditions inverses. En outre, plus le matériau est fin, plus l'angle du crible doit être aigu.

L'humidité d'un produit, quand elle est importante, perturbe le processus de stratification des grains dans le lit. Elle est responsable de l'obturation progressive des ouvertures de la surface criblante jusqu'à empêcher la séparation des grains fins et grossiers.

### 6.3. Capacité d'un crible

Dans tous les cas, il faut considérer séparément, pour chaque type de crible :

- sa **capacité de transport**, débit total admissible sur la surface criblante, fonction de l'épaisseur de la couche à traiter et de la vitesse de progression des produits ;
- sa **capacité de passage**, débit possible de traversée de la surface criblante, elle-même fonction, d'une part, de la nature de la surface criblante (dimension, forme et disposition des ouvertures, taux de surface libre), d'autre part, de la nature du mouvement du crible, et en dernier lieu, de la répartition granulométrique, de la nature et de la forme des grains de la masse à cribler.

La **capacité de criblage** est en fait un compromis entre les deux capacités précédentes.

Le criblage mécanique repose sur la probabilité de passage du grain à travers la surface criblante. Ces chances sont fonction de la trajectoire des grains (vitesse, direction), de la forme et de l'épaisseur de l'orifice ou du nombre d'orifices successifs que peut rencontrer un grain donné.

La probabilité de passage pour un grain de dimension égale à 0,9 fois celle de l'ouverture est d'environ 1 %, c'est-à-dire que pour cribler la totalité des grains de cette dimension, il faut un minimum de 100 ouvertures sur la trajectoire de chaque grain.

On appelle **grains difficiles** ceux dont la dimension est comprise entre 0,70 et 1,5 fois celle de l'ouverture : ils constituent la **fraction critique**. Cette notion est extrêmement utile pour l'appréciation de la capacité de criblage.

Les facteurs qui affectent cette capacité sont, indépendamment des paramètres liés au crible :

- le pourcentage de passant, c'est-à-dire de grains de maille inférieure à celle du crible ; plus il est faible plus la difficulté de l'extraction est grande ;
- le pourcentage de grains difficiles (fraction critique) ; plus il est élevé, moins la séparation est efficace ;
- le pourcentage en eau ; l'humidité agit sur la viscosité et sur la tendance des fines à colmater en adhérant autour ;
- la forme des grains ; selon le coefficient de forme des diverses espèces triées (rondes ou esquilleuses [longilignes ?]), la séparation est plus ou moins facile.

#### 6.4. Estimation de la qualité d'un criblage

Aucune opération industrielle ne produisant de résultats parfaits, le criblage est donc affecté par un certain nombre de facteurs pouvant entraîner des écarts avec la réalité, par exemple :

- les tolérances d'exécution des surfaces criblantes ;
- la détérioration accidentelle des surfaces criblantes qui peuvent introduire des perturbations qui ne sont pas immédiatement décelables ;
- les rapports d'équivalence (tableau 2) qui tiennent compte des différences de forme ou d'inclinaison des ouvertures et qui ne sont que des approximations ;
- les trajectoires des grains au voisinage des surfaces ;
- la longueur du crible, qui est forcément limitée et ne permet pas d'obtenir une probabilité de passant de 100 % ;
- les appareils de contrôle utilisés en laboratoire, qui peuvent avoir des problèmes de maintenance ; il est de nos jours possible de contrôler ces tamis sur des bancs d'examen

##### 6.4.1. Courbes granulométriques

Pour définir les caractéristiques granulaires des passants et des refus, on détermine leur distribution granulaire et leurs **courbes granulométriques** par **tamissage (analyse granulométrique)** au laboratoire au moyen de tamis à mailles carrées. Ces courbes, représentées sur un même graphique, se coupent en un point qui est la valeur effective de la maille de coupure et délimitent une aire représentant les déclassés. Cette maille de coupure est toujours inférieure à la maille du crible.

