

Table des matières

Avant-propos	11
Chapitre 1. Principes et théories du broyage	13
1.1. Présentation du broyage	13
1.1.1. Introduction	13
1.1.2. Taille des grains	14
1.1.3. Granulométrie du produit	15
1.1.4. Roches hétérogènes.	18
1.2. Lois empiriques pour le refus et le passant d'un solide divisé	19
1.2.1. Loi simple de Schumann (1960) pour le passant.	19
1.2.2. Distribution en fréquences à partir de la loi de Schumann (1960).	19
1.2.3. Formule de Rosin-Rammler pour le refus.	20
1.2.4. Distribution de Harris (1969)	21
1.2.5. Distribution log-normale.	21
1.3. Physique de la fragmentation	22
1.3.1. Phénomène de fissuration	22
1.3.2. Comportement élastique et comportement plastique	25
1.3.3. Distinction entre écrasement lent et choc	26
1.3.4. Diamètre critique	26
1.3.5. Distribution limite (broyage de longue durée)	27
1.3.6. Physique du broyage par choc par percussion	27
1.3.7. Vitesse de chute dans les broyeurs	29
1.3.8. Physique du broyage par pincement	30
1.3.9. Libération d'un minerai : sélectivité d'une opération de broyage	31

1.4. Opération élémentaire : le broyage	32
1.4.1. Paramètres et équation fondamentale du broyage	32
1.4.2. Coefficient de vitesse de broyage : vitesse de sélection	34
1.4.3. Détermination des matrices de sélection et de brisure	35
1.4.4. Ecarts à la loi de linéarité	36
1.4.5. Abandon de l'hypothèse linéaire	37
1.4.6. Broyage d'ordre zéro	37
1.4.7. Matrice de répartition ou de brisure	37
1.5. Distribution des temps de séjour (broyage continu)	38
1.5.1. Paramètres	38
1.5.2. Variation des paramètres de la distribution de temps de séjour	39
1.5.3. Solution d'Austin, Luckie, Ateya (1971)	40
1.5.4. Analogie avec n mélangeurs identiques en série	41
1.6. Résolution des équations d'un broyeur et d'un circuit de broyage	42
1.6.1. Transformation des équations du broyage par Reid (1965)	42
1.6.2. Broyage d'une masse M et broyage continu	44
1.6.3. Calcul des intégrales I_s pour le broyage continu	45
1.6.4. Prise en compte de la dispersion axiale	47
1.6.5. Intégration matricielle	48
1.6.6. Hypothèses de la normalisation	50
1.6.7. Inversion d'une matrice triangulaire inférieure normalisée	50
1.6.8. Procédés avec recirculation	51
1.6.9. Principe des classificateurs	53
1.6.10. Calcul matriciel d'un circuit en fonctionnement continu	53
1.6.11. Taux de recirculation	55
1.6.12. Intérêt du circuit avec classificateur	56
1.6.13. Traitement de l'atmosphère de l'atelier	56

Chapitre 2. Energétique du broyage 57

2.1. Puissances et rendements	57
2.1.1. Ordre de grandeur des énergies en jeu dans le broyage	57
2.1.2. Puissance nette	58
2.1.3. Relations entre rendements	58
2.1.4. Puissance utile	58
2.1.5. Rendement industriel : énergie industrielle	59
2.1.6. Productivité d'un broyage	61
2.1.7. Influence du mode de comminution sur l'énergie dépensée	63
2.1.8. Puissance du moteur des machines	64
2.2. L'indice énergétique de Bond : broyeurs à boulets ou à barres	64

2.2.1. Historique	64
2.2.2. Définition de l'indice énergétique de Bond	65
2.2.3. Interprétation des essais de laboratoire (principe)	66
2.2.4. Mesure de l'indice énergétique	67
2.2.5. Coefficients correctifs de Bond à apporter à l'indice énergétique	68
2.2.6. Energie spécifique à dépenser pour un broyage	70
2.2.7. Puissance à l'arbre du broyeur à boulets	72
2.2.8. Influence des dimensions du broyeur à boulets et à barres sur la puissance nette	73
Chapitre 3. Broyeurs à boulets et à barres	75
3.1. Introduction	75
3.1.1. Présentation du broyeur à boulets	75
3.1.2. Principe de fonctionnement	75
3.1.3. Voie sèche et voie humide	76
3.1.4. Etat des particules du produit sortant	77
3.1.5. Broyeurs à boulets mais sans boulets : étude de l'attrition	79
3.2. Taille des boulets	79
3.2.1. Calcul de la taille des boulets	79
3.2.2. Taille des boulets selon Bond	82
3.3. Paramètres de fonctionnement	82
3.3.1. Vitesse de rotation	82
3.3.2. Taux de remplissage du broyeur	83
3.3.3. Concentration de la bouillie et vitesse de sélection	84
3.3.4. Concentration de la bouillie et distribution granulométrique	85
3.3.5. Paramètres de remplissage du broyeur à boulets	86
3.3.6. Adjuvants de broyage	86
3.4. Ecoulement dans le broyeur	87
3.4.1. Evacuation de la bouillie en broyage humide	87
3.4.2. Débit de bouillie à travers la grille	88
3.4.3. Gradient de hauteur de bouillie le long du broyeur	89
3.4.4. Volume de poudre dans le broyeur fonction du débit	90
3.5. Matrice de sélection	90
3.5.1. Fonction de sélection (matrice diagonale)	90
3.5.2. Vitesses de sélection du broyeur à boulets	91
3.5.3. Extrapolation d'un pilote à l'industriel	92
3.5.4. Effet de retard à la brisure	92
3.5.5. Effet coussin dans le broyage à sec	93
3.6. Usure des surfaces internes du broyeur	94

