

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane MIRA - Bejaia
Faculté de Technologie
Département des Mines et Géologie



Polycopié de cours
Master I
Spécialité : Valorisation des Ressources Minérales

Préparation des minerais

Enseignant : Dr. TIOUR Fahem

Année universitaire : 2024/2025

○ **Public ciblé**

La cible principale du cours de préparation des minerais comprend les étudiants de Master 1 en mines et géologie, pour comprendre les bases et les techniques de préparation mécanique des minerais avant leur traitement minéralurgique. Ainsi, d'analyser les étapes de préparation nécessaires avant la transformation des matières premières.

○ **Prérequis**

Les prérequis pour suivre un cours de préparation des minerais incluent des connaissances de base dans plusieurs disciplines scientifiques et techniques. Les principaux domaines à maîtriser avant d'aborder ce cours sont :

- ✓ Connaissances en minéralogie, minéraux naturels et industriels ;
- ✓ Comprendre les propriétés physiques et chimiques des différents types de minerais ;
- ✓ Connaître l'origine, la formation et les caractéristiques des gisements ;
- ✓ Résistance des matériaux, propriétés mécaniques des minerais (dureté, densité ...etc.);
- ✓ Notions sur la mécanique des solides (forces, pression, énergie ... etc.) ;
- ✓ Concepts liés à la gravité pour comprendre les principes de la classification ;
- ✓ Bases de la composition chimique des minerais et des interactions chimiques pouvant influencer les procédés de préparation des minerais ;
- ✓ Calculs de base, algèbre et notions de probabilités pour analyser les résultats expérimentaux ;
- ✓ Lecture et interprétation des schémas industriels ou de diagrammes de procédés.
- ✓ Introduction aux étapes générales du traitement des minerais (extraction, transport, etc.) ;

○ **Objectif du cours**

L'objectif principal du cours de préparation mécanique des minerais est de former les étudiants aux principes, méthodes et équipements utilisés pour traiter mécaniquement les minerais bruts afin d'obtenir des matériaux de qualité adaptés aux étapes suivantes du processus minéralurgique ou métallurgique. Cela inclut plusieurs aspects, notamment :

❖ **Compréhension des bases théoriques :**

- ✓ Étudier les propriétés physiques des minerais (granulométrie, densité, dureté, etc.) et leur influence sur les procédés de préparation ;
- ✓ Apprendre les notions fondamentales de fragmentation mécanique des roches ;

❖ **Techniques de fragmentation**

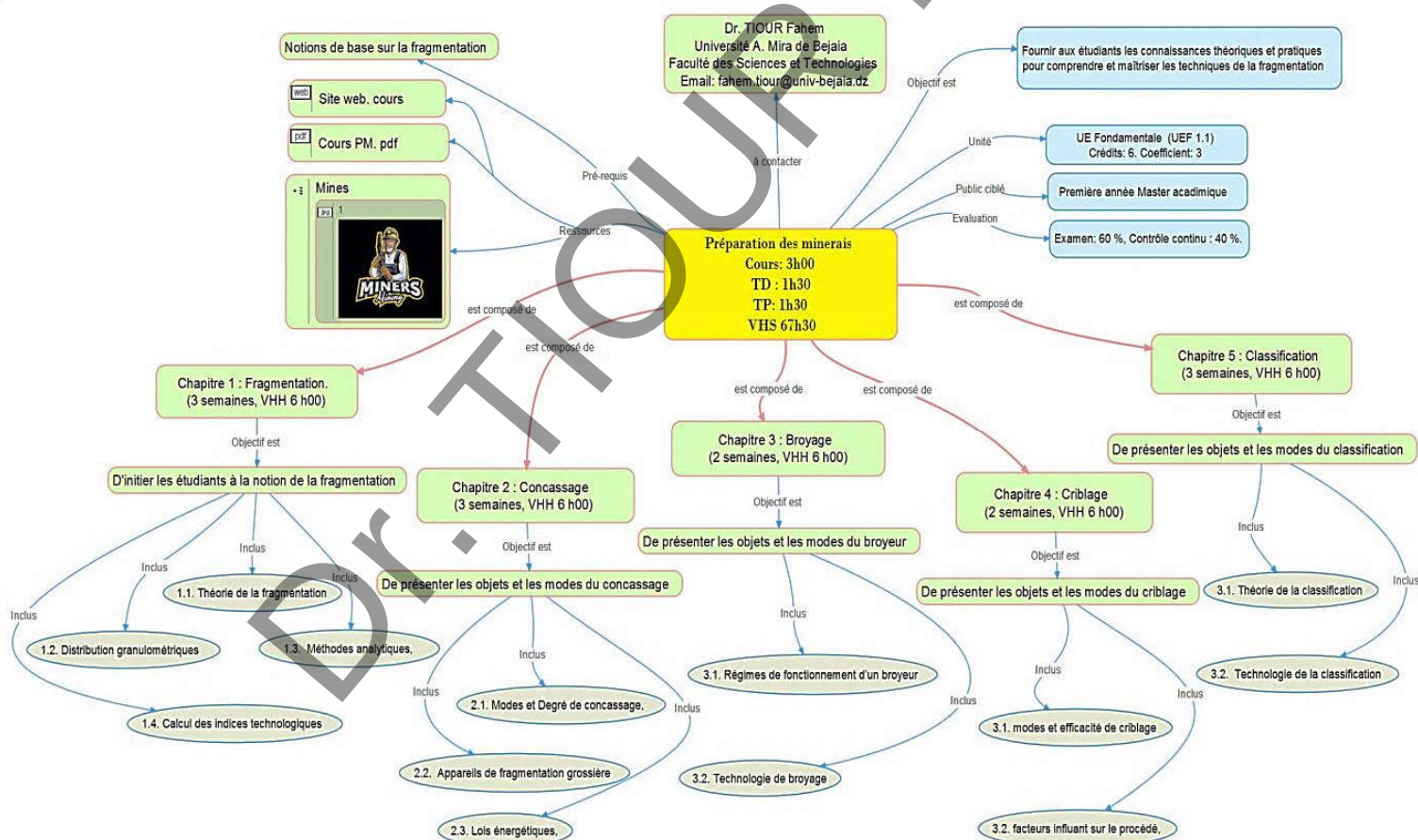
- ✓ Analyser et maîtriser les procédés de concassage et de broyage pour réduire la taille des particules.
- ✓ Choisir les équipements adaptés (concasseurs et broyeurs) selon les caractéristiques du minerai et les objectifs du traitement.

❖ Classification et criblage

- ✓ Comprendre les procédés de tri granulométrique pour classer les particules selon leur taille, forme et densité.
- ✓ Étudier l'utilisation des cribles, les hydrocyclones et autres dispositifs de classification.

○ Informations générales sur le cours

- ✓ **Module** : Préparation des minerais
- ✓ **Niveau** : Master 1
- ✓ **Enseignant** : Dr. TIOUR Fahem
- ✓ **E-mail** : fahem.tiour@univ-bejaia.dz
- ✓ **Volume horaire Semestriel** : 67h et 30 min (3h cours et 1h 30 de TD)
- ✓ **Code de l'unité de l'enseignement** : UEF 1.1.1
- ✓ **Crédits** : 06.
- ✓ **Coefficient** : 03.
- ✓ **Modalités d'évaluation des apprentissages**
 - **Note d'examen /20**
 - **Note de contrôle continu /20** = (Test 01 /7.5) + (Test 02 /7.5) + (Note d'assiduité/5). (Note d'assiduité = 3 pts pour la présence + 2 pts pour la participation)
 - **Note finale** = Note du contrôle continu*0.4 + Note d'examen final *0.6



Carte conceptuelle du cours : Préparation des minerais

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Avant-propos

Chapitre I : Théorie de la fragmentation

I.1. Introduction	10
I.2. Généralités sur la fragmentation mécanique des roches.....	10
I.3. Objectif du processus de la fragmentation mécanique des roches.....	11
I.3.1. Maille de libération	13
I.4. Principe du processus de la fragmentation mécanique	15
I.4.1. Processus de la fracturation mécanique	15
I.4.2. Divers modes de fragmentation	17
I.5. Facteurs influents la fragmentation mécanique des roches	18
I.5.1. Nature et caractéristiques du minerai.....	18
I.5.2. Type d'équipement utilisé	19
I.5.3. Paramètres opérationnels	19
I.5.4. Propriétés physiques du processus.....	19
I.5.5. Exigences spécifiques au processus.....	19
I.5.6. Maintenance et performance des équipements	19
I.6. Lois énergétiques.....	19
I.6.1. Loi de Rittinger.....	20
I.6.2. Loi de Kick.....	20
I.6.3. Loi de Bond	21
I.6.4. Autres relations.....	21
I.7. Types d'opérations de la fragmentation mécanique des roches.....	22

Chapitre II : Concassage

II.1. Introduction	24
II.2. Objectif de l'opération de concassage	24
II.3. Types de concasseurs et leurs principes de fonctionnement	25
II.3.1. Classification des concasseurs.....	25
II.3.1.1. Description générale du concassage primaire.....	26
II.3.1.1.1. Description et principe de fonctionnement du concasseur à mâchoire	26
II.3.1.1.2. Description et principe de fonctionnement du concasseur giratoire ...	28
II.3.1.1.2.1. Construction des concasseurs giratoires	28
II.3.1.1.3. Capacité de concassage	29
II.3.1.1.4. Choix d'un concasseur à mâchoires ou giratoire.....	30
II.3.1.2. Concasseurs secondaires et tertiaires	30
II.3.1.2.1. Description et principe de fonctionnement du concasseur à cône	31
II.3.1.2.2. Description et principe de fonctionnement du concasseur à cylindres..	33
II.3.1.2.3. Description et principe de fonctionnement du concasseur à percussion	34
II.4. Degré de concassage ou rapport de réduction	35

II.5. Etape et circuit de concassage	35
II.5.1. Opérations en circuit ouvert et fermé	36
II.5.2. Schémas de concassage en plusieurs étages	37

Chapitre III : Broyage

III.1. Introduction	40
III.2. Objective et principe de l'opération de broyage	40
III.3. Type de broyeur à tambour et leur principe de fonctionnement	42
III.3.1. Description et principe de fonctionnement des broyeurs à barres (tiges).....	42
III.3.2. Broyeur à boulets	44
III.3.2.1. Mouvement de la charge et vitesse de rotation du tambour.....	44
III.3.2.2. Corps broyants	45
III.3.3. Broyeur autogène et semi-autogène	46
III.3.3.1. Broyeur autogène	46
III.3.3.2. Broyeur semi-autogène	47
III.4. Milieu de broyage (humide, sec) et circuits de broyage.....	48
III.4.1. Broyage à sec	48
III.4.2. Broyage humide et circuits de broyage.....	48
III.4.3. Broyage en plusieurs étapes.....	52

Chapitre IV : Criblage

IV.1. Introduction	54
IV.2. Objectif et action du criblage.....	55
IV.3. Modes de criblage	55
IV.4. Surfaces criblantes.....	56
IV.4.1. Différentes types de surfaces criblantes.....	56
IV.4.1.1. Surfaces criblantes en tôles perforées	57
IV.4.1.2. Surfaces criblantes en grilles métalliques	57
IV.4.1.3. Surfaces criblantes en toiles métalliques.....	58
IV.4.1.4. Plaques perforées et grilles en matériau synthétique anti-abrasion.....	58
IV.4.1.5. Plaques perforées et grilles en caoutchouc anti-abrasion.....	59
IV.5. Choix des surfaces criblantes.....	59
IV.5.1. Coefficient de proposition des vides d'un crible.....	59
IV.6. Caractéristiques du procédé de criblage	61
IV.6.1. Stratification	61
IV.6.2. Capacité d'un crible	62
IV.6.2.1. Modèles Empiriques	62
IV.6.2.2. Modèles Numériques	63
IV.7. Facteurs influant l'efficacité de criblage	63
IV.7. 1. Taille des particules.....	63
IV.7. 2. Taux d'alimentation	64
IV.7. 3. Angle du crible.....	64
IV.7. 4. Forme des particules	64

IV.7. 5. Espace ouvert	64
IV.7. 6. Vibrations.....	65
IV.7. 7. Humidité.....	65

Chapitre V : Classification hydraulique et pneumatique

V.1. Introduction	67
V.2. Principe de la classification	67
V.3. Types de la classification	68
V.3.1. Classificateurs de sédimentation mécanique	69
V.3.2. Classificateurs de sédimentation non mécanique	72
V.3.3. Classificateurs hydrocyclones.....	73
V.3.3.1. Description et fonctionnement de l'hydrocyclone.....	73
V.3.3.2. Applications et avantages de la classification.....	74
V.3.4. Classificateurs pneumatiques.....	75
V.3.4.1. Quelques types courants de classificateurs pneumatiques.....	75
V.4. Principales étapes de la classification.....	76
V.4.1. Mise en suspension des particules.....	76
V.4.2. Application de forces de séparation.....	76
V.4.3. Classification par taille et densité.....	76
V.4.4. Recueil des fractions.....	76

Conclusion

Références bibliographiques

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Titre	page
Tableau IV.1	Pourcentage de vide en fonction des caractéristiques de la surface criblante à maille carrée	60
Tableau V.1	Comparaison des paramètres clés pour les classificateurs centrifuges et gravitationnels.....	68
Tableau V.2	Caractéristiques des principaux classificateurs.....	75

LISTE DES FIGURES

Figure	Titre	Page
Figure I.1	Substance utile libérée et non libérée	11
Figure I.2	Mode de libération par détachement et par fractionnement.....	12
Figure I.3	Sortes de particules mixtes.....	12
Figure I.4	Détermination de la maille de libération.....	13
Figure I.5	Substance minérale bloquée	14
Figure I.6	Forces de compression et manière de fracturation.....	15
Figure I.7	Déformation d'un réseau cristallin résultant de contraintes de traction ou de compression	16
Figure I.8	Concentration de contraintes à l'extrémité d'une fissure	16
Figure I.9	Technologie de la fragmentation	17
Figure I.10	Mécanisme de la fracturation	18
Figure I.11	Lois énergétiques	22
Figure II.1	Concasseur à mâchoire à double effet	26
Figure II.2	Schéma des forces agissantes lors de l'écrasement.....	27
Figure II.3	Concasseur giratoire	28
Figure II.4	Concasseur giratoire d'une installation de préparation des minerais.....	29
Figure II.5	Schéma de préparation mécanique des minerais avec circuit fermé	31
Figure II.6	Concasseur à cône (a) schéma fonctionnel et (b) coupe transversale.....	32
Figure II.7	Concasseurs à cônes: d'origine (a) standard, (b) à tête courte et moderne (c) secondaire et (d) concasseurs à cônes tertiaires.....	32
Figure II.8	Concasseur à cylindres	33
Figure II.9	Schéma d'un concasseur à marteaux et (b) gros plan des marteaux.....	34
Figure II.10	Cycle ouvert avec criblage préalable.....	36
Figure II.11	Cycle fermé avec criblage de contrôle.....	37
Figure II.12	Schémas de concassage à deux et trois	37
Figure II.13	Schémas de concassage à plusieurs étages.....	38
Figure III.1	Mécanismes de rupture	41
Figure III.2	Mouvement de la charge dans un broyeur à tambour.....	41
Figure III.3	Broyeur à barres industriel.....	42
Figure III.4	Types de broyeurs à barres selon la méthode de décharge.....	43
Figure III.5	Action de broyage préférentielle des tiges sur les matériaux grossiers...	44
Figure III.6	Broyeur à boulets cylindro-conique; (b) Broyeur à boulets cylindrique..	44

