

## I.1 Machines a agitation pneumatique

### I.1.1 Colonnes de flottation

Les colonnes de flottation sont un type particulier des cellules pneumatiques, dont l'utilisation a commencé à la fin des années 1960 à la suite des travaux de Boutin *et al.* Elles comprennent toujours les parties suivantes (figure 19), une partie cylindrique verticale, un système de génération des bulles, un système d'alimentation en pulpe et un système de récupération des mousses. L'appareil ainsi défini travaille à contre-courant : la pulpe, au préalable conditionnée, est introduite aux deux tiers environ de la hauteur de l'appareil. Au bas de la colonne est injecté l'air par le générateur des bulles, qui cheminent à contre-courant de la pulpe. Une aspersion d'eau assure le lavage des mousses recueillies à la partie supérieure. On définit ainsi une zone de collecte et une zone de lavage. Avec un tel dispositif, on peut compter, en général, sur une amélioration de la récupération des fines particules et de la teneur des concentrés, en évitant le salissage résultant d'un entraînement mécanique.

Les paramètres influant sur le fonctionnement des colonnes de flottation sont de natures géométriques et hydrodynamiques.

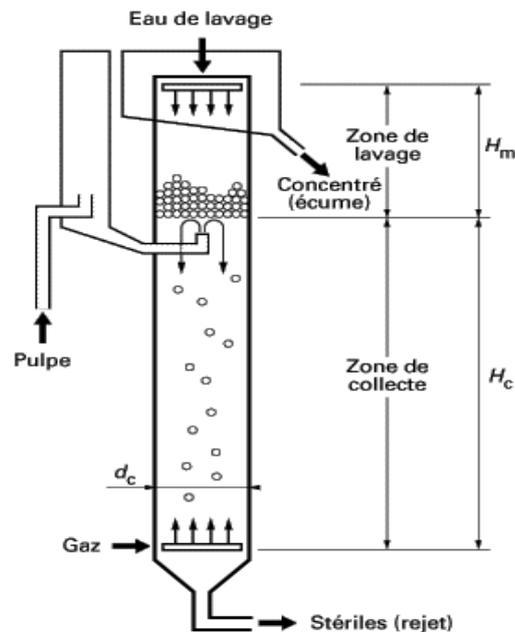


Figure 19 : Schéma d'une colonne de flottation

### I.1.2 Caractéristiques géométriques

Le diamètre de la colonne  $D_c$ , pour un débit d'alimentation donné, est déterminant pour la capacité de l'appareil et le rendement, mais il modifie le régime hydrodynamique, compliquant ainsi les extrapolations en passant de l'échelle pilote à l'échelle industrielle. En effet, dans les colonnes de grand diamètre interviennent des courants de convection, responsables de la distribution irrégulière des bulles et des vitesses du liquide et par conséquent, du flux de matière puisqu'il n'existe pas de rotor pour créer l'homogénéité du système complexe bulle-matière-eau.

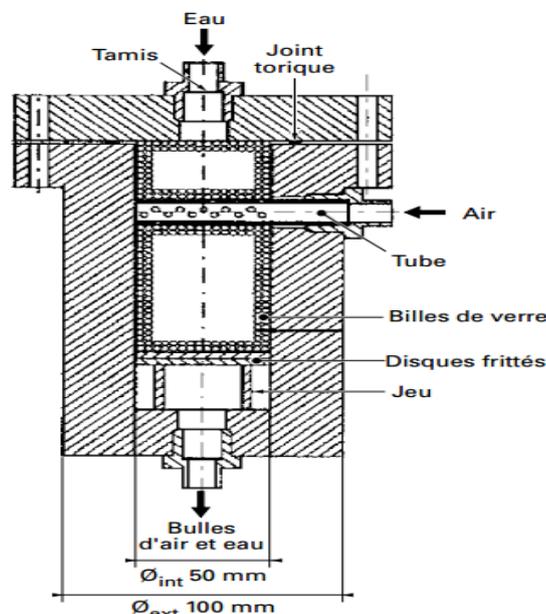
La hauteur de la colonne  $H_c$  permet d'atténuer ce défaut. Un rapport  $H_c/D_c$  élevé permet une meilleure distribution du gaz et du liquide dont les irrégularités signalées précédemment sont nuisibles à la flottation des fines particules. C'est la raison pour laquelle on utilise dans l'industrie des hauteurs de 13 à 15 m. Malheureusement, une augmentation trop importante du rapport  $H_c/D_c$  est incompatible avec la capacité de transport des solides par les bulles ; certains agrégats bulles-minéraux ne remontent plus et passent dans les stériles (rejet). La capacité de transport des solides par les bulles ( $g \cdot \text{min}^{-1} / \text{cm}^2$  de surface de la bulle) a fait l'objet de déterminations expérimentales : Del Villar *et al*, montrent que la réduction de concentration en solides dans la pulpe permet de corriger très partiellement cet inconvénient mais il en résulte une diminution de la capacité théorique.