3.6.1. Mécanismes de l'usure	94
3.6.2. Ordres de grandeur de l'usure des surfaces internes.	95
3.6.3. Remèdes à l'usure.	95
3.7. Broyeurs à barres	96
3.7.1. Description	96
3.7.2. Caractéristiques des produits du broyeur à barres	96
3.7.3. Modélisation	97
3.7.4. Performances	97

Chapitre 4. Concasseurs et broyeurs, hormis les broyeurs à boulets et les broyeurs à barres 99

4.1. Concasseurs.	99
4.1.1. Généralités sur les concasseurs	99
4.1.2. Concasseur à mâchoires à simple effet	100
4.1.3. Concasseur à mâchoires à double effet	102
4.1.4. Caractéristiques des concasseurs à mâchoires	103
4.1.5. Débit des concasseurs à mâchoires.	103
4.1.6. Puissance nette	104
4.1.7. Caractéristiques des concasseurs à mâchoires et du produit sortant.	105
4.1.8. Description du concasseur giratoire	106
4.1.9. Performances du concasseur giratoire	107
4.1.10. Concasseur à cône.	108
4.2. Appareils à percussion	108
4.2.1. Principe.	108
4.2.2. Performances des appareils à chocs	111
4.2.3. Produits traités par les appareils à marteaux	112
4.2.4. Modélisation des broyeurs à marteaux et à enclume	112
4.2.5. Détermination expérimentale de r et des C_i	115
4.2.6. Détermination des paramètres de broyage	116
4.2.7. Modélisation des appareils à grille	116
4.2.8. Détermination des paramètres	118
4.2.9. Déchiqueteur.	119
4.2.10. Broyeurs à rotor ondulé et broyeurs à broches	119
4.3. Concasseurs et broyeurs à rouleaux	120
4.3.1. Principe de fonctionnement	120
4.3.2. Angle de prise	120
4.3.3. Glissement entre cylindres et cisaillement	122
4.3.4. Capacité d'un appareil à rouleaux	123
4.3.5. Taux de fragmentation	123
4.3.6. Modélisation des appareils à cylindres lisses.	125

4.3.7. Conditions opératoires et performances	127
4.3.8. Caractéristiques des produits sortants	128
4.3.9. Appareils à cylindres cannelés	129
4.4. Concasseurs et broyeurs à piste	129
4.4.1. Appareils sans classificateur incorporé	129
4.4.2. Appareils avec classificateurs incorporés	130
4.4.3. Puissance nette	131
4.4.4. Gamme de broyeurs semblables	131
4.4.5. Etude détaillée des broyeurs à piste	132
4.5. Broyeur autogène	132
4.5.1. Principe	132
4.5.2. Modélisation	133
4.5.3. Intérêt des broyeurs autogènes	135
4.6. Broyeur à perles pour ultrafins (microniseur)	136
4.6.1. Description	136
4.6.2. Energie du microniseur	137
4.6.3. Corps broyants (quantité dans la pulpe)	138
4.6.4. Performances et utilisation du microniseur	139
4.7. Autres appareils pour ultrafins : broyeur à jet gazeux	139
4.8. Disperseurs dans un liquide	140
4.8.1. Emulsionneurs	140
4.8.2. Broyeurs-disperseurs à peinture	141

Chapitre 5. Choix des appareils de comminution : traitement mécanique des végétaux 143

5.1. Caractéristiques des solides divisés	143
5.1.1. Distribution des tailles des particules	143
5.1.2. Aptitude d'un solide au broyage	144
5.2. Choix des machines	145
5.2.1. Généralités sur le choix des machines	145
5.2.2. Critère de choix de la machine : la dureté du solide	146
5.2.3. Choix des machines en fonction du débit et de la dureté	146
5.2.4. Précautions à prendre selon la nature du solide traité	149
5.3. Traitement des végétaux : la cellule végétale	150
5.3.1. Structure de la cellule végétale	150
5.3.2. Conséquences sur le goût des fruits	151
5.3.3. Conséquences sur l'extraction des huiles végétales	151
5.3.4. Pression de turgescence	152
5.3.5. Action de la chaleur seule sur les cellules végétales	153
5.3.6. Action de l'humidité seule sur les cellules végétales	154

5.3.7. Actions simultanées de l'humidité et de la chaleur	154
5.3.8. Effets de la congélation et de la déshydratation sur les cellules végétales.	154
5.4. Préparation mécanique des végétaux	155
5.4.1. Nettoyage et épuration préalables	155
5.4.2. Broyage et tranchage (fruits, graines, tubercules)	156
5.4.3. Décorticage des graines	157
5.4.4. Pelage	159
5.4.5. Fractionnement des tiges végétales (canne à sucre)	159
5.4.6. Fractionnement des fruits (battage)	160
Annexe A. Echelle de Mohs.	161
Annexe B. Masse volumique apparente des solides divisés en vrac (kg.m⁻³)	165
Bibliographie	169
Index	177