Figure III.7	Mouvement de la charge dans un broyeur à boulets.....	45
Figure III.8	Broyeur à décharge à grille.....	45
Figure III.9	Série de broyeur autogène.....	46
Figure III.10	Broyeur semi-autogène industriel.....	47
Figure III.11	Circuit broyeur à barres	49
Figure III.12	Schéma de préparation mécanique des minerais.....	50
Figure III.13	Circuit semi-autogène/broyeur à boulets.....	51
Figure III.14	Dispositions en circuit fermé: (a) Circuit de classification directe et (b) Circuit de classification inverse.....	51
Figure III .15	Circuit de broyage à deux étages du broyeur à boulets	52
Figure VI.1	Schéma de préparation mécanique avec criblage préalable.....	55
Figure VI.2	Schéma de préparation mécanique avec criblage de contrôle.....	56
Figure VI.3	Surfaces criblantes en grilles métalliques.....	58
Figure VI.4	Maille carrée d'un crible.....	60
Figure VI.5	Influence de la stratification sur la classification.....	61
Figure V.1	Comportements d'une particule solide située dans un champ d'attraction gravitationnelle	68
Figure V.2	Description d'un classificateur à vis.....	70
Figure V.3	Zones d'un classificateur mécanique.....	70
Figure V.4	Principe du classificateur mécanique : (a) classificateur de râteau, (b) classificateur à vis.	71
Figure V.5	Classificateur à vis.....	71
Figure V.6	Classificateur de sédimentation non mécanique (Opération de cône de décantation).....	72
Figure V.7	Parties constituant d'un hydrocyclone et séparateur électrostatique à tambour (effet couronne)	73 74
Figure V.8	Mécanisme de fonctionnement de l'hydrocyclone.....	74
Figure V.9	Types de décharge de la sousverse selon le diamètre de la buse de décharge.....	74

Avant-propos

La planète Terre est composée de plusieurs couches de roches, qu'elles soient solides, visqueuses ou liquides, possédant des propriétés distinctes et complémentaires. Depuis le noyau interne jusqu'à la croûte continentale, chaque couche se distingue par sa structure, son épaisseur et sa température. Parmi ces différentes couches, découvrez la croûte terrestre, c'est la partie externe de notre planète. Elle est celle que nous connaissons le mieux, car c'est là que vivent les êtres humains, ainsi que la faune et la flore.

La croûte terrestre est constituée des minerais qui sont des composés chimiques de un ou plusieurs éléments, il est plus ou moins stable dans l'environnement où il est situé. À fin de séparer physiquement les divers constituants d'une particule de minerai, il faut réduire sa taille jusqu'à une dimension proche de celle des grains de minéral de valeur et lorsque les engins d'exploitation minière apportent à l'atelier de préparation mécanique des minerais ou à l'usine d'enrichissement des minerais, la richesse contenue dans les blocs transportés n'est pas toujours apparente. On imagine bien que l'on puisse faire, à partir de ces blocs, extraire la petite portion désignée minéral utile (Substance utile). Pourtant, à regarder les gros blocs à leur arrivée au concentrateur, on ne voit pas toujours très bien ce qu'on peut en tirer. Ces matières premières minérales naturelles extraites des mines ne peuvent pas être utilisées naturellement dans l'industrie. Dans la plupart des cas, parce qu'elles ne répondent pas aux exigences de qualité. Elles contiennent souvent des composants nocifs. Ces derniers doivent être éliminés autant que possible du minerai avant le traitement métallurgique.

C'est là qu'intervient la minéralurgie, qui est l'ensemble des étapes, des méthodes et des techniques permettant d'extraire des blocs de la mine la substance utile qui y est contenu. En d'autres mots, la minéralurgie permet de valoriser, de bonifier le minerai tel qu'il sort de la mine. Cela peut s'accomplir seulement après avoir réduit les gros blocs, grâce aux méthodes de préparation des minerais (concassage, broyage, criblage, tamisage et de la classification), à une dimension telle que l'on puisse ensuite séparer efficacement les uns des autres les minéraux utiles de la gangue.

Ainsi, la minéralurgie comporte deux principaux objectifs, soit d'éliminer le maximum de gangue présente dans le minerai et empêcher les pertes de minéral ou de minéraux utiles avec les substances rejetées : le produit final contenant les substances rejetées s'appelle le rejet, et le produit final enrichi est le concentré. La minéralurgie comprend donc trois grandes étapes :

- ❖ La première étape consiste en la préparation mécanique, au cours de laquelle les blocs de minerai sont brisés jusqu'à ce que les minéraux les constituant soient dissociés les uns des autres. Le produit obtenu à la fin de cette étape est idéalement un mélange de particules formées de minéraux utiles seulement et de gangue seulement. Le concassage, le broyage, le criblage et la classification sont les sous-étapes de la préparation mécanique. Ils sont décrits dans les chapitres II-V.

- ❖ La deuxième étape de la minéralurgie consiste en la concentration ou traitement du minerai. Elle permet de séparer des minéraux utiles des minéraux de gangue pour obtenir un concentré et un rejet. Les différentes méthodes de concentration employées dépendent de la classe des substances utiles visées.

Parmi les **méthodes physiques** de traitement, il y a les méthodes gravimétriques, basées sur les différences de masse volumique des minéraux à séparer. Les méthodes magnétiques sont basées sur les différences de propriétés magnétiques des minéraux. Quant aux méthodes électrostatiques, elles servent à séparer les minéraux selon leur conductivité électrique. Ces méthodes physiques sont généralement plus anciennes, plus simples et moins coûteuses que les autres. Elles conviennent particulièrement bien aux minerais pour lesquels les grains de minéraux sont relativement gros.

La flottation permet de séparer les minéraux les uns des autres en modifiant les surfaces de certains d'entre eux pour les rendre hydrophobes; ces minéraux deviennent donc susceptibles d'être entraînés par des bulles d'air. C'est une méthode **physico-chimique** et une des plus complexes.

Certains minerais, comme les minerais d'or, de bauxite et d'uranium, requièrent des **méthodes chimiques** (hydrométallurgie dans ces cas) pour les enrichir. **L'hydrométallurgie** regroupe les techniques permettant de mettre en solution. De concentrer, de purifier et de récupérer le métal à partir de solutions aqueuses. Elle sert aussi pour l'extraction des métaux à partir des concentrés, comme cela se fait pour le zinc. Une autre méthode chimique d'extraction de métaux d'une importance capitale est la **pyrométallurgie**, où l'on fait essentiellement intervenir les hautes températures (la plupart du temps le point de fusion des concentrés est dépassé), ce qui permet d'extraire la substance utile.

Une autre méthode chimique employée pour récupérer les métaux est **l'électrométallurgie**; elle se pratique sur les sels dissous, donc sur le minéral utile fusionné grâce à la présence d'un fondant. Cette méthode est utilisée pour les métaux actifs, tels l'aluminium et le magnésium.

- ❖ La troisième et dernière étape de la minéralurgie est l'enlèvement de l'eau ou la séparation solide-liquide. Les techniques employées sont l'épaississage (ou la décantation), la filtration et le séchage.

Les méthodes physiques et physico-chimiques étant généralement moins coûteuses que les méthodes chimiques, le maximum d'enrichissement devrait être pratiqué avant d'utiliser ces dernières. La moindre particule de gangue qui demeure après l'étape de concentration devra être éliminée par des techniques plus coûteuses.

Aussi, la plupart du temps, le complexe industriel où se pratique l'extraction de la substance utile est situé dans une autre localité, souvent très éloignée de celle où est concentré et exploité le minerai. On économise donc en coûts de transport si l'on enrichit le minerai sur place, sur le site d'exploitation.

Enfin, pour les minerais polymétalliques, tels ceux contenant du cuivre, du plomb et du zinc, il est essentiel d'effectuer une concentration de façon à obtenir plusieurs concentrés et un rejet avant d'employer une méthode pyrométallurgique; dans le cas contraire, il serait difficile, sinon impossible, de réussir la même opération, c'est-à-dire de séparer chacun des éléments, uniquement par voie pyrométallurgique.

Avant d'appliquer une méthode de concentration sur un minerai, dans tous les cas il faut réduire la dimension de la roche, de sorte que les minéraux constitutifs soient libérés minimalement les uns des autres. L'ensemble des techniques s'appelle, rappelons-le, la préparation mécanique des minerais, que nous verrons en détail dans le présent cours.

Par définition, le minerai est défini comme un **solide, naturel, homogène** avec une **structure atomique ordonnée** et une **composition définie**.

- ❖ **Solide** : Ceci ne demande pas de précision, mais l'on peut noter que le mercure métallique, que l'on trouve à l'état naturel sous forme liquide, est considéré comme un minéral, alors que la glace, qui répond à la définition ci-dessus, ne l'est pas.
- ❖ **Naturel** : Ce point est important, car pour être qualifiée de minéral, une substance doit avoir été observée dans la nature.
- ❖ **Homogène** : C'est un point délicat de la définition. Pour être plus précis, il faudrait dire « macroscopiquement homogène », car l'homogénéité d'un minéral dépend de l'échelle à laquelle on l'observe. Au cours des 30 dernières années, beaucoup de minéraux ont été disqualifiés, car, observés à très petite échelle, ils étaient en fait constitués d'un mélange de minéraux.
- ❖ **Structure atomique ordonnée** : Ceci veut dire qu'un minéral doit être cristallisé, c'est-à-dire qu'il doit présenter une structure atomique périodique organisée à longue distance. Il existe des exceptions, par tradition, l'opale et l'ambre, qui ne sont pas cristallisés, sont considérés comme des minéraux.
- ❖ **Composition chimique définie** : C'est la partie de la définition la plus difficile à appréhender. Quelques minéraux ont des compositions chimiques simples et invariables (quartz : SiO_2 , calcite : CaCO_3), mais la plupart sont des **solutions solides**, c'est-à-dire que leur composition chimique varie, parfois dans des proportions importantes, suivant des lois précises et bien connues. La notion de solution solide est fondamentale en minéralogie. La composition chimique de l'olivine, par exemple, varie de façon continue entre Mg_2SiO_4 et Fe_2SiO_4 .

Chapitre I

Théorie de la fragmentation

I.1.Introduction

Les travaux d'exploitation minière en général utilisent de l'explosif pour extraire les minerais, cette étape est considérée comme la première étape de la fragmentation. Par contre, La fragmentation dans l'usine de traitement des minerais, se déroule sous la forme d'une séquence de processus de concassage et de broyage, parce que la plupart des minéraux sont finement disséminés et intimement associés à la gangue, ils doivent d'abord être libérés avant que la séparation puisse être entreprise. Ceci est réalisé par fragmentation, dans laquelle la taille des particules du minerai est progressivement réduite jusqu'à ce que les particules propres de minerai puissent être séparées par les méthodes disponibles.

La fragmentation à ses débuts est effectuée afin de rendre le matériau fraîchement extrait plus facile à manipuler par les convoyeurs et les transporteurs de minerai et dans le cas des produits de carrière où de mine pour produire un matériau de granulométrie contrôlée.

I.2. Généralités sur la fragmentation mécanique des roches

Les roches sont essentiellement constituées de minéraux et il n'existe pas de roches qui ne contiennent pas de minéraux, la plupart sont exclusivement constituées de minéraux. Certaines roches sont monominérales (un sable est constitué en général quasi exclusivement de quartz, les calcaires sont essentiellement formés de calcite), mais la plupart sont polyminérales : un granite contient comme minéraux principaux (on dit aussi « cardinaux ») du quartz, du feldspath plagioclase, du feldspath potassique, accompagnés d'un autre minéral comme la biotite ou l'amphibole, et de plusieurs minéraux dits « accessoires », car présents en faible quantité, comme le zircon, la monazite et l'apatite.

La fragmentation (comminution) est l'opération de partage d'un corps en fragments plus ou moins volumineux et plus ou moins durs. Dans le cadre des travaux d'exploitation minière, la fragmentation des solides regroupe un ensemble de techniques (concassage et broyage) ayant pour but de réduire les dimensions d'un solide de volume donné, en éléments de volume plus petit, par action mécanique externe et parfois interne. Elle a pour but de libérer.

La fragmentation cherche toujours à satisfaire des exigences relatives à des utilisations ultérieures. Elle vise, généralement, au moins un des **buts** suivants :

- ❖ Réduire les dimensions afin de faciliter la manutention, le conditionnement ou l'utilisation ;
- ❖ Réduire les dimensions afin de libérer les constituants avant une opération de séparation.

La fragmentation d'un produit peut se faire suivant plusieurs méthodes selon les propriétés physiques des minéraux et le type de l'appareil utilisée. Ces techniques dépendent de la **dureté**, de la **friabilité** et de la **texture** du matériau à fragmenter.

I.3. Objectif du processus de la fragmentation mécanique des roches

La fragmentation ou, comminution, consiste en la réduction des blocs de minerai à l'aide de concasseurs et de broyeurs. L'efficacité de la fragmentation augmente de beaucoup lorsqu'on intercale entre les concasseurs et les broyeurs des appareils de classement (cribles et classificateurs). L'ensemble de tous ces appareillages et des équipements s'appelle un circuit de la fragmentation mécanique. Les objectifs principaux de la fragmentation sont les suivant :

- ✓ Réduction de la taille des gros morceaux en petits morceaux.
- ✓ Production de solides de la gamme de tailles souhaitée.
- ✓ Libération de minéraux utiles de la gangue.
- ✓ Préparation des matières premières pour différentes opérations d'enrichissement.
- ✓ Augmentation de la surface de réaction chimique.
- ✓ Commodité de manutention et de transport.

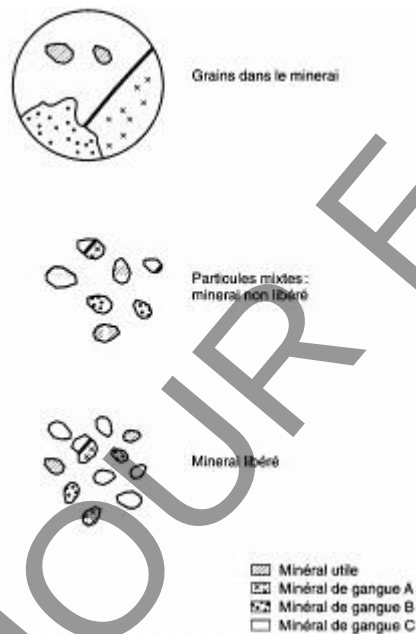


Figure I.1 : Substance utile libérée et non libérée

Rappelons que la libération des particules est le but d'une fragmentation. Les particules sont libérées quand elles ont une seule composition chimique, chaque particule libérée est donc constituée d'un unique minéral [1]. Bien qu'une libération complète ne soit pas exigée ni recherchée et qu'elle soit impossible à réaliser en pratique, une bonne libération est essentielle pour une concentration efficace et satisfaisante. Une particule non libérée s'appelle une particule mixte, elle comprend plusieurs minéraux soudés ensemble. La figure I.1 illustre des ensembles de particules libérées et non libérées.