Les positions respectives de l'entrée de la pulpe et de l'air influent sur le fonctionnement de la colonne. Il est nécessaire de ménager une zone de collecte et une zone de lavage suffisantes. La hauteur d'écume dans cette dernière zone est d'environ 1,5 m. À la base de cette zone se situe l'alimentation en pulpe. L'emplacement à la base de la zone de collecte prévoit une hauteur de 0,5 m au-dessus du fond de la colonne, pour réduire le court-circuitage des bulles en direction de l'évacuation des rejets.

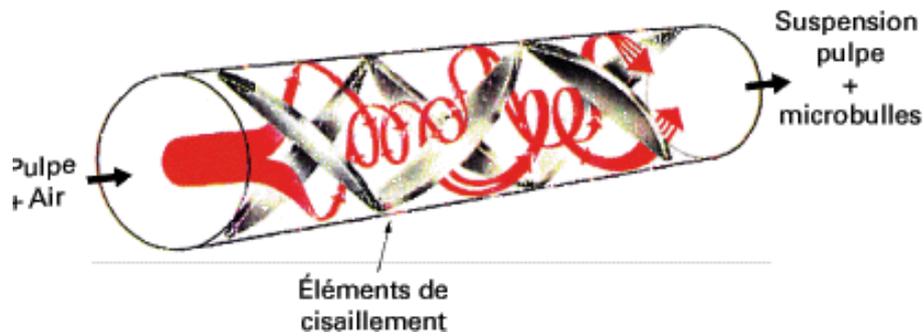
### 1.1.3 Caractéristiques hydrodynamiques

La colonne utilise une **circulation à contre-courant des particules et des bulles**, qui conditionne non seulement la fixation des particules sur les bulles, mais encore la vitesse de flottation et la consommation énergétique. Ce régime est avant tout dépendant des débits d'air, du taux de rétention de l'air dans la colonne (rapport volume d'air/volume d'air et de pulpe), de la distribution des bulles et de leur diamètre, et évidemment des débits de pulpe d'alimentation et d'eau de lavage.

De nombreux travaux ont été réalisés sur les **générateurs des bulles**. Il semble que les générateurs pneumatiques utilisant du caoutchouc perforé, des métaux, de la céramique ou du polyuréthane, soient en voie d'abandon pour des raisons diverses (bouchage, bulles plus grosses, usure). On préfère des générateurs hydrauliques où l'introduction d'air est provoquée par l'écoulement d'un liquide ou d'air sous pression. Ces générateurs peuvent être placés à l'extérieur de la colonne comme le générateur Minovex où l'air, injecté dans une enceinte périphérique sous une pression de 300 à 320 kPa, confère une vitesse d'injection de 200 à 400 m/s. Ils peuvent aussi être du type à jet turbulent, sous une pression de 400 à 550 kPa, placé dans un mélangeur statique séparé de la colonne (générateur USBM-Control International (figure 20), et générateur-mélangeur Microcel (figure 21).



