

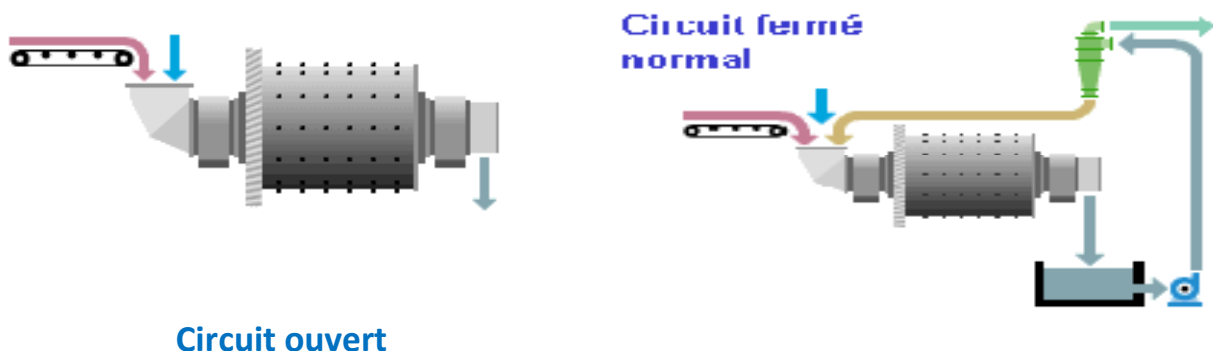
5.5. Circuits de broyage

Normalement, le type de broyeur à utiliser pour un broyage particulier doit être considéré en même temps que le type de circuit où il va être installé. Les circuits sont normalement de deux sortes:

Circuits ouverts où le produit du broyeur constitue aussi le produit du circuit. Dans ce type de circuit, il n'y a pas de moyen de contrôler la granulométrie du produit. Le débit d'alimentation doit être suffisamment faible pour assurer aux particules un temps de séjour adéquat dans le broyeur. Ceci peut donner lieu au surbroyage de certaines particules, produisant alors des particules peut-être difficiles à traiter dans l'usine de séparation subséquente et à une consommation d'énergie inutile. Ce type de circuit est rarement utilisé.

Circuits fermés où le matériel de dimension adéquate est immédiatement retiré du circuit par un classificateur qui retourne le matériel surdimensionné au broyeur. Dans ce cas, on ne fait pas d'effort pour accomplir un rapport de réduction élevé dans un seul pas. Par contre, on essaie de retirer le matériel du circuit aussitôt qu'il a atteint la dimension requise. Des augmentations de capacité de l'ordre de 35% peuvent être obtenues avec ce type de circuit. Le matériel qui est retourné au broyeur par le classificateur s'appelle charge circulante; elle est référée d'habitude comme un pourcentage de la quantité de **minerai frais** alimenté au circuit (rapport de charge circulante). Le circuit fermé réduit le temps de séjour des particules par cycle, d'où la faible quantité de particules ayant la dimension finale. Ceci diminue le surbroyage et augmente l'énergie disponible pour un broyage utile sur des particules plus grossières.

Il a été démontré que plus la charge circulante est élevée, plus l'utilisation efficace de la capacité du broyeur est élevée. Des valeurs habituelles de charge circulante varient entre 100 et 400%. Il faut cependant éviter des charges circulantes trop élevées, car on augmente sérieusement les probabilités d'usure des équipements et des tuyaux ainsi que l'énergie consommée en pompage. L'augmentation de performance du broyeur est plus remarquable pour le premier 100% d'augmentation de charge circulante et tend vers une asymptote à des charges circulantes très élevées (voir figure suivante).



BROYAGE – SUITE-

Les broyeurs à barres sont toujours opérés en circuit ouvert puisque leur mécanisme de broyage comporte une forme de classification: les particules plus grossières sont retardées par la disposition conique des barres jusqu'à ce qu'elles soient broyées. Les particules fines vont se frayer un chemin entre les particules grossières sans être surbroyées.

