

Euroforum

Le broyage fin par voie humide : Technologies et exemples

Introduction :

Les machines de broyage en voie humide sont souvent des machines également utilisées en voie sèche et dont des détails de fabrication ou les conditions opératoires ont permis une adaptation spécifique.

Les concasseurs et broyeurs de grosses particules sont assez facilement adaptés par exemple les broyeurs à couteaux, les concasseurs à mâchoire, les granulateurs à cône...

Pour le broyage fin, nous aurons toutes les variantes de broyeurs à microbilles, broyeurs vibrants et broyeurs à boulets classiques.

Les constructeurs pourront annoncer les avantages technologiques des uns par rapport aux autres, mais les phénomènes généraux de la fragmentation seront toutefois très proches car contrairement aux modes d'action différents que l'on trouve en broyage à sec, la grande viscosité des liquides par rapport à l'air induit des modes d'action similaires.

La particularité donc, est qu'en humide les particules sont dispersées et que les phénomènes de couche limite seront largement fonction de la viscosité de la barbotine préparée.

Exemple du broyeur à boulets :

Cet outil est l'un des plus répandu et donc le plus étudié. Nous trouvons dans la littérature publique ou privée un grand nombre d'écrits qui très souvent mettent en évidence des phénomènes que l'on pourra extrapoler dans le cas où l'on utilise d'autres machines.

1 - Lois énergétiques du broyage :

La loi de BOND est semi empirique et possède à mon sens un gros avantage par rapport aux autres c'est qu'elle marche dans pratiquement tous les cas couramment rencontrés entre 5 µm et 1000 µm en humide et entre 30 µm et 3000 µm en sec.

Cette loi qui a été vérifiée dans un grand nombre de cas est un compromis entre les lois de Rittinger et de Kick. La fragmentation crée de nouvelles surfaces ; l'énergie requise pour produire cette fragmentation serait inversement proportionnelle au carré de la nouvelle surface produite.

Pour ne rien compliquer nous dirons que W_i l'indice de BOND dépend uniquement du produit considéré : il faut soit le mesurer soit le trouver dans les tables nombreuses qui existent, mais attention les valeurs trouvées sont parfois contradictoires et indiquent la variété de produits qui se cachent sous un même nom.

On définit le d_{80} du produit d'alimentation et le d_{80} du produit à obtenir :

On peut ainsi écrire la loi de BOND :

$$\log P = \log W_i - 0,5 (\log d_s + 1)$$

Où :

- P = puissance en KWh/ tonnes
(attention les données de la littérature sont souvent en short ton de 908 kg)
- W_i = indice énergétique de Bond
- d_s = dimension des particules à obtenir (d_{80}) exprimée en mm

Cette énergie est liée à la taille de la particule.

Si on travaille à partir d'un produit pré-broyé il faut déduire l'énergie déjà utilisée pour le pré-broyage. Attention, l'indice de BOND est donné pour $d_{80} = 100 \mu\text{m}$ et considère le d_{80} des poudres, des corrections sont nécessaires si l'on s'écarte des paramètres du modèle.

Les coefficients de correction sont :

- Correction sur le diamètre : un gros broyeur ayant une plus grande efficacité qu'un petit, Bond a calculé son indice avec un appareil de $j = 2450 \text{ mm}$. D'où le coefficient multiplicateur de puissance :
 $k_1 = \sqrt[3]{2,45 / D_i}$ avec D_i diamètre intérieur du broyeur en mètres.
- Correction pour broyage à sec :
 $k_2 = 1,30$
- Correction si le produit a été préalablement criblé :
 $k_3 = 1,15$

On doit comprendre que ces coefficients sont des multiplicateurs cumulatifs de puissance installée.

2 - Conditions d'application :

Broyage en continu avec temps de séjour inférieur à 30 mn

- Vitesse de rotation : elle est généralement comprise entre 50 et 85 % de la vitesse critique plus le produit à obtenir est fin, plus la vitesse sera faible.
 $V_c = 42.3 / \sqrt{D_i}$ où D_i est le diamètre du broyeur en mètres
 V_c est en tr/mn
- Corps broyants : deux ou trois tailles de boulets ou de billes seront proposés selon le travail à réaliser. La loi de COGHILL pourra s'exprimer sous la forme :
 $D_b = 32 \times a$ où D_b est le diamètre des billes en mm ; et a est la dimension des particules à fragmenter en mm.