*Figure 20 : Générateur externe de bulles USBM-Control International*



*Figure 21 : Générateur-mélangeur de bulles Microcel-Control International*

#### 1.1.4 Description des paramètres de fonctionnement

La pulpe d'alimentation est caractérisée par sa vitesse superficielle et sa concentration en solide. La

$$J_a = \frac{Q_p}{S_c}$$

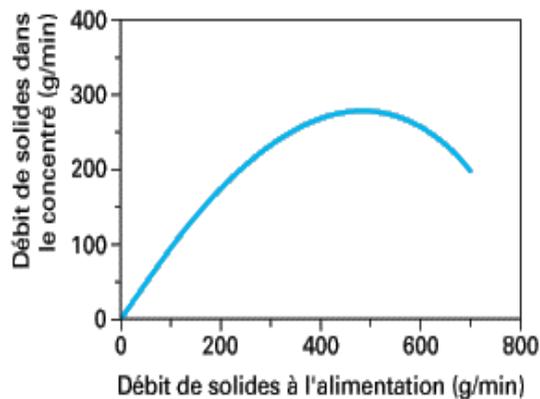
vitesse superficielle d'alimentation ( $J_a$  en cm/s) est donnée par l'équation :

Avec  $Q_p$ : débit volumique de la pulpe et  $S_c$ : section de la colonne.

Cette vitesse conditionne la charge minérale des bulles, le temps de séjour dans la zone de collecte et l'accrochage des particules grossières.

Figure 21 : Générateur-mélangeur de bulles Microcel-Control International

Figure 22 : Évolution du débit de solides dans le concentré en fonction du débit de solides dans l'alimentation (capacité de transport)



*Figure 22 : Évolution du débit de solides dans le concentré en fonction du débit de solides dans l'alimentation (capacité de transport)*

Une concentration en solide élevée peut entraver le mouvement ascendant des bulles, et une abondance de fines particules oblige à utiliser un faible débit de pulpe. Selon Espinosa-Gomez *et al*, la capacité de transport  $C_t$  (débits maximaux de solides flottés par unité de section) est proportionnelle à la dimension  $d_{80}$  des particules ( $C_t = kd_{80}$ ). La figure 21 exprime la variation du débit solide à l'alimentation en fonction du débit solide dans le concentré.

**Nota :** la dimension  $d_{80}$  est la dimension de la maille carrée qui va laisser passer 80 % des particules. En pratique, les colonnes de flottation nécessitent une moindre quantité d'air que les

$$J_g = \frac{Q_g}{S_c}$$

cellules classiques et un moindre encombrement au sol (2,5 fois inférieur) pour un même tonnage traité. L'aération dans la colonne est caractérisée comme pour la pulpe par une **vitesse superficielle d'air**  $J_g$  (en cm/s) :

$Q_g$  débit volumique de l'air

Cette vitesse superficielle conditionne la rétention de l'air et contrôle le diamètre des bulles. Il existe un rapport optimal  $J_a / J_g$ . Les colonnes de flottation industrielles fonctionnent avec des vitesses superficielles d'alimentation de pulpe de 1 à 3,5 cm/s pour présenter un régime d'écoulement homogène et éviter les écoulements créant des bouchages ou des tourbillons.

La hauteur des mousses constitue une couche formée d'un lit compact de bulles-particules de 1 m de hauteur environ, et ne contenant qu'une très faible proportion d'eau du fait du lavage à contre-courant. La quantité d'eau de lavage et le bias (flux net d'eau descendant à travers les mousses ou, par approximation, différence entre le débit du rejet et le débit d'alimentation) ont des vitesses superficielles très faibles.

**Tableau 4 : Les caractéristiques et les paramètres de fonctionnement des colonnes industrielles.**

Diamètre $D_c$	0,5 à 4 m
Hauteur $H_c$	5 à 17 m
$H_c/D_c$	> 10/1
Vitesses superficielles	Air : 0,5 à 2,5 cm/s au dégrossissage ; 0,5 à 3,8 cm/s au relavage Pulpe : 0,5 à 2,5 cm/s au dégrossissage ; 0,2 à 1,6 cm/s au relavage Eau de lavage : 0,01 à 0,5 cm/s Bias : 0,2 cm/s
Hauteur des écumes	0,1 à 2,0 m au dégrossissage
	0,2 à 1,0 m au relavage
Le dégrossissage et le relavage sont définis après	