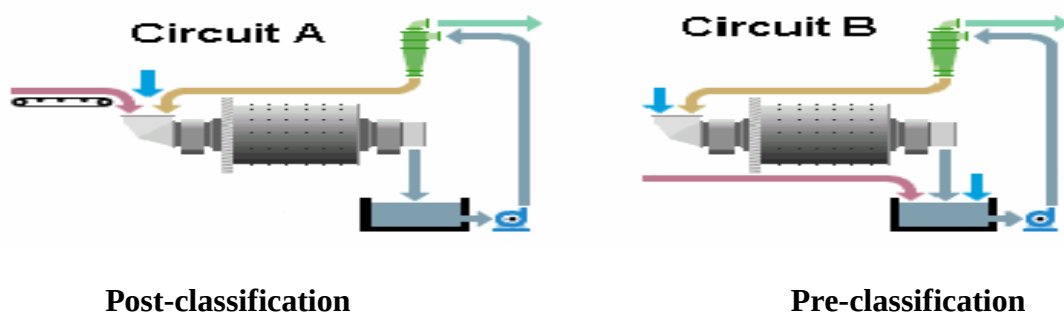
Les broyeurs à boulets par contre opèrent presque toujours en circuit fermé. On utilise plusieurs types de classificateurs pour fermer le circuit. Les classificateurs mécaniques sont très performants avec des particules grossières, ils sont très robustes et faciles à contrôler et ils acceptent assez bien des variations de débit. Par contre, ils ont une très faible capacité quand il s'agit de traiter des particules fines (vitesse de sédimentation réduite) et ils sont très encombrants.

Les hydrocyclones sont de loin les appareils de classification les plus populaires dans les usines minéralurgiques. Ils augmentent la vitesse de sédimentation des fines par le biais de la force centrifuge, obtenant ainsi une séparation plus marquée entre particules fines et grossières, et augmentant du même coup la charge circulante. De plus, ils occupent peu d'espace et leur entretien est minime étant donné l'absence de pièces mobiles.

La classification par hydrocyclones dépend de la vitesse de sédimentation relative des différentes particules, c'est-à-dire que la classification dépend non seulement de la dimension mais aussi de la masse volumique des particules. Un minerai contenant des sulfures et de la gangue verra ses composants lourds (de petite dimension) surbroyés puisqu'ils seront recyclés avec la gangue (légère) grossière. Il faudrait donc envisager un broyage plus grossier où la gangue serait envoyée à la surverse et retirée du système et les particules de valeur (lourdes) rebroyées sélectivement. Dans certains cas, il est préférable de fermer le circuit avec des tamis plutôt qu'avec des cyclones (mine Niobec à St-Honoré).

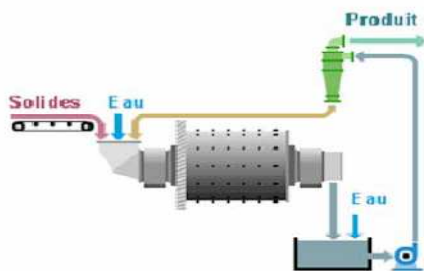
Types de circuits fermés

Il existe essentiellement deux types de circuits fermés: **a) à pré-classification** où le matériel est alimenté d'abord à l'appareil de classification qui enlève immédiatement du circuit les particules fines, n'envoyant au broyeur que les particules grossières, et **b) à post-classification** où tout le matériel est alimenté au broyeur dont le produit est déchargé au classificateur. Ces deux types de circuit sont montrés à la figure suivante.