La texture est particulièrement le mode d'assemblage des grains, qui détermine la facilité d'effectuer l'opération de la libération des particules d'un minerai. Si le lien entre les grains est plus faible que le lien chimique entre les molécules des grains, on peut libérer les particules d'un minerai par détachement, c'est-à-dire que, au cours de la fragmentation, les fractures se produisent entre les grains. Ce mode de libération est plutôt rare. Par contre, la

plupart du temps, le lien entre les grains est aussi fort que celui entre les molécules des grains; dans ces cas, pendant la fragmentation, les fractures se produisent au hasard, autant à travers les grains qu'entre eux-ci. La libération est atteinte par suite d'un fractionnement répété et ce jusqu'à une dimension de particules de beaucoup inférieure à la dimension des grains, contrairement à l'autre mode de libération. Par exemple, pour des particules d'un diamètre deux fois plus petit que celui des grains, le degré de libération est d'environ 10 %. Il ressort de ces remarques qu'il est très coûteux de libérer la majorité des minerais. Les figure I.2 ; I.3 illustrent les deux modes de libération et les différent type de particules mixtes.

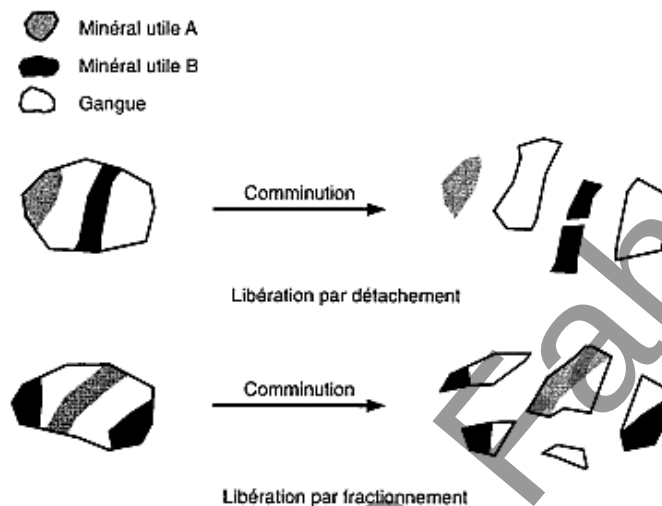


Figure I.2 : Mode de libération par détachement et par fractionnement

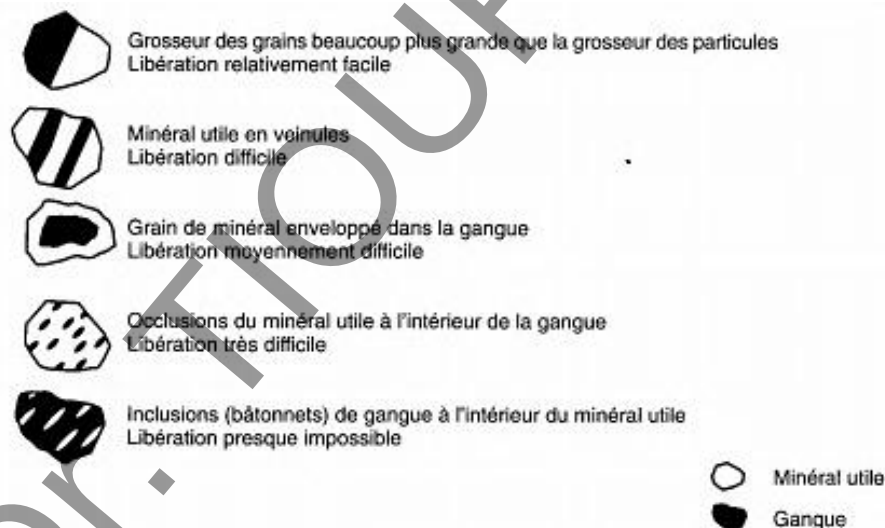


Figure I.3 : Sortes de particules mixtes

À un moment donné, l'ensemble des particules produites par concassage et broyage est un mélange de particules libérées et de mixtes. La présence de mixtes dans un minerai broyé rend les opérations de concentration beaucoup plus difficiles.

I.3.1. Maille de libération

La maille de libération est la taille d'une particule minérale à laquelle ce minéral est complètement libéré et il est clair que l'objectif principal de la fragmentation est la libération de la substance minérale de la gangue et la notion de granulométrie s'applique lorsqu'on veut déterminer la maille de libération. C'est-à-dire du diamètre que devraient avoir les particules pour que la substance utile soit libérée de façon satisfaisante. La libération est la première et la plus importante étape de la valorisation minérale. La deuxième étape (séparation) est impraticable si la première étape, la libération, n'est pas accomplie avec succès.

La libération des minéraux utiles de la gangue est accomplie par réduction de taille ou fragmentation, qui implique le concassage et le broyage à une taille telle que le produit est un mélange de particules relativement propres de minéraux et de gangue, c'est-à-dire que les minéraux du minerai sont libérés ou libres. L'objectif de la fragmentation est la libération à la granulométrie la plus grossière possible. Si un tel objectif est atteint, non seulement l'énergie est économisée, mais en réduisant la quantité de fines produites, les étapes de séparation ultérieures deviennent plus faciles et moins coûteuses à utiliser. Si des produits solides de haute qualité sont nécessaires, une bonne libération est essentielle. Cependant, pour les processus hydro métallurgiques ultérieurs, tels que la lixiviation, il peut seulement être nécessaire d'exposer le minéral requis.

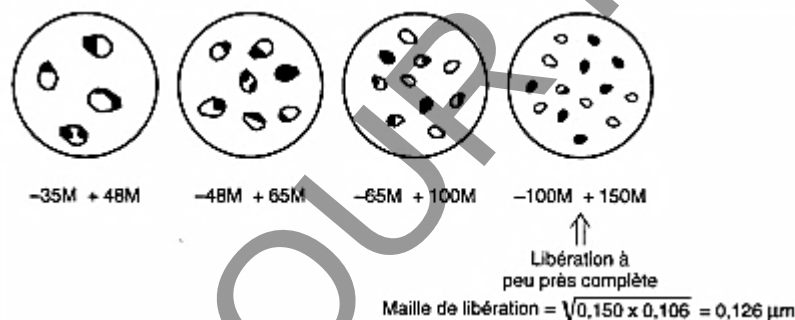


Figure I.4 : Détermination de la maille de libération

Le broyage est souvent le plus gros consommateur d'énergie, représentant jusqu'à 50 % de la consommation d'énergie d'un concentrateur [2]. Comme c'est ce processus qui permet de libérer les valeurs de la gangue, c'est également le processus essentiel pour une séparation efficace des minéraux. Afin de produire des concentrés propres avec peu de contamination par les minéraux de gangue, il est souvent nécessaire de broyer le minerai à une taille fine ($< 100 \mu m$). Le broyage fin augmente les coûts énergétiques et peut conduire à la production de particules "visqueuses" très fines et difficiles à traiter qui peuvent être perdues dans les résidus, voire jetées avant le processus de concentration. Le broyage devient donc un compromis entre la production de concentrés propres (de haute qualité), les coûts d'exploitation et les pertes de minéraux fins. Si le minerai est de faible qualité et que les minéraux ont une très petite taille de grain et sont disséminés à travers la roche, les coûts énergétiques de broyage et les pertes de fines peuvent être élevés.

L'énergie consommée pour l'opération de broyage est élevée par rapport à d'autres opérations telles que le criblage, l'enrichissement, la déshydratation, le transport. Il faut donc veiller à minimiser la production de fines (plus fines que nécessaire) qui consommeront de l'énergie supplémentaire pour la réduction en fines.

En pratique, la libération complète est rarement obtenue, même si le minerai est broyé à une granulométrie inférieure à celle des minéraux souhaités. Ceci est illustré par la figure I.5, qui montre un morceau de minerai contenant un grain de minéral précieux avec un motif de rupture superposé qui divise le morceau en particules cubiques de volume identique (pour simplifier) et d'une taille inférieure à celle du grain minéral. On peut juger que chaque particule produite contenant du minéral contient également une partie de gangue. La libération complète n'a pas été atteinte, mais la majeure partie de la gangue a cependant été libérée du minéral précieux

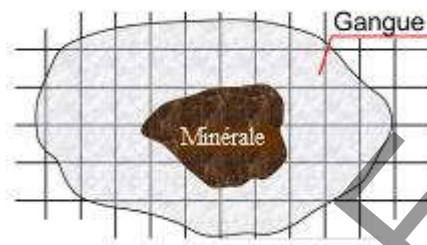


Figure I.5 : Substance minérale bloquée

Les particules de minérale bloquées et la gangue sont connues sous le nom de mixte, et une libération supplémentaire de cette fraction ne peut être obtenue que par une fragmentation supplémentaire. Le degré de libération fait référence au pourcentage de minéraux présents sous forme de particules libres dans le minerai brisé par rapport à la teneur totale en minéraux des particules bloquées et libres.

La libération peut être élevée s'il existe de faibles limites entre les particules minérales et les particules de gangue, ce qui est souvent le cas avec des minerais composés principalement de minéraux formant des roches, en particulier de minéraux sédimentaires. Ceci est parfois appelé « libération par détachement ». Habituellement, cependant, l'adhérence entre les minéraux et la gangue est forte et pendant la fragmentation, les divers constituants sont fendus à travers les joints de grains; c'est-à-dire que la rupture est aléatoire. La casse aléatoire produit une quantité importante de mixte. Les approches pour augmenter le degré de libération impliquent de diriger les contraintes de rupture aux limites des grains minéraux, de sorte que la roche puisse être brisée sans casser les grains minéraux [3]. Par exemple, des micro-ondes peuvent être utilisées, ce qui provoque un échauffement différentiel entre les minéraux constitutifs et crée ainsi des fractures de contrainte aux joints de grains [4].

La quantification de la libération est maintenant courante en utilisant les systèmes de microscope électronique à balayage. Il convient de noter qu'un degré élevé de libération n'est pas toujours nécessaire et peut être indésirable dans certains cas. Par exemple, il est possible d'obtenir une récupération élevée des valeurs par gravité et séparation magnétique même à

travers les minéraux précieux sont complètement enfermés par la gangue, et donc le degré de libération des valeurs est nul. Tant qu'une différence prononcée de densité ou de susceptibilité magnétique est apparente entre les particules bloquées et les particules de gangue libres, la séparation est possible. D'autre part, la flottation nécessite au moins une surface du minéral précieux à exposer.

I.4. Principe du processus de la fragmentation mécanique

L'opération consistant à appliquer une force sur la particule pour la casser est appelée réduction de taille. La fragmentation est un terme général pour la réduction de la taille qui peut être appliqué sans égard au mécanisme de rupture réel impliqué. Dans toute opération de fragmentation, la rupture d'une particule individuelle se produit simultanément avec celle de nombreuses autres particules. Le produit de rupture de toute particule est intimement mélangé à ceux d'autres particules. Cependant, chaque particule individuelle se brise sous l'effet des contraintes qui lui sont appliquées et à elle seule.

I.4.1. Processus de la fracturation mécanique

La fracture de la particule se produit à la suite de l'application d'une force. Lorsqu'une force est appliquée sur une particule, une contrainte se développe à l'intérieur de la particule, lorsque cette contrainte dépasse la contrainte ultime, la particule se brise. Considérons une particule soumise à deux forces opposées par une charge concentrée comme le montre la figure I.6. La contrainte principale dans la direction z est une contrainte de compression dans toute la particule. La contrainte principale dans les directions x et y est une contrainte de compression adjacente à les points de charge mais une contrainte de traction à l'intérieur de la particule. Cette contrainte de traction est inférieure à la contrainte de compression. Comme la résistance à la traction est aussi faible que 1/10 de la résistance à la compression, la fracture se produit principalement à cause de la contrainte de traction qui entraîne la rupture en un petit nombre de gros morceaux. En raison de la compression adjacente aux points de chargement, il en résulte un grand nombre de petites pièces.

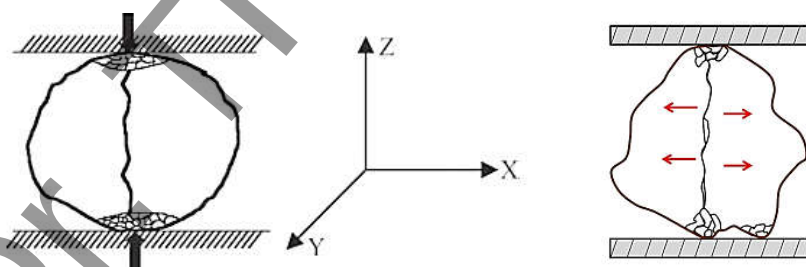


Figure I.6 : Forces de compression et manière de fracturation

La plupart des minéraux sont des matériaux cristallins dans lesquels les atomes sont régulièrement disposés en réseaux tridimensionnels. La configuration des atomes est déterminée par la taille et les types de liaisons physiques et chimiques qui les maintiennent ensemble. Dans le réseau cristallin des minéraux, ces liaisons interatomiques ne sont efficaces que sur de petites distances et peuvent être rompues si elles sont prolongées par une contrainte

de traction. De telles contraintes peuvent être générées par une charge de traction ou de compression (figure I.7).

Même lorsque les roches sont uniformément chargées, les contraintes internes ne sont pas uniformément réparties, car la roche est constituée d'une variété de minéraux dispersés sous forme de grains de différentes tailles. La répartition des contraintes dépend des propriétés mécaniques des minéraux individuels, mais surtout de la présence de fissures ou de défauts dans la matrice, qui agissent comme des sites de concentration des contraintes (Figure I.8).

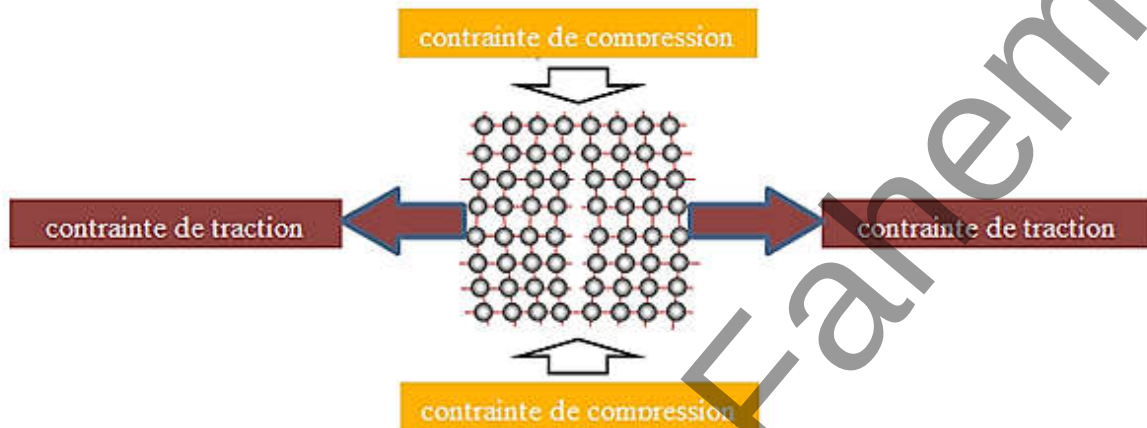


Figure I.7 : Déformation d'un réseau cristallin résultant de contraintes de traction ou de compression

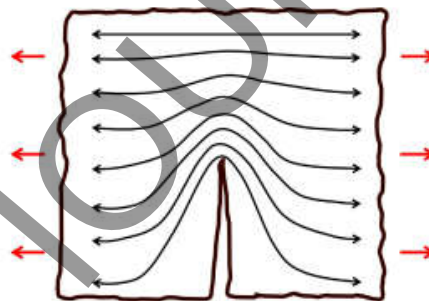


Figure I.8 : Concentration de contraintes à l'extrémité d'une fissure

Les particules naturelles sont de forme irrégulière et la charge n'est pas uniforme mais est obtenue par des points ou de petites zones de contact. La rupture est obtenue principalement par écrasement, impact et attrition, et les trois modes de rupture (compression, traction et cisaillement) peuvent être discernés en fonction de la déformation de la figure I.7 d'un réseau cristallin résultant de contraintes de traction ou de compression. Figure I.8 Concentration de contraintes à l'extrémité d'une fissure.