##### 6.4.2. Estimateurs de criblage

À partir des répartitions granulaires des différents produits d'une opération de criblage, on calcule des estimateurs de ces opérations. On distingue deux situations :

- si la quantité d'égarés de dimension supérieure à la maille du crible (ou à la maille de coupure) est faible, ou négligeable, ce qui est le cas de la plupart des criblages grossiers supérieurs à 1 mm, on utilisera des **rendements** qui caractérisent l'écart entre l'opération réelle et la coupure théorique ;
- par contre, si la quantité d'égarés n'est plus négligeable aussi bien dans le refus que dans le passant, on préfère tracer des courbes statistiques ou courbes de partage et déterminer une maille effective de coupure et un coefficient d'imperfection. Il reste néanmoins possible de calculer des rendements

##### 6.4.2.1. Efficacité de criblage – Rendement de criblage

- Si on veut caractériser la qualité du passant, on utilise le rendement de passage  $R_1$  ou **efficacité  $E$** , qui est le rapport exprimé en pourcentage entre la fraction fine inférieure à la maille effectivement récupérée (ou passant) et la fraction théorique récupérable. Cette efficacité peut être calculée dans le domaine de la zone critique (**0,70  $M$  à 1,5  $M$** ,  $M$  étant la maille du crible). Industriellement, l'efficacité d'un crible varie de 75 à 95 %, de 60 à 90 % en zone critique.

- Si on ne prend en compte que les fines inférieures à la maille, on parle de **rendement organique en fines**  $V_f$  qui est le rapport massique entre le passant et l'alimentation.
- Si, au contraire, on s'intéresse au refus du crible, on parle alors de **rendement d'épuration**  $R_2$  (aussi appelé **rendement de criblage**) qui est le rapport exprimé en pourcentage entre le refus théorique et le refus réel.

Si on appelle  $M_a$ ,  $M_p$  et  $M_r$  les masses respectives de l'alimentation, du passant et du refus et  $a$ ,  $p$  et  $r$  les pourcentages massiques de grains de dimension inférieure à la dimension de la maille dans l'alimentation, le passant et le refus, les rendements définis précédemment peuvent s'écrire :

$$R_1 = E = 100 \frac{M_p p}{M_a a}$$

- Si on ne prend en compte que les fines inférieures à la maille, on parle de rendement organique en fines  $V_f$ , qui est le rapport massique entre le passant et l'alimentation.

$$V_F = 100 \frac{M_p}{M_a}$$

- Si, au contraire, on s'intéresse au refus du crible, on parle alors de rendement d'épuration  $R_2$  (aussi appelé rendement de criblage) qui est le rapport exprimé en pourcentage entre le refus théorique et le refus réel.

Si on appelle  $M_a$ ,  $M_p$  et  $M_r$  les masses respectives de l'alimentation, du passant et du refus et  $a$ ,  $p$  et  $r$  les pourcentages massiques de grains de dimension inférieure à la dimension de la maille dans l'alimentation, le passant et le refus, les rendements définis précédemment peuvent s'écrire :

$$R_2 = 100 \frac{M_a(100 - a)}{M_r}$$

On assimile généralement  $p$  à 100 (sauf dans le cas où les déclassés sont trop importants).

En écrivant les équilibres massiques,

$$R = E = \frac{100(100(a - r))}{a(100 - r)}$$

$$V_F = \frac{100(a - r)}{(100 - r)}$$

$$R_2 = (100 - r)$$

On arrive aux relations suivantes :

$$M_a = M_p + M_r$$

$$aM_a = pM_p + rM_r$$

#### 6.4.2.2. Courbe de partage

Cette courbe rend compte de la variation du degré de partage en fonction de la dimension du grain. La pente de la courbe idéale est verticale. En fait, c'est une courbe obtenue en portant en abscisse la dimension  $D$  des grains (souvent en échelle logarithmique) et en ordonnée le pourcentage en masse de la fraction granulométrique ( $D + e$ ,  $D - e$ ) de l'alimentation (ou du tout-venant) qui reste dans le refus (échelle linéaire en général).

La qualité d'une séparation peut être mise en évidence par la courbe de partage. Plus la pente de cette courbe se rapproche de la verticale, le résultat est meilleur.

Par transformation mathématique (anamorphose de Galton), la courbe de partage s'exprime sous la forme d'une droite.

#### 6.4.2.3. Maille effective de coupure (ou $D_{50}$ )

C'est la dimension pour laquelle les grains se séparent de façon égale entre le passant et le refus, qui ont donc autant de chances d'aller dans le passant que dans le refus.

En général, cette maille n'est pas égale à la maille du tamis (maille nominale) monté sur le crible. Cette maille, à toile tamisante identique, varie en fonction de certains paramètres comme le sens de rotation et la vitesse du vibreur, l'inclinaison et l'arrosage du crible.