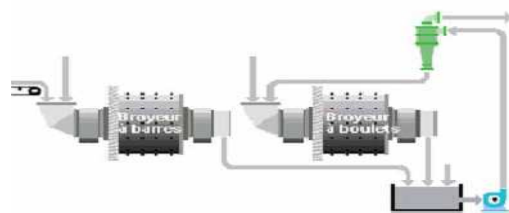


BROYAGE – SUITE-

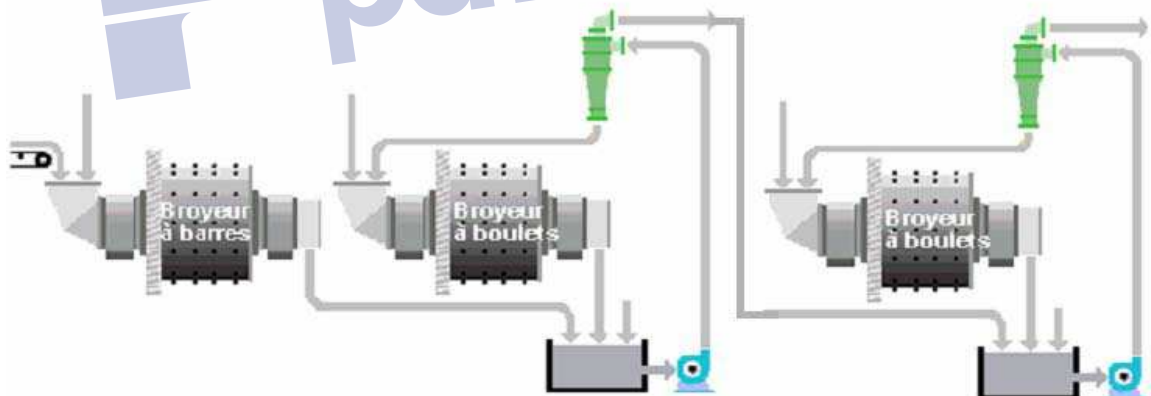
- **Circuits simples (une étape)**
 - normalement broyeur à boulets
- **Circuits à deux étapes en série**
 - broyeur à barres + broyeur à boulets
 - deux broyeurs à boulets
 - FAG/SAG + broyeur à boulets
- **Circuits à trois étapes en série**
- **Circuits à deux (ou plus) lignes parallèles**



Circuit à une étape
(Libération grossière)



Circuit à deux étapes
(Libération fine)



Circuit à trois étapes
(Libération très fine)

Les circuits de broyage comportent quelquefois plusieurs lignes en parallèle. Ceci résulte de l'intérêt à manipuler la capacité désirée tout en donnant plus de flexibilité au système.

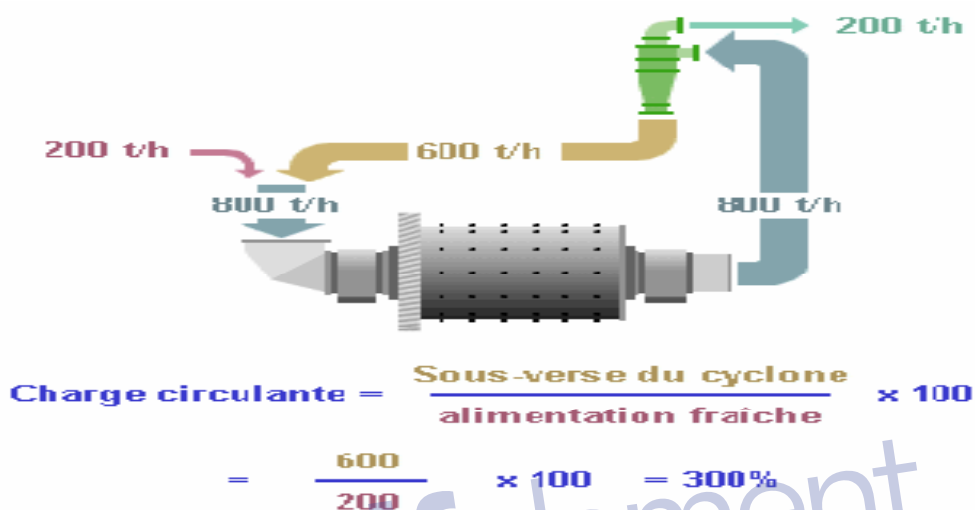
Normalement, ces lignes opèrent indépendamment, chacune alimentant une ligne différente du circuit de concentration. Dans certains cas, et par un souci d'homogénéisation, on peut combiner les décharges des broyeurs primaires, permettant ainsi une alimentation plus uniforme aux broyeurs secondaires.

