Chapitre III : Machines de flottation

Il existe deux principaux types de machines de flottation selon le mode de génération des bulles et de mise en suspension de la pulpe :

Les cellules à agitation mécanique, qui est assurée par un ensemble rotor-stator, sont constituées d'une cuve parallélépipédique ou cylindrique. L'air est introduit dans la cellule par l'axe creux du rotor ou par une tubulure extérieure à l'axe, ou par une tuyauterie située sous le rotor. La pulpe est généralement introduite latéralement dans la cellule, parfois directement au niveau de l'agitateur. Les mousses sortent par débordement et le produit non flotté par passage direct dans la cellule suivante.

Les cellules pneumatiques ne comportant généralement pas d'agitation mécanique, l'air est introduit par un diffuseur ou générateur de bulles en fond de cellule. Les particules cheminent de haut en bas, à contre-courant du flux ascensionnel des bulles. Les colonnes de flottation sont rattachées à cette classe de machines.

I.1 Machines à agitation mécanique

Ce sont des **réacteurs mélangeurs** dont le volume supérieur est isolé du volume inférieur par un système de plaques ou grilles, afin de créer une zone de faible turbulence et d'éviter la création d'un mouvement d'ensemble, perturbant le débordement régulier des écumes.

L'écume ne doit pas être soumise à la turbulence qui règne dans la cellule, afin que les particules collectées ne se détachent pas des bulles et qu'un drainage gravitaire du liquide contenu dans les mousses ramène dans la pulpe les particules non collectées mais entraînées mécaniquement. L'extraction peut être réalisée de deux façons :

Par **débordement**, qui peut être rapide lorsque le volume d'écume est faible et que l'on veut rapidement évacuer les particules flottées, ou lent lorsque l'on cherche à obtenir une teneur élevée du concentré en favorisant l'évacuation des particules stériles par drainage. Dans le premier cas, on peut utiliser des déflecteurs pour accélérer l'évacuation de l'écume, dans le second, on peut agir sur la quantité ou la qualité de moussant et par suite, sur la hauteur des mousses. Dans les deux cas, on règle le niveau de la pulpe dans la cellule ;

Mécaniquement, par des pales tournantes afin d'évacuer des mousses riches, voire des mousses sèches, contenant très peu de liquide, qui tendent à stationner et à faire barrage aux écumes plus fluides.

L'évacuation des écumes peut être donc un facteur limitatif de la capacité des cellules, notamment dans le cas des minéraux industriels où la phase flottée constitue une fraction importante de la masse traitée ou dans le cas du retraitement de concentrés de dégrossissage.

Les machines à agitation mécanique répondent à plusieurs nécessités :

- maintenir en suspension toutes les particules quels que soient leur diamètre, leur masse volumique, la concentration en solide de la pulpe, pour éviter une sédimentation dans la cuve et assurer le transfert des particules vers les mousses ou vers la sortie ;
- disperser de façon aussi homogène que possible les bulles d'air dans la masse de la pulpe, afin de faciliter les contacts avec les particules en suspension ;
- se rapprocher autant que possible de l'action d'un mélangeur parfait ;
- pouvoir redémarrer après arrêt, malgré la sédimentation de la pulpe.

Un tel mélangeur est défini par des caractéristiques géométriques et hydrodynamiques, qui sont à la base des calculs de la puissance absorbée, des débits d'air et des capacités des cellules de flottation, données essentielles pour la conception d'un circuit de flottation.

Caractéristiques géométriques des machines

La forme des cellules mécaniques est généralement celle d'un parallélépipède rectangle, plus facile à assembler dans un circuit. Les paramètres géométriques élémentaires tels que la hauteur h, la largeur l, la longueur L et le diamètre du rotor D_r, permettent de définir les éléments habituels des réacteurs (le volume $V = hlL$, et le rapport entre le diamètre du rotor et la longueur $R = D_r/L$) que l'on utilise ou non le concept de similitude géométrique, on prend :

Les formes des rotors et des stators sont très différentes suivant les constructeurs ; on distingue notamment :

- les rotors constitués de lames (4 à 16 par rotor) avec un rapport h_r/D_r = 0,1 à 0,3 (h_r étant la hauteur du rotor) ;
- les rotors en cages d'écureuil (12 à 24 barreaux), avec h_r/D_r = 0,3 à 1,1 ;
- les rotors à structure spirale ou hybrides.