En pratique on trouve souvent des charges broyantes constituées de billes de diamètres trop élevés et donc peu efficaces. Si on met des billes de 30 mm il y a 45 billes par litre. Si on se trompe et l'on met du 40 mm cela donnera 19 billes par litre. Le nombre de points de contact est donc largement diminué.

- Remplissage : Sur un broyeur en continu, la charge broyante occupe généralement entre 20 et 35 % du volume apparent du broyeur. La matière doit couvrir légèrement la charge broyante pour une efficacité optimale.
- Concentration solide : Elle dépendra du procédé à réaliser, c'est à dire des quantités de fluide amont et aval nécessaires. On a souvent intérêt à minimiser la quantité d'eau dans le procédé. Une pulpe trop épaisse n'autorisera pas des broyages très fins et risque de boucher les évacuations. Une barbotine trop fluide entraînera une usure plus importante des billes et du revêtement anti-abrasion.

En céramique on travaille souvent entre 700 et 1200 g/l. Des concentrations plus importantes existent couramment pour les frites et émaux.

- Évacuation des matières : en humide elle se fait généralement par débordement dans un trommel de sortie. En sec il est préférable d'effectuer des sorties périphériques.
- Temps de broyage : le temps de séjour dans un broyeur continu varie entre quelques minutes et ½ heure en général.

En broyage discontinu les temps de séjour peuvent aller jusqu'à 10 ou 20 heures par exemple lorsque l'on souhaite microniser la matière.

N'oublions pas dans ce cas que le broyeur à boulets dissipe une grande partie de l'énergie sous forme d'effet joule et la température va augmenter rapidement dans l'enceinte confinée. Un refroidissement et un contrôle de la température sont alors nécessaires. Ces technologies sont très fréquentes.

3 - Comparatif broyage à sec et broyage humide :

➤ Avantages et inconvénients relatifs :

Le choix de la technologie n'est pas toujours possible il peut nous être imposé par le procédé amont ou aval ou par le coût opératoire.

Si le broyage est la dernière opération avant ensachage et expédition, il sera préférable de travailler à sec mais si la finesse désirée ne peut pas être obtenue en sec, même avec des additifs de dispersion, alors un travail en humide risque de s'imposer. En humide le rendement de broyage est nettement plus important. Un gain d'énergie de 30 % au moins est à envisager. Si la matière doit être séchée après broyage, il est clair que le coût du travail en humide sera beaucoup plus élevé. Nous noterons que la notion de sec signifie que la teneur en eau est inférieure à 0.2 % en général. La notion d'humide (dans l'eau ou l'alcool ou autres fluides) signifie que nous sommes en présence d'une barbotine, ou pulpe qui se comporte comme un liquide; il ne peut pas s'agir d'humidité de l'ordre de 10 ou 20 %. En humide nous bénéficierons d'une absence de poussières.

Le pompage et les tuyauteries seront plus simples que les élévateurs à godets et les transporteurs à vis d'Archimède.

Exemple : Sur le broyage d'un quartz naturel, des essais comparatifs ont montré que les produits obtenus dans les deux cas donnaient au bout d'un temps identique, tous autres paramètres constants, un accroissement de surface spécifique nettement différencié.

Mode de broyage	Accroissement de la surface spécifique :
Broyage en barbotine dans l'eau :	146
Broyage à sec :	75

➤ Additifs de broyage :

On les rencontre surtout en broyage à sec, mais la démarche est identique pour le broyage humide. Il faudra rechercher la plus grande fluidité, la plus grande dispersion des particules.

Si la barbotine est très concentrée on veillera grâce à des dispersants polaires par exemple à obtenir même en milieu tixotrope une fluidité acceptable.

Les adjuvants de broyage ou agents de mouture s'utilisent le plus souvent avec une concentration de 1 à 3 \$.

Nous noterons que l'addition d'un agent de mouture peut aider à redresser la courbe granulométrique du produit broyé.

➤ Résultats sur une fritte de verre :

Le fabricant souhaitait broyer à sec alors qu'il travaillait préalablement en humide. Il effectue une série d'essais pour optimiser l'ensemble des paramètres de réglage du broyeur à sec et compare les résultats obtenus avec un test en humide ayant donné satisfaction au sens de ses divers critères.

Un test sur la durée du broyage à sec dans une jarre de 2 litres lui indique que le standard est atteint au bout de 17 heures avec un adjuvant. Sans adjuvant le standard n'est jamais atteint.