BROYAGE – SUITE-

Quand on désire un produit d'une extrême finesse, on utilise des circuits multi-étapes. D'habitude, chaque étape comporte un broyeur en circuit fermé avec des hydrocyclones. Ceci permet un broyage "différentiel" dans chaque broyeur plutôt qu'il soit fait dans un seul broyeur de grande dimension.

Un meilleur accord entre la dimension des corps broyant et des particules à broyer peut ainsi être établi.

Calcul du rapport de charge circulante



5.6. Calcul des broyeurs

5.6.1. Broyeurs à corps broyants libres

La vitesse de rotation des broyeurs à corps broyants libres est un paramètre important, aussi bien pour la détermination de la puissance du moteur à installer que pour l'usure des corps broyants et du blindage. Cette vitesse est une fraction de la vitesse critique N_c (en tr/min) donnée par la relation (*) :

$$N_c = 42,3 / \sqrt{\Phi} \dots\dots\dots (*)$$

Avec :

Φ diamètre interblindage (m) du broyeur (diamètre intérieur de la virole blindée).

5.6.1.1 Broyeurs à boulets et à barres

L'énergie (en kWh) nécessaire à l'arbre du moteur pour entraîner l'appareil à vide est calculée par tonne de corps broyants respectivement pour les broyeurs à boulets (W_b) et pour les broyeurs à barres (W_r) à partir des relations (**) et (***), avec Φ en mètres :

$$W_b = 4,879 \Phi^{0,3} (3,2 - 3 V_p) f (1 - 0,1/2(9 - 10f)) + Z \dots\dots\dots (**)$$

$$W_r = 1,752 \Phi^{1/3} (6,3 - 5,4 V_p) f \dots\dots\dots (***)$$

BROYAGE – SUITE-

Avec :

V_p : taux de remplissage du broyeur (fraction du volume du broyeur occupée par les corps broyants), variant entre 0,35 et 0,45 pour les broyeurs à barres et entre 0,40 et 0,50 pour les broyeurs à boulets,

f : fraction de la vitesse critique N_c à laquelle tourne le broyeur, fonction du diamètre interblindage du broyeur (0,64 à 0,76 pour les broyeurs à barres et 0,66 à 0,80 pour les broyeurs à boulets).

Z : est un facteur tenant compte de la taille des boulets pour les broyeurs de diamètre interblindage supérieur à 3,3 m, déterminé par la relation :

$$Z = 0,022 (B - 12,5 \Phi) \dots\dots\dots(1^*)$$

Avec : **Φ** en mètres et **B** diamètre des boulets en millimètres.