I.1.1 Caractéristiques hydrodynamiques

Les nombres adimensionnels qui caractérisent le fonctionnement d'une cellule de flottation sont :

Le nombre de Reynolds : $$Re = \frac{v_r D_r^2 \rho}{\eta}$$

Le nombre de puissance : $$N_p = \frac{P}{\rho v_r^3 D_r^5}$$

Le nombre de Froude : $$Fr = \frac{v_r^2 D_r}{g}$$

Le nombre de débit d'air ou de capacité d'air : $$N_Q = \frac{Q_g}{v_r D_r^3}$$

Le nombre de Weber : $$N_{We} = \frac{\rho v_r^2 D_r^3}{\gamma_{LG}}$$

Le nombre de débit liquide : $$N_{QL} = \frac{Q_l}{v_r D_r^3}$$

avec
v_r : vitesse de rotation du rotor
P : puissance consommée
Q_g débit d'air
Q_l débit moyen du liquide sortant du rotor
P masse volumique du liquide
h viscosité dynamique du liquide
g accélération de la pesanteur
γLG tension superficielle liquide-gaz

Les nombres ont une signification physique : *Re* caractérise le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité, N_p quantifie d'énergie nécessaire pour mettre le liquide en mouvement, *Fr* caractérise le rapport des forces d'inertie à la gravité, N_Q décrit le flux d'air dans le rotor et N_{QL} le flux maximal théorique du liquide à travers le rotor et enfin N_{We} le rapport des forces d'inertie aux forces superficielles. La vitesse de rotation v_r est proportionnelle à D_r^p, avec en général $p = -0{,}75$.

Pour des systèmes à haute turbulence comme c'est le cas pour les cellules équipées de plaques faisant obstacle (chicanes), certains de ces nombres ont les valeurs suivantes : *Re* est voisin de 10^5-10^6.

N_{QL} est un paramètre difficile à cerner, étant donné les difficultés de mesure. Sur un réacteur à huit cloisons internes et une turbine à huit lames verticales caractérisée par $R = 0{,}3$, Nagata mesure une valeur de N_{QL} de 2,9, alors que Denver donne pour des cellules Wemco de 14 et de 28 m^3 des valeurs respectives de 0,505 et 0,558 (figure 9).

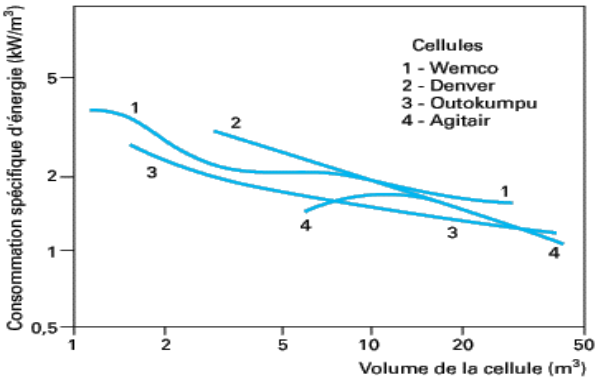
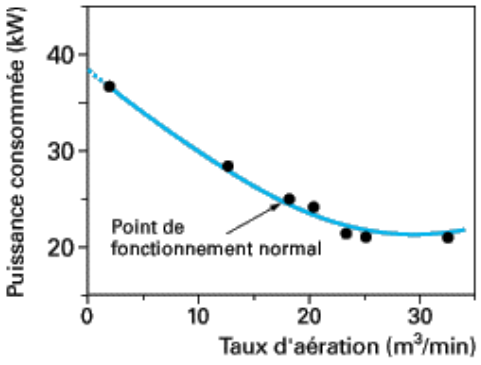


Figure 9 : Consommation spécifique d'énergie en fonction du volume des cellules de flottation

La puissance consommée diminue quand le taux d'aération augmente (figure 10), mais cette diminution peut conduire à la sédimentation des particules grossières. Toutefois, la sédimentation des grosses particules, qui ne flottent pas, est non seulement maîtrisée par l'agitation et le débit d'air mais encore par des facteurs géométriques tels que la distance du rotor au fond de la cellule. L'accumulation des solides en fond de cellule provoque une usure de l'agitateur et un ensablement. Dans un circuit de flottation, on prévoit des ouvertures pour faire circuler les grains grossiers d'une cellule à la suivante.



cellules Dorr Oliver de 38 et 44 m^3
minerai de porphyre cuprifère 35 % en masse de solides

Figure 10 : Effet de l'aération sur la puissance consommée

Selon Harris, on ne peut donner que des valeurs approximatives pour calculer la capacité d'une cellule de flottation. En effet, elle dépend d'autres facteurs que les facteurs précédents, puisque la cinétique de flottation dépend de paramètres liés au minéral et aux réactifs. La relation entre puissance, capacité et volume s'écrit :

et $$\frac{C}{V_t} = 6{,}35\left(\frac{P_u}{V_t}\right)^{1.7} \qquad C \approx \frac{V_t C_s^{1,1}}{t}$$

avec C (t/j) capacité de flottation

V_t (m^3) volume total de cellules par banc

C_s (%) concentration massique des solides dans la pulpe

t (s) temps de flottation

P_u (kW/m^3) puissance par unité de volume.

La relation reste toutefois très approximative, donnant des résultats allant du simple au triple.