Si l'on ne tient compte que des produits obtenus, la maille effective de coupure est bien la caractéristique essentielle de la séparation.

#### 6.4.2.4. Coefficient d'imperfection (imperfection I)

C'est le rapport de l'écart probable moyen ( $epm = I =$  demi-différence entre les abscisses des points d'ordonnées 75 et 25 de la courbe de partage) à la maille théorique de coupure  $D_{50}$  :

$$I = \frac{D_{75} - D_{25}}{2D_{50}}$$

Il est lié à la pente de la courbe de partage en son milieu. Plus l'imperfection n'est faible, la coupure est meilleure. On retrouve bien les conditions aux limites si  $D_{75} = D_{25}$ ,  $I = 0$  et la courbe de partage est alors la droite verticale qui représente la **classification parfaite**.

En cas de tests comparatifs entre plusieurs types de tamis à un même débit, le meilleur matériel est celui qui délivre une maille effective de coupure la plus proche possible de la maille imposée de coupure avec l'imperfection minimale.

On peut remédier à un écart par rapport à la maille imposée, mais il est plus difficile de réduire l'imperfection, car elle met en cause la conception même du crible.

### 6.5. Classification par hydrocyclones

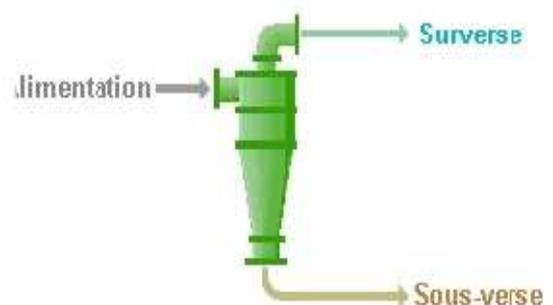
#### 6.5.1. Description

La classification par hydrocyclones est un procédé de classement des particules basé sur leur réponse à un fluide en mouvement, à leur vitesse de sédimentation dans un fluide sous l'action d'une accélération centrifuge. Dans le chapitre précédent sur l'hydrodynamique des particules, on a vu que la vitesse de sédimentation dépend de plusieurs variables, notamment la dimension, la forme et la masse volumique des particules. Les machines de classification fonctionnent par *équivalence*, toutes choses égales par ailleurs, la forme et la densité des particules interviennent autant que la dimension.

Par opposition à la classification par criblage, la classification par hydrocyclones n'est donc pas un classement par dimension seulement.

L'hydrocyclone est un appareil de classification continue, se caractérisant par l'absence de parties mobiles et utilisant la force centrifuge pour accélérer la sédimentation des particules.

On y distingue une zone d'**alimentation** cylindrique, une partie inférieure conique de **sousverse** et une partie supérieure de **surverse**.



### 6.5.2. Principes d'opération

La pulpe est introduite sous pression dans la zone d'alimentation à travers une entrée tangentielle, qui permet de donner à la pulpe un mouvement de type hélicoïdal (figure suivante à droite). Ceci génère un vortex dans le cyclone avec une zone de basse pression tout au long de l'axe vertical où se développe une colonne centrale d'air, comme résultat de l'air aspiré de l'extérieur via l'apex et celui aspiré de la pulpe descendante. La buse de surverse est normalement prolongée vers l'intérieur du cyclone par une section courte appelée "vortex finder", qui a comme but d'éviter le court-circuitage de particules de l'alimentation vers la surverse.