Tableau 5 – Guide de dimensionnement des broyeurs à boulets avec un rapport de longueur au diamètre égal à 1													
Diamètre du broyeur (m)	Diamètre des boulets (mm)	Vitesse de rotation		Charge en boulets (t)			Puissance du moteur (2) (kW)						Diamètre interblindage ϕ (m)
							Décharge par débordement			Décharge par grille			
		Taux de remplissage			Taux de remplissage			Taux de remplissage					
(tr/min)	100 f (1)	35 %	40 %	45 %	35 %	40 %	45 %	35 %	40 %	45 %			
0,91	50	38,7	79,9	0,68	0,77	0,87	5	5	5	6	6	7	0,76
1,22	50	32,4	79,1	1,77	2,02	2,28	14	15	15,5	16	18	18,5	1,07
1,52	50	28,2	78,1	3,66	4,19	4,71	31	33	34,5	36	38	40	1,37
1,83	50	25,5	78,0	6,56	7,50	8,44	59	62,5	65,5	68	73	76	1,68
2,13	50	23,2	77,2	10,7	12,3	13,8	101	107	111	116	123,5	129	1,98
2,44	50	21,3	76,1	16,2	18,6	21,0	158	168	174	183	195	202	2,29
2,59	50	20,4	75,3	18,5	21,1	23,8	184	188	204	213	226,5	236	2,44
2,74	50	19,7	75,0	23,5	26,9	30,2	237	251,5	262	274	292	304	2,55
2,89	50	19,2	75,0	26,4	30,1	33,9	270	287	299	312,5	333	346,5	2,74
3,05	50	18,7	75,0	32,7	37,3	42,0	340	361	376,5	393,5	419	436	2,89
3,20	50	18,2	75,0	36,1	41,4	46,5	382	406	423	443	471	490,5	3,05
3,35	50	17,3	72,8	43,0	49,2	55,4	449	477	497	521	554	577	3,17
3,51	50	16,8	72,2	49,1	54,0	60,8	496	528	549,5	575	612	638	3,32
3,66	50	16,3	71,8	56,4	64,4	72,5	597	635,5	662	693	738	768	3,47
3,81	50	16,0	71,8	61,4	70,2	79,0	659	702	730	765	813,5	847	3,63
3,96	50	15,6	71,7	72,3	82,7	92,6	782	831	866	907	964	1 004	3,78
4,12	64	15,3	71,7	78,2	89,4	99,8	874,5	931	971,5	1 014	1 080,5	1 127	3,93
4,27	64	14,8	70,7	90,7	104	117	1 011	1 077	1 123	1 173	1 250	1 302,5	4,08
4,42	64	14,6	70,8	98,0	112	126	1 097	1 168	1 218	1 272	1 355	1 413	4,24
4,57	64	14,1	69,8	113	129	144	1 255,5	1 336	1 392	1 456	1 550	1 615	4,39
4,72	64	13,9	69,8	121	138	155	1 352	1 439	1 498	1 568	1 665	1 738	4,54
4,88	64	13,5	68,9	137	157	179	1 533	1 631	1 698	1 778	1 891	1 970	4,69
5,03	64	13,2	68,7	146	167	188	1 639	1 743	1 815	1 901	2 023	2 106	4,85
5,18	75	13,0	68,7	165	189	212	1 909	2 033	2 120,5	2 214	2 358	2 459,5	5,00
5,30	75	12,7	68,1	176	201	226	2 023	2 154	2 245,5	2 346	2 498,5	2 605	5,15
5,49	75	12,4	67,5	197	225	253	2 263	2 409,5	2 511	2 625	2 795	2 913	5,30

(1) f fraction de la vitesse critique.

(2) Souvent donnée en cheval vapeur (1 ch = 735,5 W).

BROYAGE – SUITE-

Cette énergie doit être corrigée par un facteur multiplicatif de :

- 1,16 pour les broyeurs à boulets travaillant en voie humide, à décharge par grille à niveau bas ;
- 1,08 pour les broyeurs à boulets travaillant en voie sèche, à décharge par grille par débordement ;
- 1,06 si le blindage n'est pas neuf.

Les tableaux 5 et 6 donnent, respectivement pour les broyeurs à boulets et à barres, les caractéristiques des appareils usuels : dimensions, vitesse de rotation, charge en corps broyants et puissance à l'arbre du moteur. (0)

L'énergie nécessaire à la fragmentation du matériau est déterminée à partir de la formule de Bond, moyennant quelques corrections comme il sera indiqué ci-après. Le dimensionnement des broyeurs se fait alors en confrontant l'énergie consommée corrigée W_c avec les énergies W_b ou W_r des tableaux 5 et 6 et en ajustant la longueur du broyeur, si nécessaire, puisque l'énergie consommée est proportionnelle à cette longueur.