Nature de l'essai	d50	d90
Test à l'eau 16 h	3.75	10.99
Sec+adjuvant A 17 h	5.28	14.41

Les résultats sont confirmés sur un broyeur industriel de 1200 litres de capacité. Nous noterons que les études ont duré 4 mois mais que certains critères n'ont pas été atteints à cause de l'usure trop élevée des corps broyants.

La pollution induite n'a pas permis de valider la technique.

4 - Exemple du broyage fin de ferrites en humide :

Il s'agit de préparer une barbotine de ferrites qui sera ensuite coulée et pressée en forme pour donner les aimants permanents par exemple de stators de petits moteurs électriques. Le broyage permet de casser des petits dipôles sachant que le fractionnement augmente l'aimantation.

Les mesures de granulométrie sont indirectes puisqu'il est fait une mesure de perméabilité Fischer pour contrôler le résultat.

Et l'on s'intéresse aux 2 critères essentiels : la granulométrie et l'aimantation.

Conditions d'essai	d50	Diamètre intérieur
Après 36 h jarre de 10 litres	0,92 µm	255 mm
Après 17 h broyeur de 10 m3	0.85 µm	2050 mm

L'écart par rapport au modèle est de 30% environ toutefois on est hors des limites d'application. Le broyeur a été construit il y a quelques années avec un coefficient de sécurité tenant compte de ses limites.

Dans cet exemple, l'énergie dissipée par effet joule était du même ordre de grandeur que la puissance électrique installée.

5 - Les machines :

En voie humide, nous rencontrerons couramment 3 familles de machines utilisant des corps broyants selon les quantités à traiter et les finesses à obtenir

- Les classiques pouvant atteindre de forts tonnages aussi bien que des quantités de laboratoire :

Les broyeurs à billes et à boulet Alsing, c'est à dire en lot. (2.2 à 132 KW)

Les broyeurs tubes en continu.(2.2 à 4000 KW).

- Les broyeurs à cuve vibrante :
En discontinu du type des tamiseurs ronds (2,2 à 45 KW)
En continu sur tubes vibrants. (5 à 150 KW)
- Les broyeurs à microbilles : à axe verticaux.
Type Atritor avec entraînement des billes par des systèmes de pâles.(5 à 90 kw)
Type Discoplex avec entraînement des billes par un disque muni de broches.(10 à 110 KW)

Les constructeurs de broyeurs en humide les plus connus en France sont : Alpine Hosokawa, BHIL, FCB, Faure équipements, Forplex, Sweco et bien d'autres.

JMC Limoges le 16 janvier 2002

MATERIAUX	INDICE		MATERIAUX	INDICE	
	en kWh/t	en kWh/ T		en kWh/t	en kWh/ T
Andésite	240	26	Graphite	480	53
Andoïse	145	16	Gravier	210	23
Argile cuite	1,4	2	Grenat	130	14
Argiles en moyenne	7,1	8	Grès	120	13
Barytine	62	7	Gypse	80	9
Basalte	20,4	22	Hématite	130	14
Bauxite	95	10	Ilménite	130	14
Calcaire	116	13	Laitiers de haut fourneaux	120	13
Calcaire dimenterie	100	11	Limonite	85	9
Calcaires durs	240	26	Magnésite		0
Calcite	80	9	Magnésite calcinée	170	19
Caoutchouc dur	800	88	Mica	1300	143
Carbure de silicium	262	29	Mnerai de cuivre	130	14
Charbon	11,4	13	Mnerai de fer	140	15
Ciment cru	110	12	Mnerai de manganèse	140	15
Clinker	4 à 13	5 à 14	Mnerai d'or	160	18
Coke	300	33	Mnerai d'uranium	180	20
Coke de pétrole	750	83	Pierre ponce	120	13
Coral	100	11	Psylomélanes	160	18
Corindon	420	46	Pyrite	86	9
Diorite	19,4	21	Pyrolusite	70	8
Dolomie	110	12	Quartz	130	14
Dolomie calcinée	122	13	Quartzite	120	13
Emeri	580	64	Sables siliceux	160	18
Engrais phosphaté	130	14	Scories	160	18
Feldspath potassiques	130	14	Silex	260	29
Feldspath sodiques	100	11	Silicate de soude	130	14
Ferro chrome	90	10	Silice	140	15
Ferro manganèse	80	9	Syérite	160	17
Ferro silicium	140	15	Talc	90	10
Fluorine	100	11	Tuiles	160	18
Galène	110	12	Verre	140	15
Gneiss	200	22	Zircon	1400	154
Granite	150	17			

Quelques indices de Bond