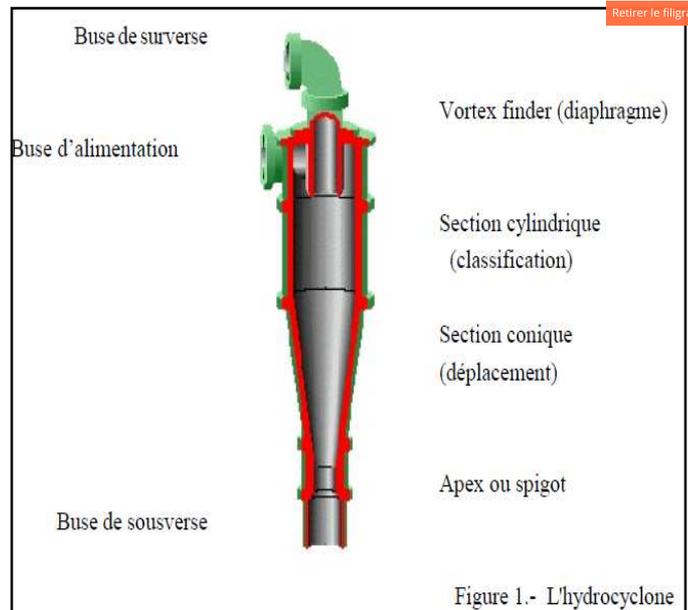
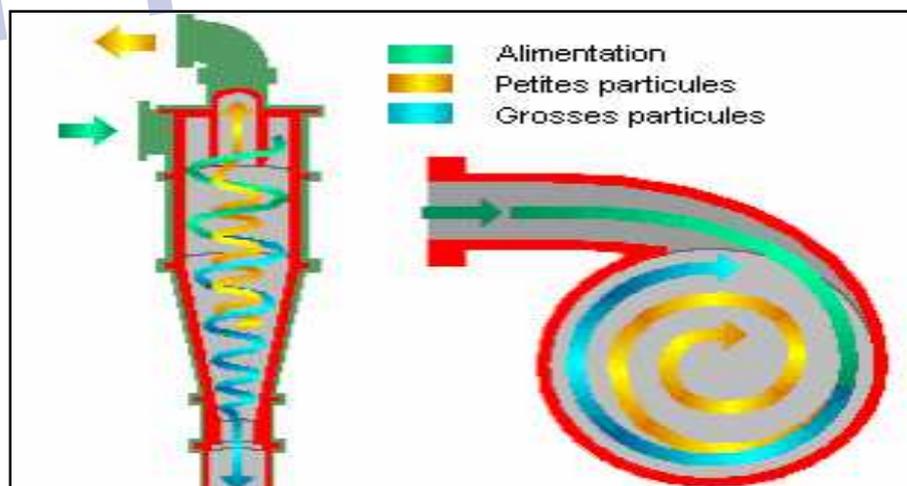


Figure 1.- L'hydrocyclone

Les particules entrant dans le cyclone se voient alors soumises à deux forces opposées: une force centrifuge (vers la périphérie) et une force de friction (orientée vers le centre du cyclone). Les particules les plus grossières ou/et les plus lourdes seront dirigées davantage vers la paroi du cyclone, où la vitesse est inférieure, et se déplaceront graduellement vers l'apex (sousverse), toujours le long de la paroi. Les particules à sédimentation plus faible (petites et/ou légères) seront moins poussées vers la paroi, de sorte que le noyau d'air ascendant les entraînera facilement vers la sortie supérieure (surverse) avec la majeure partie de l'eau d'alimentation. Évidemment, il existe une position radiale dans le cyclone où la vitesse axiale est nulle, de sorte que les particules s'y trouvant (vitesse nulle) ont la même chance d'aller à la surverse que d'aller à la sousverse.



**Figure 2.** (a) Écoulement à l'intérieur du cyclone, (b) zones de classification (Renner)

Certains auteurs (Renner et Cohen) ont supposé que la classification ne se fait pas sur toute la longueur du cyclone, mais plutôt dans une courte section entre la zone d'alimentation et la partie supérieure de la zone conique.

Les particules classifiées sont alors poussées vers l'apex (celles se trouvant près de la paroi) par les nouvelles particules alimentées, tandis que les particules fines (près du noyau central) sont entraînées par l'air ascendant (figure ci-dessus à droite).

### 6.5.3 Distribution des profils de vitesse

L'allure générale de l'écoulement de la pulpe dans le cyclone est représentée sur la figure précédente à gauche. La variation des composantes de la vitesse d'écoulement est représentée schématiquement sur la figure suivante. On notera les éléments essentiels suivants:

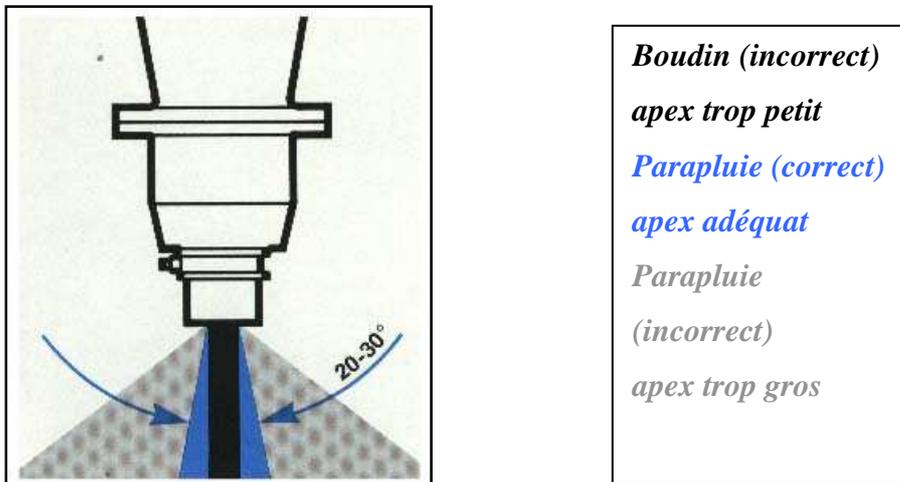


Figure 3. Distribution des profils de vitesse

**Vitesse axiale,  $w$** : il existe une zone à vitesse axiale nulle qui suit le profil du cyclone.

**Vitesse radiale,  $u$** : plus petite que les deux autres composantes, elle est dirigée vers l'axe du cyclone et décroît de la périphérie à l'axe.

**Vitesse tangentielle,  $v$** : elle passe dans la zone située au-dessous du diaphragme de décharge par un maximum situé à une distance de l'axe légèrement inférieure au diamètre du diaphragme, au voisinage du vortex central. La partie décroissante de la courbe peut être décrite par une fonction du type:  $v^* r^n = cte$ . ( $n$  habituellement compris entre 0.5 et 0.9), alors que l'équation d'un vortex idéal (pour lequel il n'y aurait pas de frottement) serait  $v^* r = cte$ . Au-dessus du diaphragme, le maximum apparaît plus loin de l'axe. Il existe des perturbations importantes au niveau des parois et du vortex.

À part cela, la distribution des vitesses est quasiment indépendante de la hauteur dans le cyclone et les surfaces à vitesse tangentielle égale sont des cylindres verticaux.

### 6.5.4 Applications

**Séparations solide-liquide**: à tel objet, on utilise des cyclones pouvant travailler soit en clarificateur pour obtenir une surverse claire, soit en épaisseur pour obtenir une sousverse de teneur en solide spécifiée. Dans cette optique, les contraintes de cisaillement élevées qui interviennent dans les cyclones peuvent avoir un effet défavorable car elles rompent les agglomérats de particules.

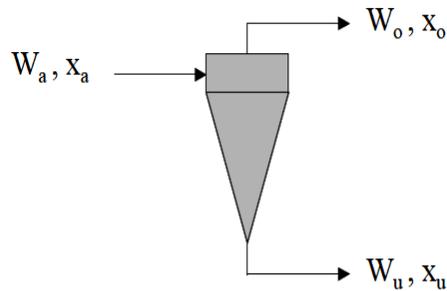
**Séparations solide-solide**: dans ces cas, le cyclone agit en classificateur. On recherche alors tout particulièrement une imperfection minimale. Pour cette utilisation, les forces de cisaillement sont favorables. On peut distinguer deux formes extrêmes de classification: le deschlammage (élimination des très fines particules) et le débouage (élimination des particules grossières).

### 6.6. Caractérisation du fonctionnement d'un hydrocyclone

On peut représenter l'opération d'un cyclone de classification par le diagramme suivant, où nous appellerons  $A$  l'alimentation,  $O$  la surverse et  $U$  la sousverse. Chacun de ces flux ( $j$ ) est décrit par une