Lorsqu'une particule irrégulière est brisée par compression ou écrasement, les produits se répartissent en deux gammes de tailles distinctes:

Les particules grossières résultant de la rupture en traction induite et les fines résultantes de la rupture en compression près des points de chargement ou par cisaillement au niveau des saillies (figure I.9). La quantité des fines produites peut être réduite en minimisant la surface de chargement, ce qui est souvent fait dans les concasseurs à compression en utilisant des surfaces de concassage ondulées [5]

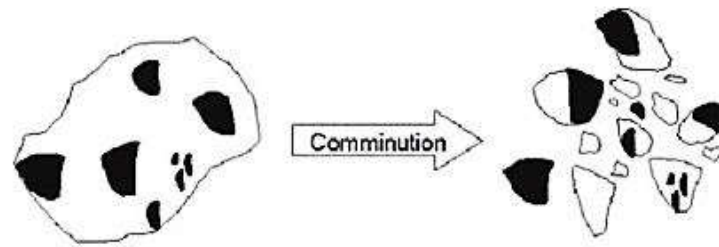


Figure I.9 : Technologie de la fragmentation

I.4.2. Divers modes de fragmentation

Plusieurs opérations mécaniques élémentaires peuvent être utilisées pour fragmenter les solides. La réduction de dimension peut se faire par :

❖ **Fracture par impact**

- ✓ Charge appliquée soudaine et élevée
- ✓ Particule absorbe plus d'énergie que pour une fracture
- ✓ Produits de dimension semblable

❖ **Fracture par compression**

- ✓ Produits grossiers (résultat de propagation de fissures)
- ✓ Produits fins (compression aux points de contact)

❖ **Fracture par attrition**

- ✓ Produit beaucoup plus de fines particules (indésirable)

La force de compression peut être appliquée à une vitesse rapide ou lente. Dans les conditions de compression lente, l'énergie appliquée est juste suffisante pour charger relativement peu de régions de la particule au point de fracture et seules quelques particules en résultent. Leur taille est relativement proche de la taille des particules d'origine. Dans des conditions de chargement rapide, comme lors d'un impact à grande vitesse, l'énergie appliquée est bien supérieure à celle requise pour la fracture. De nombreuses zones de la particule sont surchargées et le résultat est comparativement grand nombre de particules avec une large distribution granulométrique. L'impact provoque une rupture immédiate sans contraintes résiduelles.

L'attrition ou la fracture par abrasion se produit lorsqu'une force (force de cisaillement) agit parallèlement à la surface de la particule. En raison d'une énergie insuffisante appliquée sur la particule, une contrainte localisée se produit et une petite zone est fracturée pour donner des particules très fines.

En pratique, ces événements ne se produisent pas isolément. Par exemple, lorsque les particules sont écrasées par compression comme dans le cas d'un concasseur, des particules

grossières seront produites résultant de la contrainte de traction induite, des particules fines seront produites résultant de la contrainte de compression près des points de chargement et par attrition due à l'interaction des particules. Tous ces types de forces et de fractures, ainsi que la taille des particules après fracture, sont illustrés à la figure I.10.

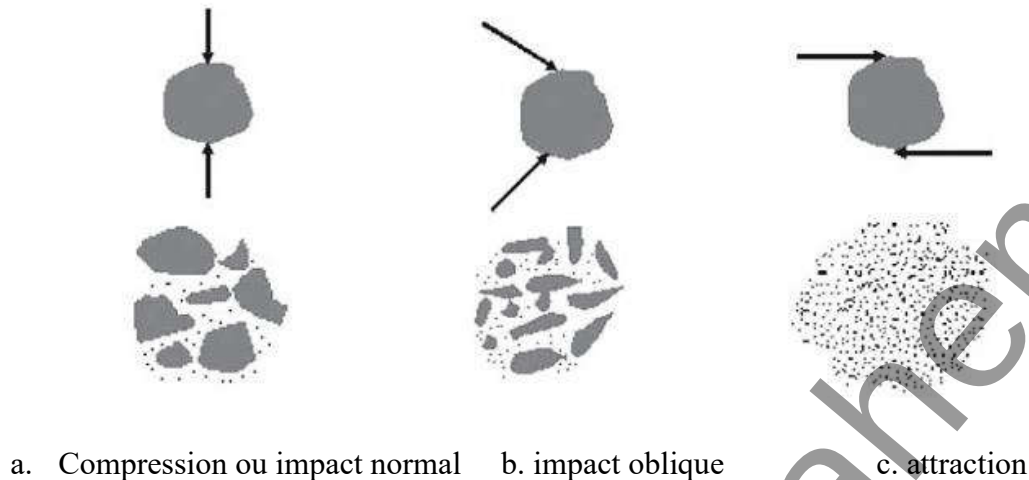


Figure I.10 : Mécanisme de la fracturation

On peut résumer que tous les types de forces existent dans toute opération de réduction de taille, même si les unités individuelles de réduction de taille sont principalement conçues pour l'application d'un type de force.

I.5. Facteurs influents la fragmentation mécanique des roches

Dans une station de préparation mécanique utilisée dans l'industrie minière, la fragmentation des roches joue un rôle crucial pour rendre les minerais exploitables et faciliter leur traitement ultérieur (tri, enrichissement). Pour une station de préparation mécanique, la fragmentation optimale repose sur une compréhension approfondie du matériau traité, une utilisation appropriée des équipements et un contrôle rigoureux des paramètres opérationnels. Les principaux facteurs influençant la fragmentation dans ce contexte sont :

I.5.1. Nature et caractéristiques du minéral

- **Dureté** : Les minerais durs (ex. quartzite) nécessitent plus d'énergie pour être fragmentés que les minerais tendres (ex. calcaire).
- **Granulométrie initiale** : La taille des blocs d'entrée influence la charge de travail des machines de concassage et de broyage.
- **Structure interne** : La présence des fissures naturelles ou d'hétérogénéité facilite la fragmentation.

I.5.2. Type d'équipement utilisé

- **Concasseurs** : Différents types de concasseurs (à mâchoires, giratoires, à percussion, à cône) influencent la taille et la forme des fragments produits.
- **Broyeurs** : Les broyeurs (à boulets, à barres, autogènes ou semi-autogènes) réduisent davantage la taille des particules.
- **Cribles** : Permettent de contrôler la granulométrie des roches et de séparer les fractions surdimensionnées et sous dimensionnées.

I.5.3. Paramètres opérationnels

- **Taux d'alimentation** : Une surcharge ou une sous-charge de la machine peut entraîner une fragmentation inefficace.
- **Vitesse et énergie d'impact** : Les réglages de vitesse influencent la force exercée sur la roche.
- **Réglage des ouvertures** : La distance entre les mâchoires ou les plaques des concasseurs détermine la taille finale des fragments.

I.5.4. Propriétés physiques du processus

- **Humidité** : Les minerais humides peuvent coller aux machines, réduisant l'efficacité de la fragmentation.
- **Température** : Les variations de température peuvent altérer les propriétés mécaniques des minerais.
- **Densité apparente** : Les roches plus compactes demandent plus d'énergie pour être fragmentés.

I.5.5. Exigences spécifiques au processus

- **Granulométrie cible** : Les stations de préparation mécanique sont conçues pour produire des particules de tailles spécifiques adaptées aux étapes suivantes (ex. flottation, lixiviation).
- **Minimisation des fines** : Une fragmentation excessive peut produire trop de fines (poussières), qui peuvent être difficiles à traiter.

I.5.6. Maintenance et performance des équipements

- **Usure des pièces** : Les plaques, mâchoires ou marteaux usés réduisent l'efficacité de la fragmentation.
- **Entretien** : Un entretien inadéquat peut entraîner des pertes d'efficacité ou des pannes.

I.6. Lois énergétiques

Trois principales théories ont été émises pour décrire la relation qui existe entre l'énergie consommée E par le matériau et la réduction de la dimension D de ce matériau lors de la fragmentation. Jusqu'à présent, les hypothèses avancées pour élaborer cette relation ne sont pas vigoureusement prouvées puisque l'on ne sait toujours pas mesurer la quantité

d'énergie réellement absorbée par les particules au cours de leur fragmentation. On peut mesurer que l'énergie totale consommée par l'appareil de fragmentation.

I.6.1. Loi de Rittinger

Rittinger (1867) postule que l'énergie consommée E est directement proportionnelle à la quantité de surface nouvellement créée. Il écrit alors la relation :

$$E = K_1 (S_2 - S_1)$$

Avec : K_1 : constante qui dépend à la fois du matériau et de l'appareil de fragmentation
 S_1, S_2 : surfaces des particules, respectivement, avant et après la fragmentation.

Si l'on considère l'énergie spécifique E' par unité de volume on peut écrire :

$$E' = E/V = K_1 (S_2/V - S_1/V)$$

$$E' = K_1 (1/D_2 - 1/D_1)$$

Avec : D_1, D_2 : dimension initiale et finale des particules

V : volume du matériau

Le point faible de cette loi réside dans le fait que Rittinger n'a pas tenu compte de la déformation du matériau avant sa fragmentation. La quantité de surface produite ne peut être proportionnelle au travail nécessaire fourni que si elle est proportionnelle au produit de la contrainte appliquée par la longueur de déformation.

I.6.2. Loi de Kick

Pour Kick (1885), l'énergie nécessaire pour fragmenter un matériau homogène est proportionnelle à la variation du volume, donc au rapport de réduction $R = D_1/D_2$. Cette deuxième loi de la fragmentation s'écrit alors :

$$dE = - K_K dV$$

Soit

$$dE = - K_K dV / V = K_K dD/D$$

Et l'on obtient alors après intégration,

$$E = - K_K \ln (D_1/D_2) = K_K \ln R$$

Le travail nécessaire pour réduire une tonne de matériau est donc le même pour un rapport de réduction donné, quelle que soit la dimension initiale du matériau. Cela n'est évidemment pas compatible avec la pratique. De plus, le matériau à fragmenter n'est pas homogène et la fragmentation dépend alors de ces imperfections (fissures, dislocations, etc.).

I.6.3. Loi de Bond

Comme aucune des deux précédentes lois ne s'accordait bien avec l'ensemble des résultats observés lors des opérations de fragmentation industrielle, Bond (1951) a proposé, en analysant une multitude de résultats expérimentaux, une troisième loi qui postule que l'énergie spécifique requise est inversement proportionnelle à la racine carrée de la nouvelle surface produite. Cette loi se veut un compromis entre celles de Rittinger et de Kick. La forme générale de la loi de Bond s'écrit :

$$W = W_1 [(100/D_2)^{0.5} - (100/D_1)^{0.5}]$$

$$W = 10W_1 (1/D_2^{0.5} - 1/D_1^{0.5})$$

Avec : D_1 et D_2 sont les dimensions, en micromètres, des grains respectivement avant et après fragmentation, choisies comme correspondant à la dimension D_{80} de la maille carrée laissant passer 80% en masse du matériau, et W_1 une constante appelée indice énergétique (Works index) que l'on détermine expérimentalement par des essais de fragmentation réalisés au laboratoire.

I.6.4. Autres relations

L'insuffisance des lois de Rittinger, Kick et Bond et leur nature contradictoire ont conduit à rechercher d'autres relations entre la réduction dimensionnelle et l'énergie consommée.

- ❖ Ainsi, **Svensson et Murkes** (1957) considèrent que dans l'expression de Bond l'exposant de $100/D$ n'est pas une constante et contestent le choix du D_{80} . Ils proposent alors une relation plus générale de la forme :

$$E = K_{sm} [(100/D_2)^n - (100/D_1)^n]$$

Avec : D : dimension moyenne des particules qui peut être obtenue en première approximation par la moyenne géométrique des dimensions D_{10} , D_{30} , D_{50} , D_{70} , D_{90} .

K_{sm} : constante

N : paramètre à déterminer pour chaque matériau et pour un mode de fragmentation donné.

- ❖ **Charles** (1957) propose une loi générale de la forme :

$$dE = - K_c (dD/D^n)$$

Avec : K_c : constante

- ✓ Après intégration de cette relation, on retrouve pour $n = 1$ la loi de Kick (extrême grossier) (concassage),
- ✓ pour $n = 1,5$ la loi de Bond (intermédiaire (broyage))
- ✓ pour $n = 2$ la loi de Rittinger. (Extrême fin (re-broyage))

- ❖ Pour **Hukki (1961)**, la relation qui lie l'énergie à la réduction des dimensions des particules est une relation composite de celles établies par Rittinger, Kick et Bond qui s'écrit :

$$dE = -K_h dD/D^{(D)}$$

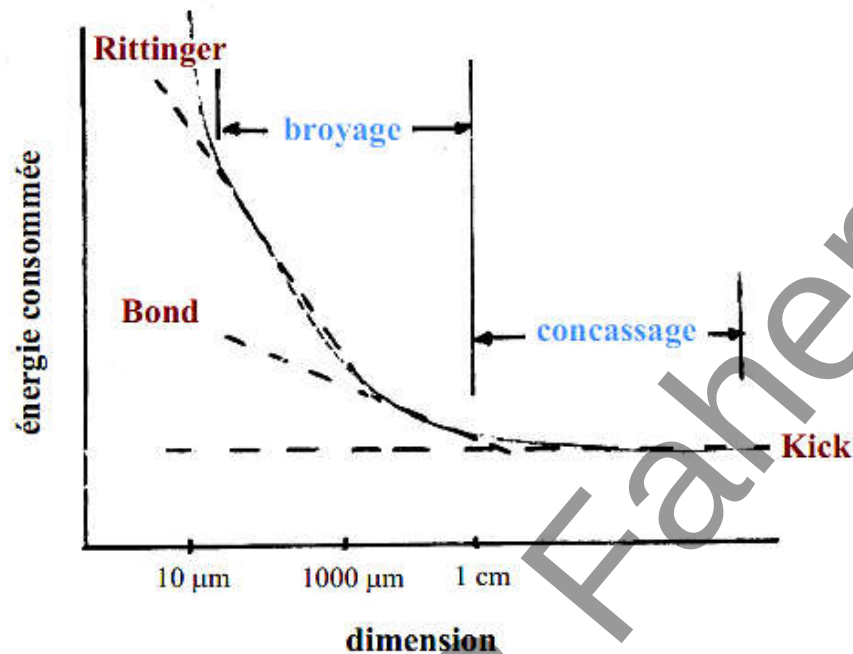


Figure I.11 : Lois énergétiques

I.7. Types d'opérations de la fragmentation mécanique des roches

Le minerai au fil de l'exploitation est assez grossier et ne peut pas être réduit à une taille fine en une seule étape. Cela peut nécessiter trois étapes ou plus. Chaque étape nécessite un équipement distinct. Les opérations de fragmentation sont divisées en deux grands groupes comme suit:

- **Concassage** : Le concassage est une opération de réduction de la taille dans laquelle les gros morceaux sont réduits en fragments ou en particules plus petites
- **Broyage** : Le broyage est considéré comme une réduction de la taille des particules relativement grossières jusqu'à une finesse ultime.