I.2 Description des principaux types de machines

Les conditions dans lesquelles travaillent les cellules sont très éprouvantes pour le matériel, aussi tous les constructeurs se sont-ils efforcés de faciliter les manutentions et les réparations avec des conceptions simples et des matériaux robustes. En effet, l'abrasion résultant du système d'agitation mécanique est intense et, de plus les matériaux sont soumis à la corrosion due aux agents chimiques (collecteurs, modificateurs de pH, oxydants). Dans certains cas, l'eau est chargée en chlore (eau saumâtre) ou est acide (eau d'exhaure). Aussi utilise-t-on du caoutchouc, de la céramique ou du polyuréthane pour les organes mobiles (rotor ou turbine). Les cuves en acier sont aussi souvent recouvertes de caoutchouc.

Avant les années 1970, on distinguait les cellules qui fonctionnaient en autoaération, provoquée par la cavitation créée par le système rotor-stator, de celles qui fonctionnaient avec de l'air surpressé. Depuis ces vingt-cinq dernières années, toutes les cellules fonctionnent pratiquement à l'air comprimé. Cette transformation a été rendue obligatoire pour des cellules de grand volume.

Toutes les cellules donnent des récupérations satisfaisantes avec la plupart des minéraux. Toutefois, ces récupérations sont relativement mauvaises avec les grains grossiers ou très fins. Certaines cellules sont plus ou moins bien adaptées à ces conditions extrêmes mais la pratique joue autant que la conception de la cellule dans la récupération des grains difficiles à flotter. Afin de mieux résoudre cette difficulté, certains concepteurs d'usine placent, avant flottation, des séparations de sable et de fines et utilisent tel ou tel type de cellules pour chacune des fractions. On peut enregistrer ainsi une amélioration de la récupération globale de 1 à 5 %.

Les grandes dimensions des cellules modernes sont bien adaptées aux exploitations géantes. C'est surtout dans les années 1970 que le prix de l'énergie a stimulé le développement de cellules de volumes supérieurs à 14 m^3 , même dans des exploitations de moyenne importance. Actuellement, les principaux fabricants poursuivent une véritable course au gigantisme avec un réel engouement des praticiens pour ce type de matériel.

I.2.1 Cellules Wemco

Wemco est le plus grand fournisseur mondial de cellules de flottation. Cette position est due à différentes causes : il offre une large gamme de cellules allant de 28 à 100 m^3 et plus de volume

unitaire, munies de mécanismes très simples. Par exemple le mécanisme de la cellule « **Wemco 1+1** » consiste en un ensemble rotor-stator qui fournit un mélange et une aération intenses ; l'air est aspiré dans la cellule et ensuite dispersé dans la pulpe, assurant ainsi le contact entre les bulles et les particules à flotter. C'est actuellement la seule cellule qui utilise encore l'autoaération, ce qui réduit les frais d'investissement et d'exploitation. Dans les cellules de grand volume (figure 11), un tube d'aspiration situé sur un double fond dirige le mouvement de la pulpe et évite l'ensablement de la cuve. Le tableau 1 donne les caractéristiques hydrodynamiques.

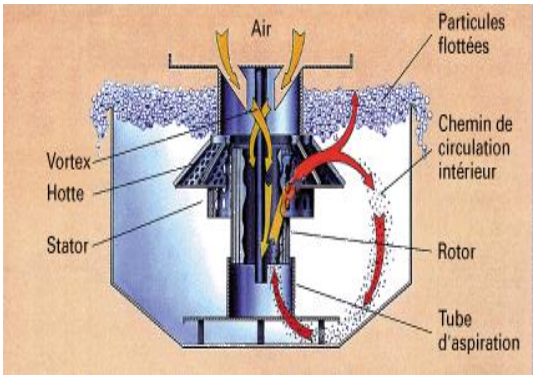


Figure 11 : Cellule de flottation Wemco 1+1

Tableau 3 : Caractéristiques de quelques cellules de flottation Wemco

Caractéristique	Désignation des cellules volume (m^3)			
	14,15	28,30	42,45	84,90
Surface de flottation (m^2)	10,03	13,01	17,19	23,78
Volume de mélange air/pulpe (m^3)	0,411	0,868	1,447	2,986
Vitesse du rotor (tr/min)	192	185	164	140
Débit d'air (m^3 /min)	6,8	10,5	15,8	24,7
Débit liquide (m^3 /min)	27,5	45,7	52,9	95,4
Puissance adsorbée (kW)	19,7	35,5	60,9	117,8
Vitesse de sortie d'air (m/min)	0,736	0,923	1,014	1,182
Débit spécifique (min^{-1}) (1)	1,940	1,620	1,247	1,123
Temps de mélange air/pulpe (s)	0,721	0,924	1,262	1,493
Nombre de puissance du mécanisme N_p	0,0195	0,0193	0,0220	0,0244
Nombre de capacité d'air N_Q	0,123	0,128	0,138	0,135
Nombre de Froude *Fr*	27,2	29,1	26,7	23,9