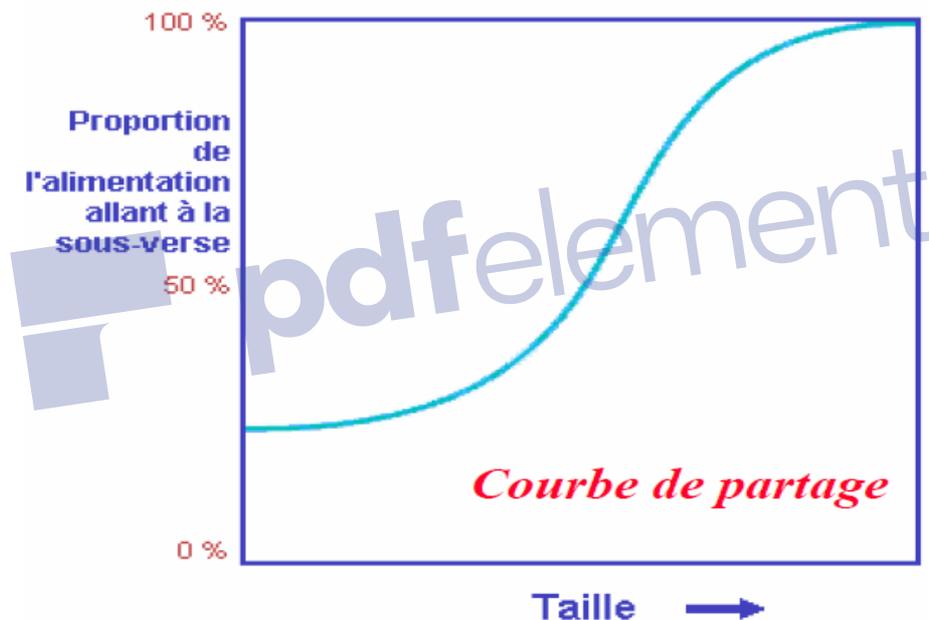
certaine distribution granulométrique  $x_j = f_j(d)$ , un débit massique de solides  $T_j$ , une densité de pulpe  $D$ , et par un pourcentage en solides  $t_j$ .

Le problème est de déterminer la dimension de coupure du classificateur et d'avoir une idée sur la perfection de la séparation.



### 6.3.1 Courbes de partage

On appelle *courbe de partage* d'un classificateur, la courbe obtenue en portant en abscisse le logarithme de la dimension  $d$  et en ordonnée la fraction en poids de la classe  $d-\epsilon/d+\epsilon$  de l'alimentation qui passe dans la sousverse. On peut également dire que la courbe de partage représente (en ordonnée) la probabilité de passage dans la sousverse d'une particule de dimension  $d$ .



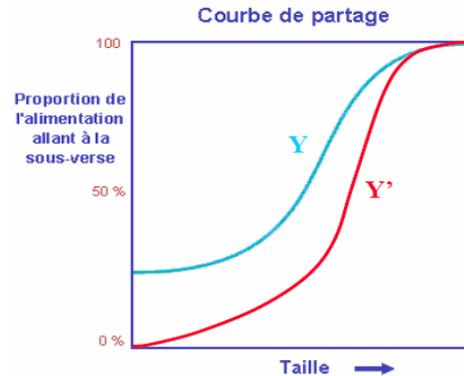
Si le classificateur fonctionnait de manière parfaite, réglé à la dimension  $d_0$ , toutes les particules ayant une dimension inférieure à  $d_0$  iraient à la surverse et toutes les particules ayant une dimension supérieure à  $d_0$  iraient à la sousverse; la courbe de partage aurait alors la forme indiquée par la ligne pointillée à la figure antérieure. Pour une séparation réelle, la courbe de partage a généralement la forme d'un S (ligne continue) et on définit le point de réglage du classificateur (diamètre d'équicoupure,  $d_{50}$ ) comme le point correspondant à 50% sur la courbe de partage.

L'écart entre la courbe de partage réelle et la courbe idéale est une mesure de la perfection (ou imperfection) de la séparation. On peut exprimer cette imperfection sous forme de l'acuité de la séparation qui correspond à la pente de la courbe de partage.

### 6.3.2 Soutirage, courbe de partage corrigée

Dans les classificateurs industriels, il est inévitable qu'une certaine partie du fluide porteur soit entraînée à la sousverse. Les particules très fines suivent l'eau et vont en partie donc reporter à la sousverse; le point sur la courbe de partage correspondant à la dimension zéro (asymptote à l'axe des abscisses) correspondrait à la fraction de très fines particules alimentées se retrouvant à la sousverse (ce qu'on appelle le soutirage  $s$ ). Étant donné qu'il n'est pas possible d'évaluer cette fraction de fines particules (les instruments disponibles ne le permettent pas), on associe cette ordonnée à l'origine avec la fraction de l'eau alimentée qui se retrouve à la sousverse (appelée récupération d'eau à la sousverse,  $Rf$ ) qui elle, est facile à déterminer à partir des valeurs de débit massique et de pourcentage en solides des trois flux de l'hydrocyclone (alimentation, surverse et sousverse).