Chapitre II : Concassage

II.1. Introduction

Le concassage est la première étape mécanique du processus de fragmentation dans laquelle un objectif principal est la réduction de la taille de roches. Le concassage est généralement une opération à sec qui est effectuée en deux ou trois étapes (c'est-à-dire le concassage primaire, secondaire et tertiaire). Des roches de minerai au fil de l'exploitation aussi gros que 1,5 m de diamètre sont réduites au cours de l'étape de concassage primaire de 10 à 20 cm dans des machines lourdes.

Le produit de concassage primaire de la plupart des minerais métallifères peut être concassé et criblé de manière satisfaisante, et le concassage ultérieur consiste en une ou deux étapes de réduction de la taille avec des concasseurs et des criblages appropriés [6]. Dans des circuits à trois étages, le minerai est récupéré à partir du stockage du minerai avec un produit de concassage secondaire allant généralement de 3,7 à 5,0 cm, et un concassage tertiaire réduisant davantage le minerai à environ 0,5 à 2 cm de diamètre. La taille du produit est déterminée par la taille de l'ouverture à la décharge. Le rapport de réduction est le rapport entre la taille de l'aliment et la taille du produit, souvent en référence à la taille de passage de 80 %, c'est-à-dire le rapport de réduction et égal à F80/P80. Si le minerai a tendance à être glissant et dur, l'étape de concassage tertiaire peut être remplacée par un broyage grossier. D'autre part, plus de trois étapes de réduction granulométrique peuvent être nécessaires si le minerai est extra-dur, ou dans des cas particuliers où il est important de minimiser la production de fines [7].

Des cribles vibrants sont parfois placés devant des concasseurs secondaires ou tertiaires pour éliminer les matériaux sous-dimensionnés (c'est-à-dire scalper l'aliment), augmentant ainsi la capacité de l'installation de concassage. Les matériaux sous-dimensionnés ont tendance à tasser les vides entre les grosses particules dans la chambre de concassage et peuvent étouffer le concasseur, causant des dommages, car la masse de roche tassée est incapable de gonfler en volume lorsqu'elle est brisée.

II.2. Objectif de l'opération de concassage

Le concassage est un processus qui consiste à réduire la taille des morceaux de roches en les détruisant par des forces externes qui surmontent les forces internes d'adhésion qui lient les particules solides entre elles. Le concassage est la première partie de la préparation mécanique, il sera donc abordé en premier. On appelle concasseurs les appareils qui réduisent la roche à partir des très gros morceaux (minerai tout-venant, roche abattue à l'explosif) jusqu'à environ 10 mm. Cette tâche s'effectue en deux ou trois stades qui sont le concassage primaire, secondaire et tertiaire.

Le concassage est une opération de réduction du tout-venant extrait de la mine ou de la carrière jusqu'à une dimension de l'ordre de quelques centimètres. Pour réaliser le concassage on utilise des appareils de plusieurs types, dans lesquels les procédés vaincront les forces de cohésions des particules à l'intérieur des morceaux de minerai s'effectue par : (mode de concassage).

- ✓ Ecrasement (compression)
- ✓ Trituration
- ✓ Choc (concasseurs à percussion)

Trois types de procédés de concassage se distinguent par leur finalité technologique :

1. **Indépendant** : les produits de concassage sont définitifs (commerciaux) et ne sont pas soumis à un traitement ultérieur. Par exemple, concassage de charbon, de roches pour obtenir de la pierre concassée, etc...;
2. **Préparatoire** : les produits de concassage sont obtenus avec une taille donnée et sont soumis à un traitement ultérieur. Par exemple, le broyage de minerais pour une valorisation ultérieure;
3. **Sélectif** : l'un des composants du matériau est caractérisé par une résistance insignifiante et est détruit plus efficacement que l'autre, avec leur séparation ultérieure par taille.

Lorsque les minéraux utiles sont enrichis, le concassage et le broyage sont utilisés pour la libération. Les limites de la grosseur du concassage et du broyage sont déterminées par la taille de la dissémination des minéraux utile récupérés.

II.3. Types de concasseurs et leurs principes de fonctionnement

Nous avons l'habitude de les classer d'après leur mode d'action. La fragmentation met en œuvre trois actions : compression, impact et attrition.

- **Dans les machines opérant par compression**, les morceaux subissent une action d'écrasement soit répétée, comme c'est le cas dans les concasseurs à mâchoires ou giratoires, soit continue comme dans les concasseurs à cylindres.
- **Dans les machines opérant par impact**, les morceaux sont frappés violemment par un organe tournant à grande vitesse et projetés contre des enclumes, de façon à induire des fractures suivant les plans de clivage naturels de la roche. (Concasseurs à percussion à axe horizontal ; Concasseurs à percussion à axe vertical ; Concasseurs à cylindre de frappe)
- **Dans les machines opérant par attrition**, c'est essentiellement l'abrasion qui est mise en jeu; ces machines sont surtout utilisées pour la production de sable. (Broyeurs autogènes et semi-autogènes ; Trommels concasseurs en particulier).

II.3.1. Classification des concasseurs en fonction de la taille du produit qu'ils produisent

Comme le concassage est effectué par étapes, le concassage peut être divisé en étapes primaire, secondaire, tertiaire et quaternaire en fonction de la taille des particules. En conséquence, les concasseurs peuvent être classés en quatre groupes en fonction de la taille du produit qu'ils produisent.

- **Concasseurs primaires** : Concasseur à mâchoires, concasseur giratoire.
- **Concasseurs secondaires** : Giratoire de réduction, concasseur à cône, concasseur à rouleaux.
- **Concasseurs tertiaires** : Concasseur à cône à tête courte, concasseurs à percussion.

- **Concasseurs spéciaux (Quaternaires) :** Bradford Breaker, Concasseur à rouleaux dentés.

II.3.1.1. Description générale du concassage primaire

Les concasseurs primaires sont des machines robustes, utilisées pour réduire le minerai à une taille adaptée au transport et à l'alimentation des concasseurs secondaires ou des broyeurs AG/SAG. Il existe deux principaux types de concasseurs primaires dans les opérations métallifères: les concasseurs à mâchoires et les concasseurs giratoires, bien que les concasseurs à percussion aient une utilisation limitée en tant que primaires et seront considérés séparément. Le scalpeur est généralement associé aux circuits de concassage à mâchoires et peut être inclus pour maximiser le débit.

II.3.1.1.1. Description et principe de fonctionnement du concasseur à mâchoire

Dans un concasseur à mâchoires, la matière est fragmentée par écrasement et une flexion entre les mâchoires fixe et mobile. Les concasseurs à mâchoires se composent de deux plaques à mâchoires placées à un angle aigu, appelé angle de prise, l'une par rapport à l'autre qui forme une chambre de concassage. Une mâchoire est fixe et maintenue verticale, l'autre mâchoire est une mâchoire mobile ou pivotante et est déplacée pour s'approcher et s'éloigner alternativement de la mâchoire fixe. Le mouvement de la mâchoire pivotante est transmis par Pittman travaillant sur un excentrique et bascule. Dans un concasseur à mâchoires, la matière est fragmentée par écrasement et une flexion entre les mâchoires fixe et mobile, le matériau est introduit entre les mâchoires est alternativement pincé et écrasé. Les concasseurs à mâchoires double effet sont illustrés à la figure II.1.

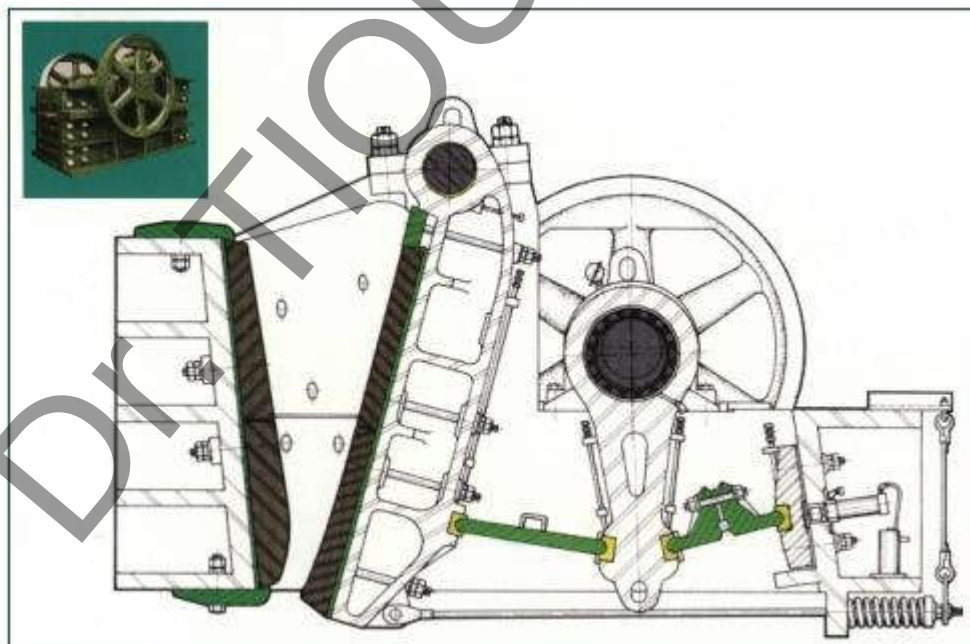


Figure II.1 : Concasseur à mâchoire à double effet

Les principaux paramètres technologiques du mode de fonctionnement mécanique des concasseurs à mâchoires sont:

- ✓ Angle de capture (angle de prise) α ;
- ✓ Mouvement de la mâchoire mobile;
- ✓ Fréquence de rotation de l'arbre de travail;
- ✓ Performance;
- ✓ Consommation électrique du moteur électrique.

L'angle de prise α est l'angle entre les mâchoires fixes et mobiles dans leur état fermé (figure II.2). L'angle de prise change avec la largeur de l'ouverture de décharge du concasseur. Cet angle détermine le degré d'écrasement et les performances du concasseur. Avec une augmentation de la largeur de l'ouverture de décharge, l'angle de prise devient plus petit, ce qui conduit à une diminution du degré d'écrasement et à une augmentation de la productivité du concasseur. Au contraire, avec une augmentation de l'angle de prise, lorsque la largeur de l'ouverture de décharge diminue, le degré d'écrasement augmente et la productivité du concasseur diminue.

Pour augmenter le degré de concassage et charger de plus gros morceaux de minerai dans le concasseur, il est nécessaire d'augmenter l'angle de prise. L'angle maximal de prise, auquel les morceaux de minerai ne sont pas poussés hors du concasseur et le concassage n'est pas perturbé, est déterminé par le coefficient de frottement entre le matériau concassé et la surface de travail des plaques de concassage. L'angle limite de prise est déterminé par le rapport des forces agissant sur celui-ci (figure II.2).

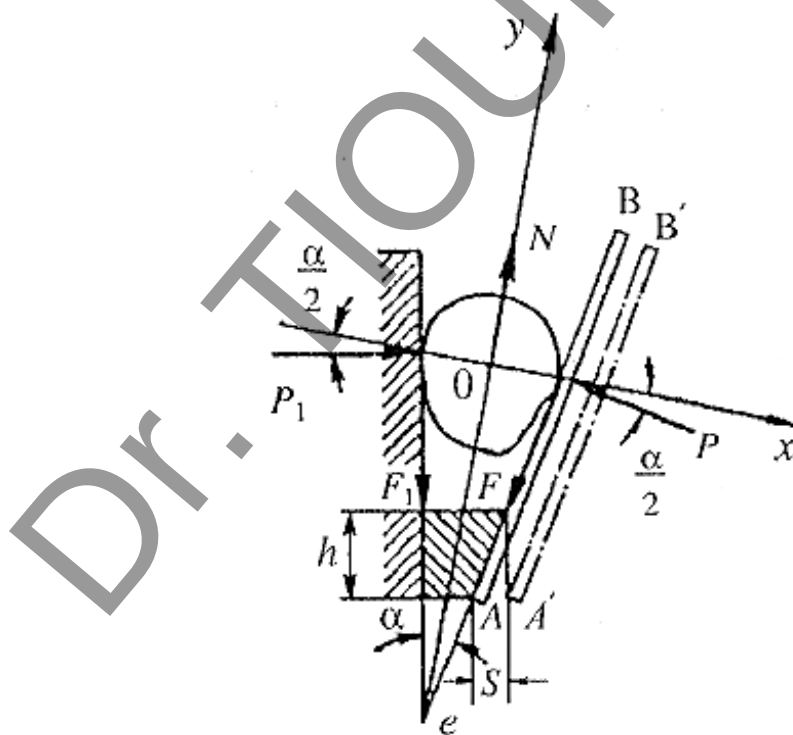


Figure II.2 : Schéma des forces agissantes lors de l'écrasement

II.3.1.1.2. Description et principe de fonctionnement du concasseur giratoire

Le concasseur giratoire est principalement utilisé pour réduire le minerai à une taille adaptée (figure II.3). Il est essentiellement constitué d'une longue broche, portant un élément de concassage conique en acier dur, la tête, logée dans un manchon excentrique. La broche est suspendue à une "araignée" et, lorsqu'elle tourne, normalement entre 85 et 150 tr/min, elle balaie un chemin conique à l'intérieur de la chambre de concassage fixe, ou coquille, en raison de l'action giratoire de l'excentrique. Comme dans le concasseur à mâchoires, le mouvement maximal de la tête se produit près de la décharge. Cela a tendance à soulager l'étouffement dû à l'enflure. La broche est libre de tourner sur son axe dans le manchon excentrique, de sorte que lors du concassage, les morceaux sont comprimés entre la tête rotative et les segments supérieurs de la coque, et l'action abrasive dans une direction horizontale est négligeable.

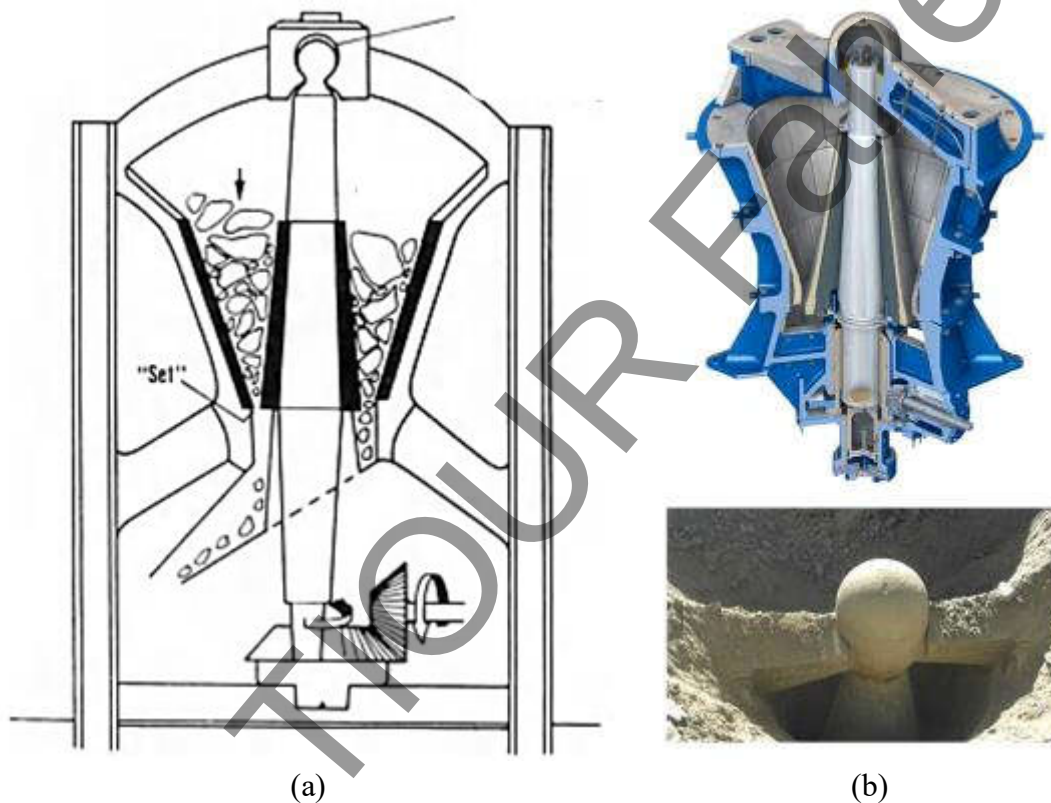


Figure II.3 : Concasseur giratoire: (a) schémas fonctionnels et (b) coupe transversale et vue aérienne.