La formule de Bond s'écrit :

$$W = W_i \left(\frac{10}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{D_{80}}} \right)$$

D80 et **d80** sont en micromètres et W et W_i sont couramment pris en kWh/sht. Compte tenu des conditions de détermination de l'indice énergétique et des résultats expérimentaux observés industriellement, il ressort que l'énergie calculée par la formule de Bond n'est valable que dans les conditions spécifiques suivantes :

- broyeur à barres : 2,44 m de diamètre interblindage, voie humide, circuit ouvert ;
- broyeur à boulets : 2,44 m de diamètre interblindage, voie humide, circuit fermé

BROYAGE – SUITE-

Tableau 6 – Guide de dimensionnement des broyeurs à barres

Diamètre du broyeur (m)	Longueur du broyeur (m)	Longueur des barres L (m)	Rapport L/Φ	Vitesse de rotation (2)		Masse volumique en vrac des barres	Charge en barres (t)			Puissance du moteur (1) (kW)			Diamètre interblindage Φ (m)
							Taux de remplissage			Taux de remplissage			
				(tr/min)	100 f		(kg/m³)	35 %	40 %	45 %	35 %	40 %	
0,91	1,22	1,07	1,40	36,1	74,5	5 847	1,00	1,13	1,27	5	6	6	0,76
1,22	1,83	1,68	1,57	30,6	74,7	5 847	2,25	2,58	2,90	17	18	19	1,07
1,52	2,44	2,29	1,67	25,7	71,2	5 847	6,91	7,95	8,89	42	45	47	1,37
1,83	3,05	2,90	1,73	23,1	70,7	5 847	13,1	15,0	16,8	84	90	94	1,68
2,13	3,35	3,20	1,62	21,0	69,9	5 766	20,0	22,8	25,6	133	143	150	1,98
2,44	3,66	3,51	1,53	19,4	69,3	5 766	29,0	33,2	37,4	202	217	228	2,29
2,59	3,66	3,51	1,44	18,7	69,0	5 766	33,0	37,7	42,5	234	251	264	2,44
2,74	3,66	3,51	1,38	17,9	67,5	5 766	36,0	41,1	45,5	253	271	285	2,55
2,89	3,96	3,81	1,41	17,4	67,7	5 606	42,7	48,8	54,9	306	328	346	2,70
3,05	4,27	4,11	1,44	16,8	67,0	5 606	51,5	59,0	63,8	373	400	421	2,85
3,20	4,57	4,42	1,47	16,2	66,4	5 606	61,4	70,1	78,9	448	480	505	3,00
3,35	4,88	4,72	1,50	15,9	66,8	5 606	72,5	82,8	93,5	540,5	579,5	610	3,15
3,51	4,88	4,72	1,43	15,5	66,6	5 606	79,7	90,7	103	602	646	680	3,31
3,66	4,88	4,72	1,37	15,1	66,4	5 606	82,7	99,8	112	666	715	752	3,46
3,81	5,49	5,34	1,48	14,7	66,0	5 446	104	119	134	804	863	908	3,61
3,96	5,79	5,64	1,50	14,3	65,6	5 446	120	137	154	930	997	1 049	3,76
4,12	5,79	5,64	1,44	14,0	65,5	5 446	130	148	166	119	1 093	1 149	3,92
4,27	6,10	5,94	1,46	13,6	64,9	5 446	147	169	190	1 162	1 247	1 311	4,07
4,42	6,10	5,94	1,41	13,3	64,6	5 446	159	181	204	1 261	1 353	1 423	4,22
4,57	6,10	5,94	1,36	13,0	64,3	5 446	171	194	219	1 363	1 462	1 538	4,37

(1) Souvent donnée en cheval vapeur (1 ch = 735,5 W).

(2) f fraction de la vitesse critique.