présentation graphique de ces paramètres est la courbe de partage



Pour comparer la marche du classificateur dans des conditions semblables de soutirage, on définit la courbe de partage anamorphosée ou courbe de classification ( $Y'$ ), la courbe de partage obtenue en supposant un soutirage égal à 0 (Figure soudessous). Soit  $Y$  l'ordonnée de la courbe de partage, alors l'ordonnée de la courbe de partage anamorphosée ou corrigée  $Y'$ , dans le cas d'un soutirage  $s$ , est donné par:

$$Y'_i = 100 \cdot \frac{Y_i - s}{100 - s}$$

On définit le diamètre d'équicoupe corrigé ( $d'_{50}$ ,  $d_{50c}$ ) comme le  $d_{50}$  de la courbe  $Y'$ .

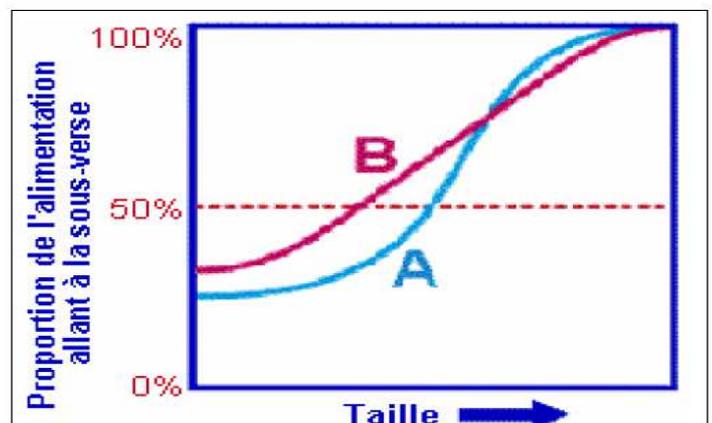
On définit l'imperfection corrigée du classificateur par:

$$I = \frac{d'_{75} - d'_{25}}{2 d'_{50}}$$

Pour une séparation parfaite  $I = 0$ , plus  $I$  est grand, plus le classificateur travaille de manière imparfaite. On définit également la courbe de partage réduite comme la courbe obtenue en portant en ordonnée l'ordonnée de la courbe de partage corrigée et en abscisse le rapport  $d/d_{50}$  (Figure droite).

Ces courbes permettent de comparer les imperfections.

Quelle classification est meilleure?



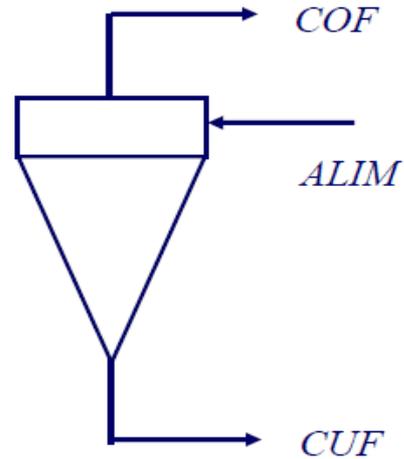
## Analyse de performance d'un cyclone de laboratoire

- **Mesures (trois flux)**

- masse volumique ( $\rho$ )
- pourcentage de solides ( $t$ )
- granulométrie ( $\xi$ )

- **Calculs à faire**

- partage de solides ( $w_u/w_o$ )
- performance  $Y_i$
- soutirage d'eau  $R_f$
- classification  $Y'_i$
- $d_{50}$  et  $m$



**Avec :**

ALIM : Alimentation

COF : Fraction Overflow (Survers)

CUF : Fraction Underflow (Sousvers)

Soit un cyclone alimenté avec un *débit volumique de pulpe*  $Q_A$ . Soit  $\rho_A$  la masse volumique de la pulpe alimentée et  $t_A$  le pourcentage de solide en poids. Les données équivalentes pour la surverse et la sousverse sont  $Q_O$ ,  $\rho_O$ ,  $t_O$ , et  $Q_U$ ,  $\rho_U$ ,  $t_U$ , respectivement. On connaît la distribution granulométrique des trois produits,  $X_A$ ,  $X_U$ , et  $X_O$ . **Le problème est de trouver la courbe de partage du cyclone** à partir de ces données.