II.3.1.1.2.1. Construction des concasseurs giratoires

L'enveloppe extérieure du concasseur est constituée d'une fonte lourde ou d'une tôle d'acier soudée, avec au moins un joint de construction, la partie inférieure prenant l'arbre d'entraînement pour la tête, les coquilles supérieure et inférieure fournissant la chambre de concassage. Si la broche est portée sur un roulement suspendu, comme dans la plupart des giratoires primaires, l'araignée portant le roulement forme un joint à travers les doublures ou

concaves en fonte blanche alliée renforcée. Dans les concasseurs plus petits, le concave est un anneau continu boulonné à la coque.

La tête est constituée des pièces forgées en acier qui composent la broche. La tête est protégée par un manteau (généralement en acier au manganèse) fixé à la tête au moyen d'écrous sur des filets qui sont inclinés de manière à s'auto-serrer pendant le fonctionnement. Le profil vertical est souvent en forme de cloche pour faciliter l'écrasement des matériaux qui ont tendance à s'étouffer. De nombreux concasseurs utilisent des moyens mécaniques simples pour contrôler l'ensemble, la méthode la plus courante étant l'utilisation d'un écrou annulaire sur la suspension de l'arbre principal.



Figure II.4 : Concasseur giratoire d'une installation de préparation des minerais

II.3.1.1.3. Capacité de concassage

En raison de l'action complexe des concasseurs à mâchoires et giratoires, les formules exprimant leurs capacités n'ont jamais été entièrement satisfaisantes. La capacité de concassage dépend de nombreux facteurs, tels que l'angle de prise (c'est-à-dire l'angle entre les éléments de concassage) ; la course ; la vitesse et le matériau de revêtement, ainsi que le matériau d'alimentation et sa granulométrie initiale. Les problèmes de capacité ne se produisent généralement pas dans les sections supérieure et médiane de la cavité de broyage, à condition que l'angle de prise ne soit pas trop grand. C'est normalement la zone de décharge, la section la plus étroite de la chambre de concassage, qui détermine la capacité de concassage. [8] décrit le développement de modèles simples pour optimiser les performances des concasseurs à mâchoires et giratoires.

II.3.1.1.4. Choix d'un concasseur à mâchoires ou giratoire

Comme indiqué, pour décider si un concasseur à mâchoires ou un concasseur giratoire doit être utilisé, le facteur principal est la taille maximale du minerai que le concasseur devra manipuler et le débit requis. Les concasseurs giratoires sont, en général, utilisés là où une grande capacité est requise. Les concasseurs à mâchoires ont tendance à être utilisés lorsque l'ouverture du concasseur est plus importante que la capacité. Par exemple, s'il est nécessaire de broyer des matériaux d'un certain diamètre maximum, un giratoire ayant l'ouverture requise aurait une capacité environ trois fois supérieure à celle d'un concasseur à mâchoires de la même ouverture. Si une capacité élevée est requise, un giratoire est la réponse. Si, toutefois, une grande ouverture est nécessaire mais pas la capacité, le concasseur à mâchoires sera probablement plus économique, car il s'agit d'une machine plus petite et le giratoire fonctionnerait au ralenti la plupart du temps. Une relation directrice était celle donnée par [9] Taggart (1945) : si $t \text{ h}^{-1} < 161,7 \times (\text{ouverture en m}^2)$, utilisez un concasseur à mâchoires; inversement, si le tonnage est supérieur à cette valeur, utilisez un concasseur giratoire.

Il y a quelques considérations secondaires. La capitale et les coûts de maintenance d'un concasseur à mâchoires sont légèrement inférieurs à ceux du giratoire mais ils peuvent être compensés par les coûts d'installation, qui sont inférieurs pour un giratoire, puisqu'il occupe environ les deux tiers du volume et a environ les deux tiers du poids d'un concasseur à mâchoires de même capacité. La chambre de concassage circulaire permet une conception plus compacte avec une plus grande proportion du volume total représenté par la chambre de concassage. Les fondations du concasseur à mâchoires doivent être beaucoup plus robustes que celles du giratoire, en raison des contraintes de travail alternées.

Dans certains cas, la capacité d'auto-alimentation du giratoire par rapport à la mâchoire entraîne une économie de coûts en capital, car des dispositifs d'alimentation coûteux, tels que les mangeoires à chaîne robustes, peuvent être éliminés. Dans d'autres cas, le concasseur à mâchoires a trouvé la faveur, en raison de la facilité avec laquelle il peut être expédié en sections vers des endroits éloignés et pour une installation souterraine. Le type de matériau broyé peut également déterminer le concasseur utilisé. Les concasseurs à mâchoires fonctionnent mieux que les giratoires sur de l'argile ou des matières plastiques en raison de leur plus grand jet. Les giratoires se sont avérés particulièrement adaptés aux matériaux durs et abrasifs, et ils ont tendance à donner un produit plus cubique que les concasseurs à mâchoires si l'alimentation est laminée.

II.3.1.2. Concasseurs secondaires et tertiaires

Les concasseurs secondaires sont plus légers que les machines primaires robustes. La majeure partie du concassage secondaire et tertiaire des minerais métallifères est réalisée par des concasseurs à cônes. Puisqu'ils prennent le minerai concassé primaire comme aliment, la taille maximale de l'aliment sera normalement inférieure à 15 cm de diamètre et comme la plupart des constituants nocifs du minerai, tels que le bois, les argiles et les boues ont déjà été éliminés, il est beaucoup plus facile à manipuler. De même, les dispositions de transport et d'alimentation desservant les concasseurs n'ont pas besoin d'être aussi robustes qu'au stade

primaire. Les concasseurs secondaires et tertiaires fonctionnent également avec des aliments secs et leur but est de réduire le minerai à une taille appropriée pour le broyage (figure II.5).

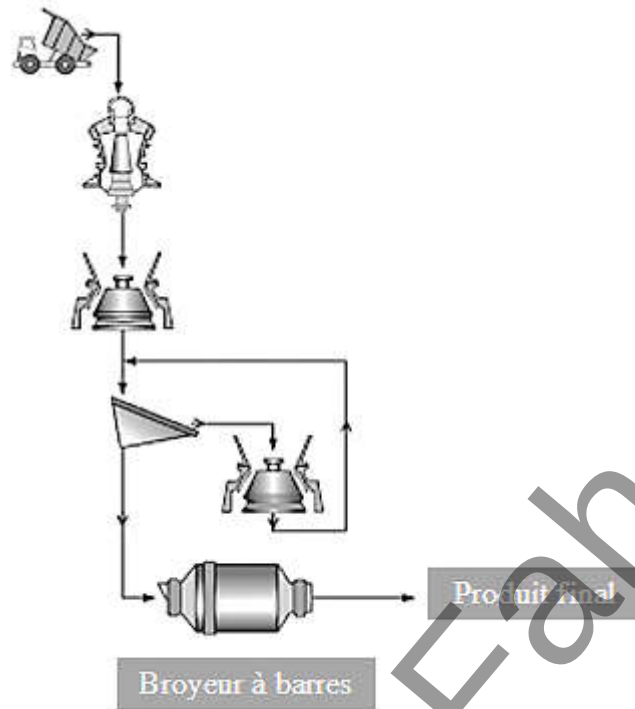


Figure II.5 : Schéma de préparation mécanique des minerais avec circuit fermé

II.3.1.2.1. Description et principe de fonctionnement du concasseur à cône

Le concasseur à cône est un concasseur giratoire modifié, par conséquent. La différence essentielle est que la broche la plus courte du concasseur à cône n'est pas suspendue, comme dans le giratoire, mais est supportée dans un palier universel incurvé sous la tête giratoire ou le cône (figure II.6).

La puissance est transmise de la source à l'arbre intermédiaire par une courroie trapézoïdale ou un entraînement direct. L'arbre intermédiaire a un pignon conique pressé et claveté dessus et entraîne l'engrenage sur l'ensemble excentrique. L'excentrique a un alésage conique décalé et fournit les moyens par lesquels la tête et l'arbre principal suivent un chemin excentrique pendant chaque cycle de rotation.

Puisqu'un grand espace n'est pas nécessaire, la coquille ou le bol de concassage s'évase vers l'extérieur, ce qui permet le gonflement du minerai brisé en fournissant une section transversale croissante (annulaire) vers l'extrémité de décharge. Le concasseur à cône est donc un excellent concasseur arrêté. L'évasement du bol permet un angle de tête beaucoup plus important que dans le concasseur giratoire, tout en conservant le même angle entre les organes de concassage. Cela confère au concasseur à cône une capacité élevée, car la capacité des concasseurs giratoires est à peu près proportionnelle au diamètre de la tête.

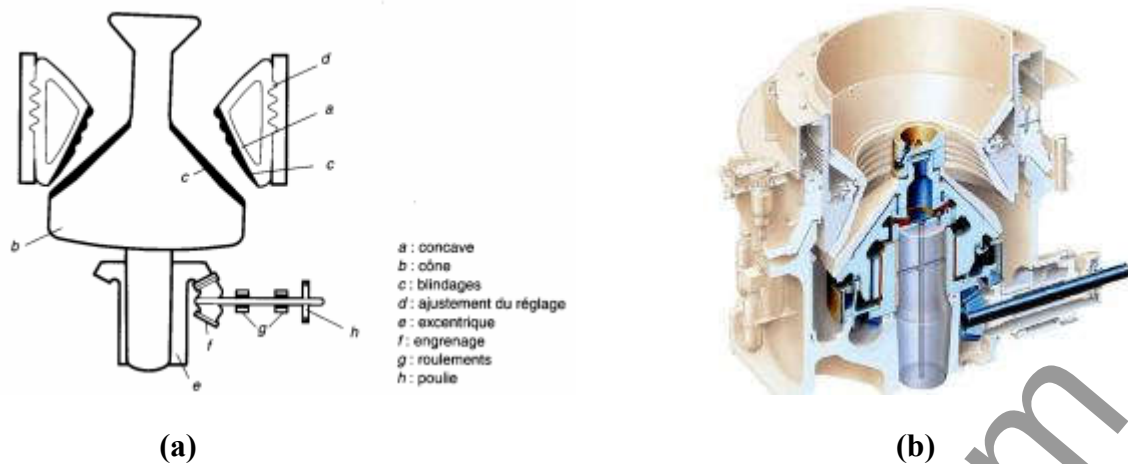


Figure II.6 : Concasseur à cône: (a) schéma fonctionnel et (b) coupe transversale

La tête est protégée par un manteau remplaçable, qui est maintenu en place par un gros écrou de blocage enfilé sur un collier boulonné au sommet de la tête. Le manteau est soutenu avec du ciment plastique, ou du zinc, ou plus récemment avec une résine époxy.

Contrairement à un concasseur giratoire, qui est identifié par les dimensions de l'ouverture d'alimentation et le diamètre du manteau, un concasseur à cône est évalué par le diamètre du manteau conique. Les concasseurs à cône sont également identifiés par la consommation d'énergie: par exemple, le Metso MP1000 fait référence à 1 000 HP (746 kW) et le FLSmidth XL2000 fait référence à 2 000 HP (1,491 kW). Comme pour les giratoires, une avancée a été d'augmenter la consommation d'énergie [10]. L'augmentation de la capacité des concasseurs à cônes signifie qu'ils correspondent mieux à la capacité des giratoires primaires, simplifiant les circuits, qui dans le passé pouvaient voir plusieurs concasseurs à cônes secondaires et surtout tertiaires en parallèle [11].

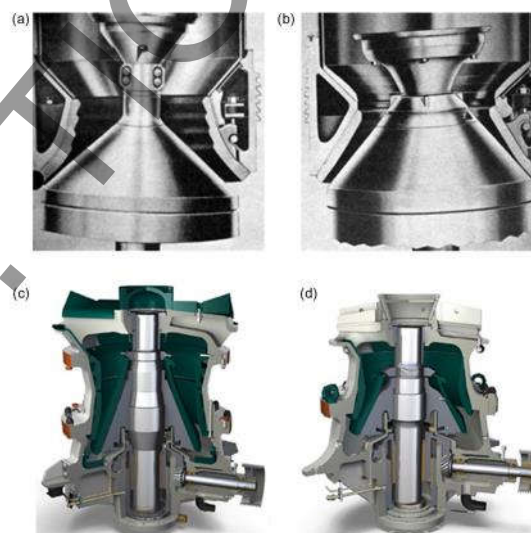


Figure II.7 : Concasseurs à cônes: d'origine (a) standard, (b) à tête courte et moderne (c) secondaire et (d) concasseurs à cônes tertiaires ((c) et (d) Courtoisie Metso).

II.3.1.2.2. Description et principe de fonctionnement du concasseur à cylindres

Bien qu'ils ne soient pas largement utilisés dans l'industrie minière, les concasseurs à cylindres peuvent être efficaces pour manipuler des aliments friables, collants, congelés et moins abrasifs, tels que le calcaire, le charbon, la craie, le gypse, le phosphate et les minerais de fer doux. Le fonctionnement du concasseur à cylindres est assez simple: les rouleaux élastiques standards sont constitués de deux cylindres horizontaux qui tournent l'un vers l'autre. L'écart (distance la plus proche entre les rouleaux) est déterminé par des cales qui font que le rouleau à ressort est retenu du rouleau fixe. Contrairement aux concasseurs à mâchoires et giratoires, où la réduction est progressive par une action de compression répétée au fur et à mesure que le matériau descend vers la décharge, le processus de concassage en rouleaux est à une seule pression.

Le concasseur à cylindres (Figure II.8) se compose de deux cylindres horizontaux lourds et lisses tournant l'un vers l'autre et le matériau d'alimentation est compressé entre les rouleaux et tiré vers le bas à travers les rouleaux par friction. La caractéristique distinctive d'un concasseur à cylindres est que le matériau est concassé une seule fois pendant qu'il traverse la chambre de concassage. De ce fait, le rapport de réduction d'un concasseur à cylindres varie de 2 à 4, le plus bas de tous les concasseurs. La production d'amendes est minimale. Ils peuvent bien manipuler des aliments friables, secs, humides, collants, congelés et moins abrasifs. Pour la sélection de la taille du concasseur à cylindres pour la réduction des différentes tailles d'aliments, deux expressions sont données par:

$$\cos \frac{n}{2} = \frac{D+s}{D+d}$$

$$\tan \frac{n}{2} = \mu$$

Où:

- ✓ **n** : angle de prise
- ✓ **D** : diamètre des rouleaux
- ✓ **d** : diamètre de la particule d'alimentation sphérique
- ✓ **s** : distance entre les deux rouleaux (ensemble)
- ✓ **μ** : coefficient de frottement entre le rouleau et la particule

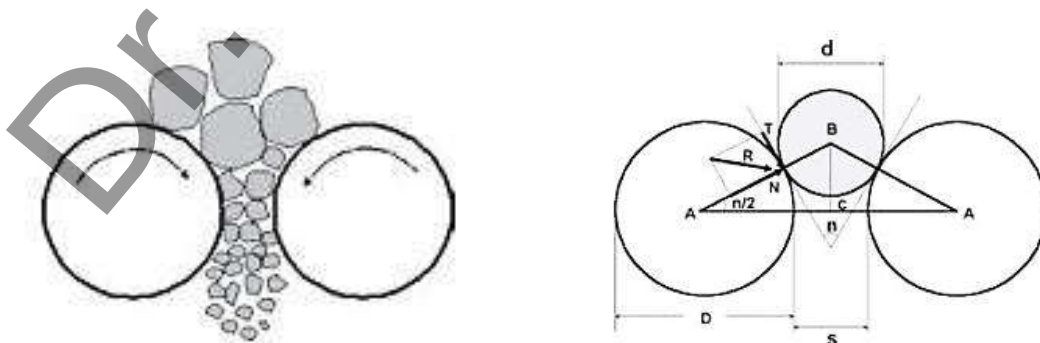


Figure II.8 : Concasseur à cylindres

II.3.1.2.3. Description et principe de fonctionnement du concasseur à percussion

Les concasseurs à percussion utilisent des coups tranchants appliqués à grande vitesse sur des roches en chute libre où la fragmentation se fait par impact plutôt que par compression. Les pièces mobiles sont les marteaux, qui transfèrent une partie de leur énergie cinétique aux particules de minerai au contact. Les contraintes internes créées dans les particules sont souvent suffisamment importantes pour les faire fragmenter. Ces forces sont augmentées en provoquant l'impact des particules sur une enclume ou une plaque de rupture.

Il existe une différence importante entre les états des matériaux écrasés par la pression et par l'impact. Il y a des contraintes internes dans le matériau brisé par la pression qui peuvent ultérieurement provoquer des fissures. L'impact provoque une rupture immédiate sans contraintes résiduelles. Cette condition sans contrainte est particulièrement précieuse dans la pierre utilisée pour la fabrication de briques, la construction et la construction de routes, dans lesquelles des liants (par exemple du goudron) sont ensuite ajoutés. Les concasseurs à percussion sont donc plus utilisés dans l'industrie des carrières que dans l'industrie minière. Ils peuvent provoquer un écrasement sans problème sur ceux qui ont tendance à être en plastique et à se tasser lorsque les forces d'écrasement sont appliquées lentement, comme c'est le cas dans les concasseurs à mâchoires et giratoires. Ces types de minerai ont tendance à être cassants lorsque la force de concassage est appliquée instantanément par des concasseurs à percussion [12].

Les concasseurs à percussion sont également privilégiés dans l'industrie des carrières en raison de la forme améliorée du produit. Les concasseurs à cône ont tendance à produire des particules plus allongées en raison de leur capacité à traverser la chambre sans interruption. Dans un concasseur à percussion, toutes les particules sont soumises à un impact et les particules allongées, ayant une résistance plus faible en raison de leur section transversale plus fine, seraient cassées. [13] ; [14].

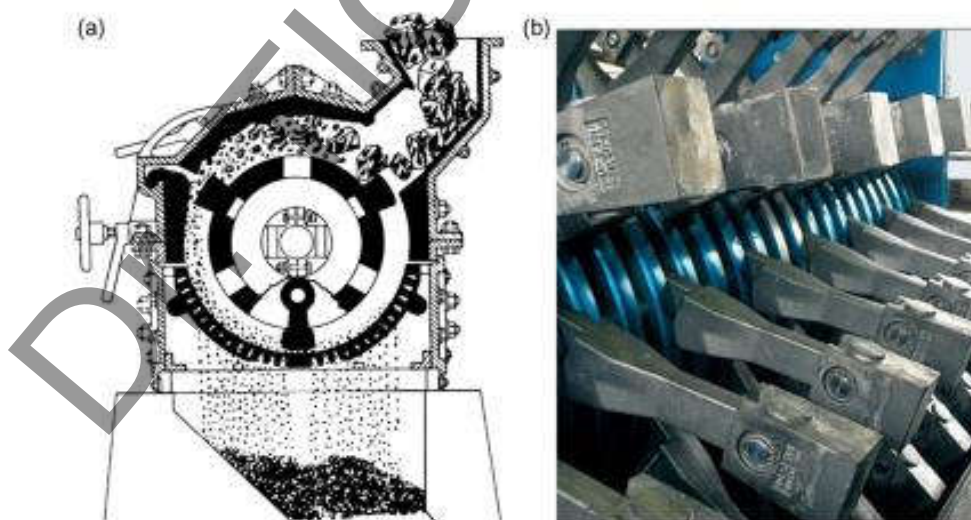


Figure II.9 : (a) Schéma d'un concasseur à marteaux et (b) gros plan des marteaux

Concasseurs à marteaux (figure II.9 (a)) montre la coupe transversale d'un concasseur à marteaux typique. Les marteaux (figure II.9 (b)) sont en acier au manganèse ou en fonte nodulaire contenant du carbure de chrome, extrêmement résistant à l'abrasion. Les plaques de rupture sont fabriquées dans le même matériau. Les marteaux sont pivotés de manière à sortir du chemin du matériau surdimensionné entrant dans la chambre de concassage. Les marteaux pivotants exercent moins de force qu'ils ne le feraient s'ils étaient fixés de manière rigide, ils ont donc tendance à être utilisés sur des concasseurs à percussion plus petits ou pour écraser des matériaux mous.

II.4. Degré de concassage ou rapport de réduction

Le processus de concassage est caractérisé par le degré de concassage ou degré de réduction. C'est le rapport des dimensions du minerai avant et après le concassage. Ce rapport de réduction est une caractéristique quantitative du processus, indiquant, de combien de fois le produit concassé a été réduit. Le degré de concassage i est déterminé comme le rapport de la taille des morceaux maximum $D_{\max}$ contenus dans le matériau fourni pour le concassage à la taille maximum des morceaux $d_{\max}$ contenus dans le produit concassé. Le degré de concassage est déterminé à l'aide des formules suivantes :

$$i = \frac{D_{\max}}{d_{\max}}, \quad i = \frac{D_{\text{moy}}}{d_{\text{moy}}}$$

$$D_{\text{moy}} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i D_i}{100}, \quad d_{\text{moy}} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i d_i}{100}$$

$$i = \frac{D_{80}}{d_{80}}$$

D_{80} : est la dimension des couvertures cassés de tamis à travers laquelle passe 80% du produit initial.

d_{80} : est la dimension des couvertures cassés de tamis à travers laquelle passe 80% du produit concassé.

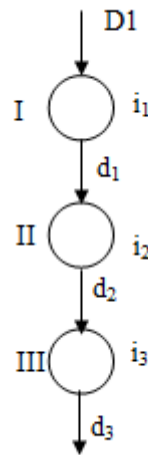
II.5. Etape et circuit de concassage

L'étape de concassage est la partie du processus de concassage total effectuée dans une machine de concassage. En fonction de la limite supérieure de la taille du produit concassé, trois étapes de concassage sont classiquement distinguées:

- ✓ Grossier - de 1200 à 300 mm (concassage primaire)
- ✓ Moyen - de 300 à 75 mm (concassage secondaire)
- ✓ Fin - de 75 à 10-15 mm (concassage tertiaire)

Cependant, pour le concassage grossier, le degré de concassage est $i_1 = 1200/300 = 4$; pour la moyen $i_2 = 300/75 = 4$; pour le fin $i_3 = 75/15 = 5$.

Lors du concassage en plusieurs étapes successives, le degré de concassage total est égal au produit des degrés de concassage des différentes étapes:



$$\left[i_g = i_1 * i_2 * i_3 = \frac{D_1}{d_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} \cdot \frac{d_2}{d_3} = \frac{D_1}{d_3} \right]$$

$$i = i_1 i_2 i_3 = 4 \cdot 4 \cdot 5 = 80.$$

II.5.1. Opérations en circuit ouvert et fermé

Il existe deux cycles de concassage :

1. **Cycle ouvert** : C'est le cycle quand le matériau passe à travers le concasseur une seule fois. Dans ce cas le produit concassé est irrégulier d'après la grosseur.

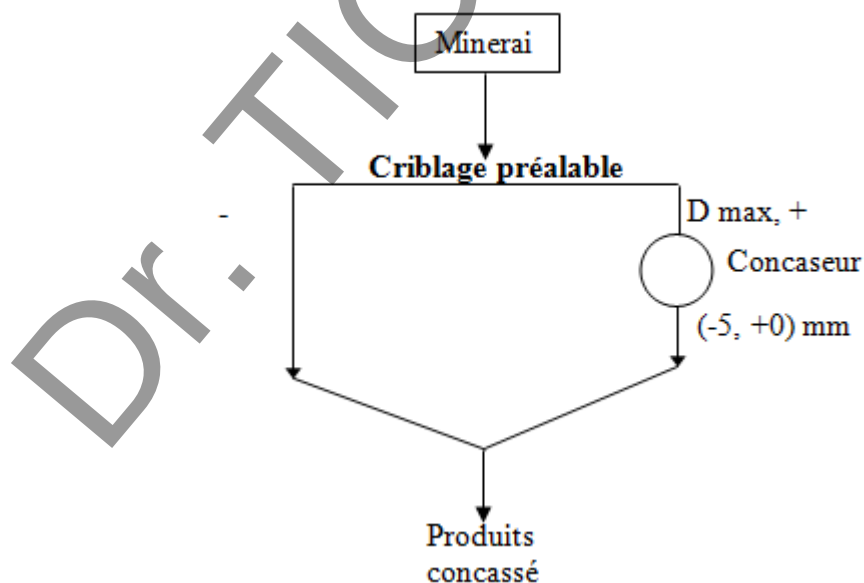


Figure II.10 : Cycle ouvert avec criblage préalable

2. **Cycle fermé :** C'est le cycle quand le matériau passe à travers le concasseur plusieurs fois. Le produit concassé devient régulier d'après la grosseur. Les produits renvoyés dans le concasseur sont appelés charge circulante.

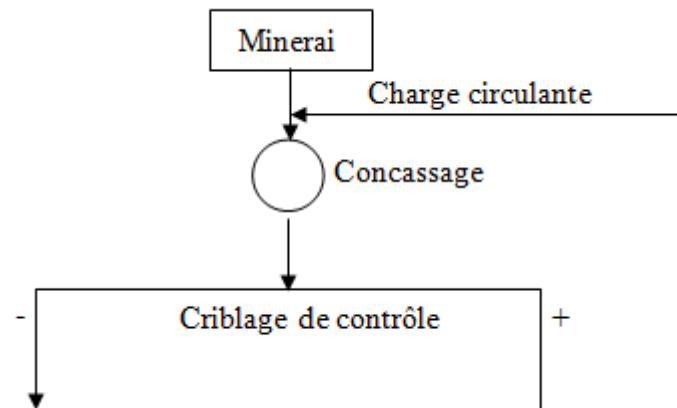


Figure II.11 : Cycle fermé avec criblage de contrôle

II.5.2. Schémas de concassage en plusieurs étages

Dans les stations de préparation mécanique, le minerai est préparé pour les opérations ultérieures, le minerai peut arriver dans la laverie en morceaux d'une grosseur pouvant atteindre 150 mm et plus. La grosseur optimale d'un produit concassé pour l'alimentation des broyeurs varie de 25 à 10 mm.

$$ig = \frac{150}{10} = 15$$

On ne peut assurer comme tel degré de concassage qu'en plusieurs étages, seulement les schémas avec 2 ou 3 étages sont utilisés dans les laveries.

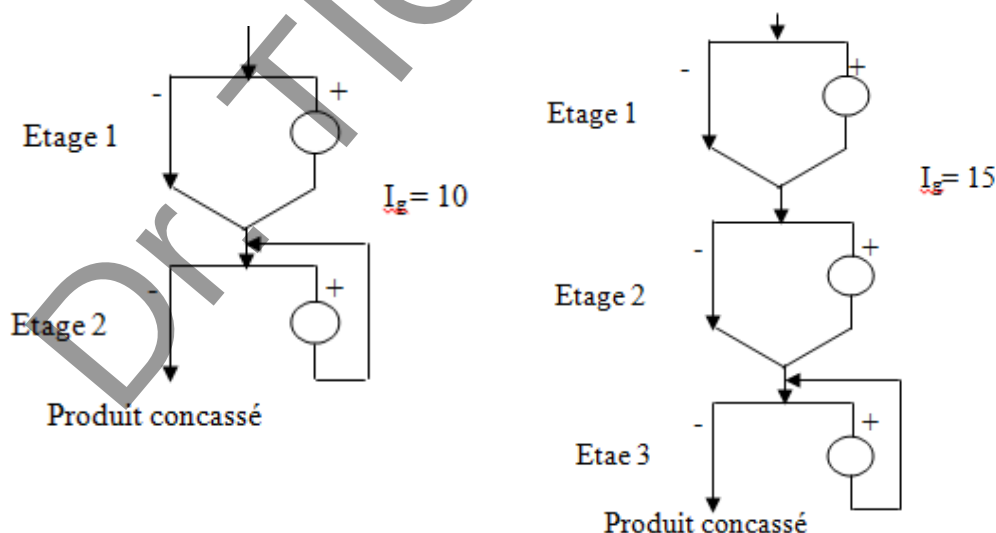


Figure II.12 : Schémas de concassage à deux et trois étages

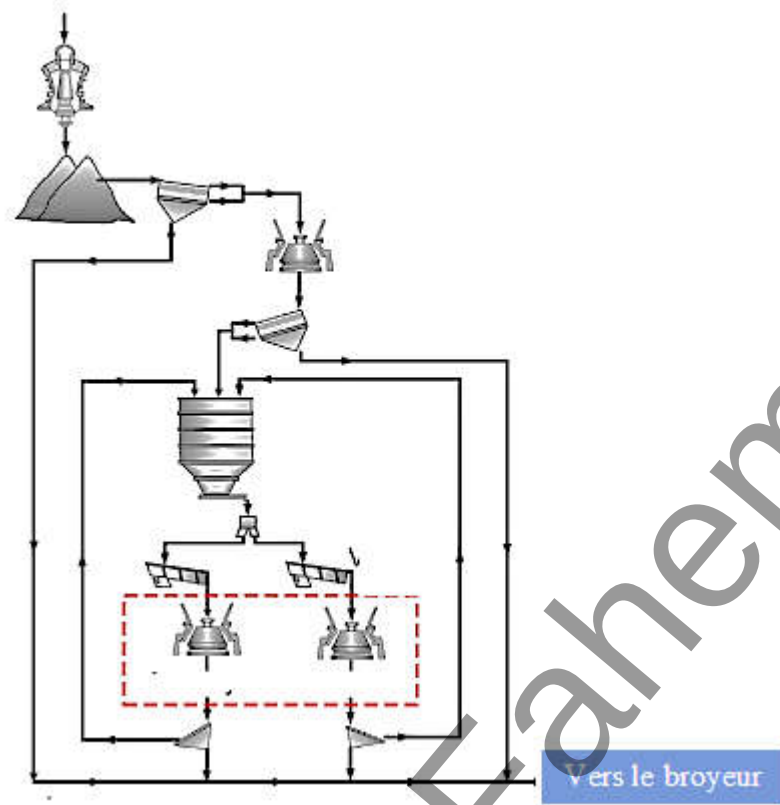


Figure II.13 : Schémas de concassage à plusieurs étages

Chapitre III : Broyage

III.1. Introduction

Le broyage est la dernière étape du processus de fragmentation où la taille des particules est réduite par une combinaison d'impact et d'abrasion, soit à sec, soit plus communément, en suspension dans l'eau. Il est effectué dans des cuves cylindriques en acier qui contiennent une charge de corps de broyage en vrac, le milieu de broyage qui est libre de se déplacer à l'intérieur du broyeur, broyant ainsi les particules de minerai. Selon la manière dont le mouvement est transmis à la charge, les broyeurs sont généralement classés en deux types: les broyeurs à tambour et les broyeurs agités.