Le premier calcul que nous devons effectuer est le calcul de la fraction des solides alimentés qui se retrouve à la sousverse.

**Un bilan volumique de pulpe donne:**

$$Q_A = Q_O + Q_U$$

**Un bilan massique de solides donne:**

$$\text{Solides en A} = \text{solides en O} + \text{solides en U}$$

**Le débit massique de solides dans chacun de ces flux** (ex. l'alimentation) est donné par:

$$w_A = Q_A * \rho_A * t_A$$

où  $\rho_A$ , la masse volumique de la pulpe alimentée, est reliée à la fraction de solides (en poids)  $t_A$  par:

$$\rho_A = \frac{\rho_s}{t_A + \rho_s (1 - t_A)}$$

avec  $\rho_s$  = masse volumique des solides.

En reportant dans l'équation de bilan massique de solides, il vient:

$$Q_A * \rho_A * t_A = Q_O * \rho_O * t_O + Q_U * \rho_U * t_U$$

Le terme  $w = (Q_U * \rho_U * t_U) / (Q_A * \rho_A * t_A)$  est la fraction en poids de l'alimentation qui se retrouve à la sousverse.

Nous devons maintenant calculer le soutirage, soit la fraction de l'eau de l'alimentation qui se retrouve à la sousverse. Pour cela, nous devons écrire le bilan d'eau dans le cyclone:

le bilan d'eau dans le cyclone :

$$Q_A * \rho_A * (1-t_A) = Q_O * \rho_O * (1-t_O) + Q_U * \rho_U * (1-t_U)$$

La fraction  $S$  est le soutirage d'eau:

$$S = [Q_U * \rho_U * (1-t_U)] / [Q_A * \rho_A * (1-t_A)]$$

Pour calculer la courbe de partage, nous établissons un bilan de matière sur le matériel dans la classe  $i$  :

$$W_A X_{Ai} = W_O X_{Oi} + W_U X_{Ui} \quad (1)$$

Et sur la masse totale de solides:

$$W_A = W_O + W_U \quad (2)$$

où

$W_O$  = débit de solide sec à la surverse (overflow)

$W_U$  = débit de solide sec à la sousverse (underflow)

$W_A$  = débit de solide sec à l'alimentation

$x_i$  = fraction de solides retenus à la classe  $i$

La solution du système d'équations (1-2) permet de calculer le rapport de charge circulante:

$$\frac{\omega_U}{\omega_O} = \left[ \frac{x_A - x_O}{x_U - x_A} \right]_i$$

On obtient normalement une valeur de  $W_U/W_O$  pour chaque classe. Une valeur moyenne peut être obtenue à partir de la pente du graphique  $(x_A - x_O)_i$  VS  $(x_U - x_A)_i$

On peut maintenant calculer les valeurs nécessaires au traçage de la courbe de partage du cyclone: la récupération de solide à la sousverse ( $W_U X_{Ui} / W_A X_{Ai}$ ) et diamètre moyen de la classe granulométrique  $i$ , ce dernier étant la moyenne géométrique entre l'ouverture du tamis considéré et celle du tamis immédiatement au-dessus.

**Note:** étant donné qu'on utilise une valeur moyenne de la charge circulante pour toutes les classes, les bilans (1) ne seront plus satisfaits. Donc, pour calculer la récupération de solide à la sousverse,  $Y$  (masse solide à la sousverse/masse de solide à l'alimentation), on procédera plutôt à recalculer l'alimentation à partir de la charge circulante et  $x_O$  et  $x_U$ .

$$Y_i = \frac{(\omega_U/\omega_O) x_{U_i}}{(\omega_U/\omega_O) x_{U_i} + x_{O_i}}$$

Le graphique  $Y$  vs  $d$  nous montrera l'existence d'une valeur  $Y$  différente de zéro pour  $d_{60}$ . Ceci ne peut être expliqué par le phénomène de classification (les particules très fines doivent se rapporter plutôt à la surverse), mais par l'entraînement avec de l'eau. On supposera donc que la fraction de particules fines à la sousverse est égale à la fraction d'eau à la sousverse. Celle-ci peut être calculée à partir du bilan d'eau (comme indiqué à la page précédente).