Dans les broyeurs à tambour, la coque du broyeur est mise en rotation et un mouvement est transmis à la charge via la coque du broyeur. Le milieu de broyage peut être des tiges d'acier, des billes ou de la roche elle-même. La taille des billes de support, par exemple, varie d'environ 20 mm pour un broyage fin à 150 mm pour un broyage grossier. Les broyeurs à tambour sont généralement utilisés dans l'industrie minière pour le broyage primaire, dans lequel les particules entre 5 et 250 mm sont réduits en taille entre 25 et 300 μm .

Dans les broyeurs agités, la coque du broyeur est fixe, montée horizontalement ou verticalement, et le mouvement est transmis à la charge par le mouvement d'un agitateur interne. Les médias de broyage (25 mm ou moins) à l'intérieur du broyeur sont agités ou mis en rotation par l'agitateur, qui comprend généralement un arbre central auquel sont fixés des vis, des goupilles ou des disques de différentes conceptions. Les broyeurs agités trouvent une application dans le broyage fin (15 40 μm) et ultrafin (15 μm).

Tous les minerais ont une granulométrie optimale économique qui maximise la différence entre le rendement net de la fonderie et les coûts de broyage : un broyage trop grossier et une libération inadéquate limitent la récupération au stade de la séparation; un broyage trop fin et les coûts de broyage dépassent tout incrément de récupération (et peuvent même réduire la récupération en fonction du processus de séparation). La taille de broyage optimale dépendra de nombreux facteurs, y compris la mesure dans laquelle les valeurs sont dispersées dans la gangue et le processus de séparation ultérieur à utiliser.

III.2. Objective et principe de l'opération de broyage

L'objectif de l'opération de broyage est d'exercer un contrôle étroit sur la taille de ce produit, pour cette raison, un broyage correct est souvent considéré comme la clé d'un bon traitement des minerais. Les coûts de broyage sont déterminés par l'énergie et l'acier (médias, doublures, etc.) consommation; le broyage est l'opération la plus énergivore du traitement des minerais. Une étude sur l'énergie consommée dans un certain nombre de concentrateurs de cuivre canadiens a montré que la consommation moyenne d'énergie en kWh/t était de 2,2 pour le concassage, de 11,6 pour le broyage et de 2,6 pour la flottation [15].

Le broyage dans un broyeur à tambour est influencé par la taille, la quantité, le type de mouvement et les espaces entre les différentes pièces du milieu dans le broyeur. Contrairement au broyage, qui a lieu entre des surfaces relativement rigides, le broyage est un processus aléatoire. Le degré de broyage d'une particule de minerai dépend de la probabilité

que le minerai pénètre dans une zone entre les entités moyennes (billes, etc.) et la probabilité d'occurrence d'un événement de rupture après l'entrée. Le broyage peut être obtenu par plusieurs mécanismes, notamment: l'impact ou la compression dus à des forces soudaines appliquées presque normalement à la surface des particules; le cisaillement ou l'attrition dus à des forces constantes qui brisent la matrice d'une particule; et l'abrasion due à des forces agissant parallèlement et le long des surfaces (c.-à-d. cisaillement) (figure III.1). Ces mécanismes déforment les particules et changent de forme au-delà de certaines limites déterminées par leur degré d'élasticité, ce qui provoque leur rupture.

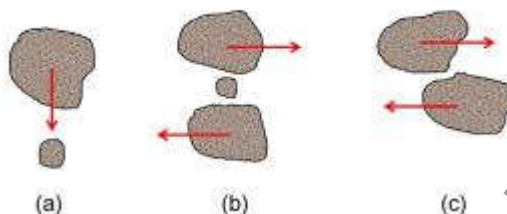


Figure III.1 : Mécanismes de rupture: (a) Impact ou compression, (b) cisaillement ou attrition, et (c) Abrasion.

La particularité des broyeurs à tambour est l'utilisation de corps de broyage en vrac, qui sont gros, durs et lourds par rapport aux particules de minerai, mais petits par rapport au volume du broyeur et qui occupent (vides compris) un peu moins de la moitié du volume du broyeur. En raison de la rotation et du frottement de la coque du broyeur, le milieu de broyage est soulevé le long du côté montant du broyeur jusqu'à ce qu'une position d'équilibre dynamique soit atteinte, lorsque les corps cascaden et cataractent le long de la surface libre des autres corps, autour d'une zone morte où peu de mouvement se produit, jusqu'au bout de la charge du broyeur (figure III.2).

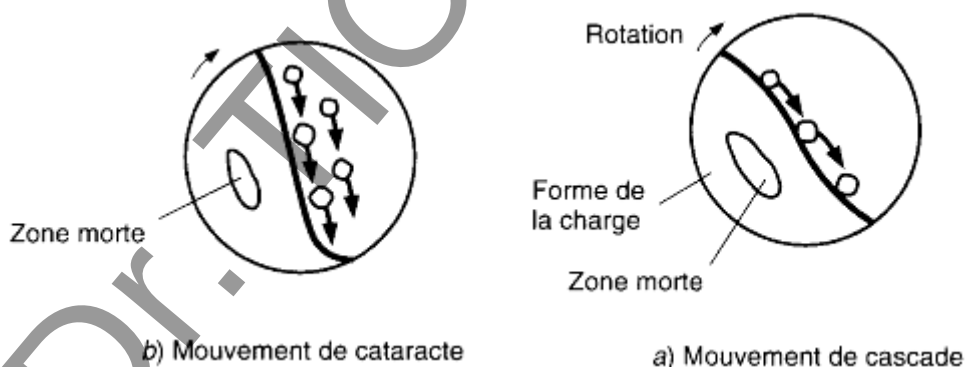


Figure III.2 : Mouvement de la charge dans un broyeur à tambour.

La force motrice du broyeur est transmise via la chemise à la charge. La vitesse à laquelle un broyeur est exécuté et la conception du revêtement régissent le mouvement et donc la nature du produit et l'usure des revêtements de la coque. Par exemple, une connaissance pratique des trajectoires suivies par les billes d'acier dans un laminoir détermine la vitesse à laquelle il doit être exécuté de manière à ce que les balles descendantes tombent

sur l'orteil de la charge et non sur la doublure, ce qui pourrait entraîner des dommages au foie. La simulation du mouvement de charge peut être utilisée pour identifier de tels problèmes potentiels [16], et la surveillance acoustique peut indiquer où se produit l'impact de la balle [17].

III.3. Type de broyeur à tambour et leur principe de fonctionnement

III.3.1. Description et principe de fonctionnement des broyeurs à barres (tiges)

Ces broyeurs peuvent être considérés comme des broyeurs fins ou des broyeurs grossiers. Ils sont capables de prendre des aliments aussi gros que 50 mm et de fabriquer un produit aussi fin que 300 μm , les rapports de réduction étant normalement compris entre 15 à 20 fois. Ils sont souvent préférés aux concasseurs fins lorsque le minerai est argileux ou humide, tendant ainsi à étouffer les concasseurs. On les trouve encore dans les usines plus anciennes, mais ils sont souvent remplacés lors de la modernisation (par exemple, [18] et sont maintenant relativement rares [19].

La particularité d'un broyeur à barres est que la longueur de la coque cylindrique est comprise entre 1,5 et 2,5 fois son diamètre (figure III.3). Ce rapport est important car les barres, qui ne sont que de quelques centimètres plus courtes que la longueur de la coque, doivent être empêchées de tourner de sorte qu'elles se coincent sur le diamètre du cylindre (un enchevêtrement de tiges). Le rapport ne doit cependant pas être si important pour le diamètre maximum de la coque en cours d'utilisation que les tiges se déforment et se cassent. Étant donné que, les tiges de plus de 6 m environ se plient, cela établit la longueur maximale du broyeur. Ainsi, avec un broyeur de 6,4 m de long, le diamètre ne devrait pas dépasser 4,57 m. Des broyeurs à tiges de cette taille ont été utilisés, entraînés par des moteurs de 1 640 kW [20]



Figure III.3 : Broyeur à barres industriel

Les broyeurs à barres sont classés en fonction de la nature de la décharge (Figure III.4). Une déclaration générale peut être faite que plus la décharge est proche de la périphérie de la coque, plus le matériau passera rapidement et moins il y aura de sur-broyage.

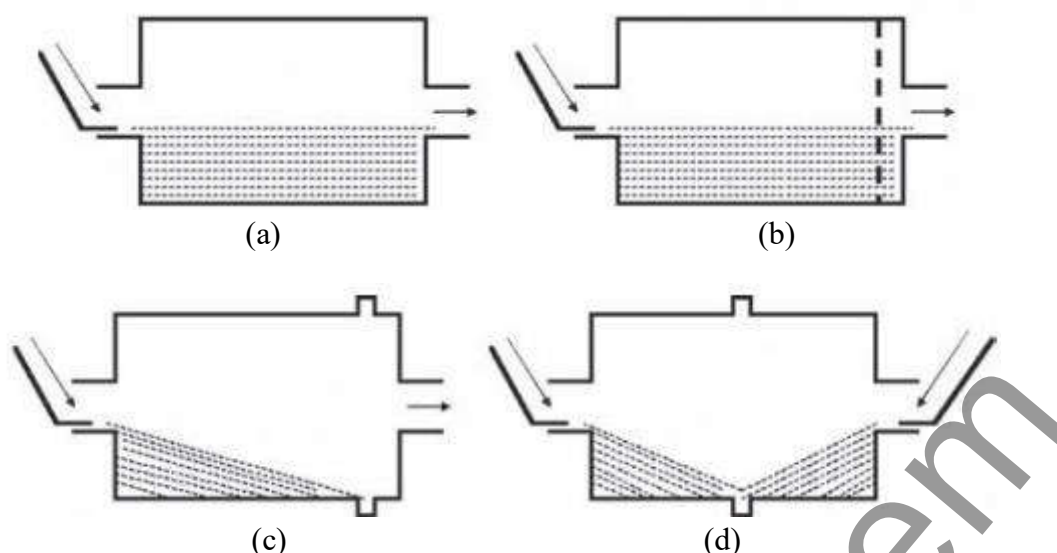


Figure III.4 : Types de broyeurs à barres selon la méthode de décharge.

(a) Débordement, (b) grille, (c) Périphérique d'extrémité, (d) Périphérique central

Les broyeurs à barres sont initialement chargés d'une sélection de tiges de diamètres assortis, la proportion de chaque taille étant calculée pour se rapprocher d'une charge assaisonnée ou d'équilibre. Une charge assaisonnée contiendra des tiges des différents diamètres, allant des remplacements frais à ceux qui se sont usés jusqu'à une taille telle qu'ils justifient leur retrait. Les diamètres réels utilisés vont de 25 à 150 mm. Le plus grand diamètre ne doit pas être supérieur à celui requis pour casser la plus grosse particule dans l'alimentation. Une alimentation grossière ou un produit nécessite normalement des tiges plus grosses. À condition que les grosses particules d'alimentation soient cassées, plus les tiges sont petites, plus la surface totale est grande et donc plus la réduction de taille est importante. Généralement, les tiges doivent être retirées lorsqu'elles sont usées jusqu'à environ 25 mm de diamètre ou moins, selon l'application, car les petites ont tendance à se plier ou à se casser, remplissant le broyeur de scats. Les tiges en acier à haute teneur en carbone sont utilisées car elles sont dures et se cassent plutôt que de se déformer lorsqu'elles sont usées, et ne s'emmêlent donc pas avec d'autres tiges.

Les broyeurs à tiges fonctionnent normalement entre 50 % et 65% de la vitesse critique, de sorte que les tiges tombent en cascade plutôt qu'en cataracte; de nombreux broyeurs en activité ont été accélérés jusqu'à près de 80 % de la vitesse critique sans qu'aucun rapport d'usure excessive ne soit signalé [21]. La densité de la pâte d'alimentation est généralement comprise entre 65 % et 85 % de solides en poids, des aliments plus fins nécessitant des densités de pâte plus faibles. L'action de broyage résulte du contact linéaire des tiges sur les particules de minerai, les tiges dégringolent essentiellement dans un alignement parallèle et tournent également, agissant ainsi un peu comme une série de rouleaux de broyage. L'alimentation grossière a tendance à écarter les tiges à l'extrémité d'alimentation, produisant ainsi un réseau en forme de coin ou de cône. Cela augmente la tendance du broyage à avoir lieu préférentiellement sur les particules les plus grosses, produisant ainsi une quantité minimale de matériau extrêmement fin (figure III.5).

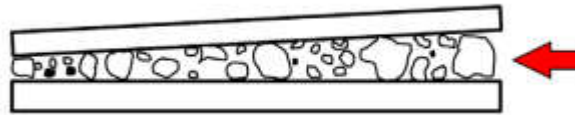


Figure III.5 : Action de broyage préférentielle des tiges sur les matériaux grossiers

III.3.2. Broyeur à boulets

Les dernières étapes de la fragmentation primaire sont effectuées dans des broyeurs à tambour utilisant des billes d'acier comme milieu de broyage et sont donc désignées broyeurs à boulets. Une configuration typique de broyeur à boulets est illustrée à la Figure III.6. Ce broyeur utilise des billes d'acier ou de céramique comme moyen de broyage. Les broyeurs à boulets ont généralement un rapport longueur / diamètre de 1,5 à 1,0. Selon la forme du broyeur, les broyeurs à boulets sont classés en broyeurs cylindroconiques et cylindriques (figure III.6) Au fur et à mesure que le broyeur tourne, les billes sont soulevées à une certaine hauteur puis lâchées. Le broyage des particules de minerai est dû au simple roulement d'une bille sur l'autre (cascade) et à la chute libre des billes (cataracte). La cascade conduit à un broyage fin tandis que la cataracte conduit à un broyage grossier.



Figure III.6 : (a) Broyeur à boulets cylindro-conique;
(b) Broyeur à boulets cylindrique.

III.3.2.1. Mouvement de la charge et vitesse de rotation du tambour

La figure III.7 montre le mouvement de la charge dans le broyeur à boulets. Au fur et à mesure que la vitesse du broyeur augmente, les billes sont soulevées plus haut et une étape est atteinte où les billes sont transportées autour de la coque et ne peuvent jamais tomber. Cela signifie que la centrifugation se produit. Les boules tourneront comme si elles faisaient partie de la coquille. La vitesse à laquelle la centrifugation se produit est appelée vitesse critique. Une formule de la vitesse critique est donnée par :

Vitesse critique $N_{cr} = \frac{42.3}{\sqrt{D-d}}$ avec : **D** et **d** sont les diamètres du tambour et les billes en mètre

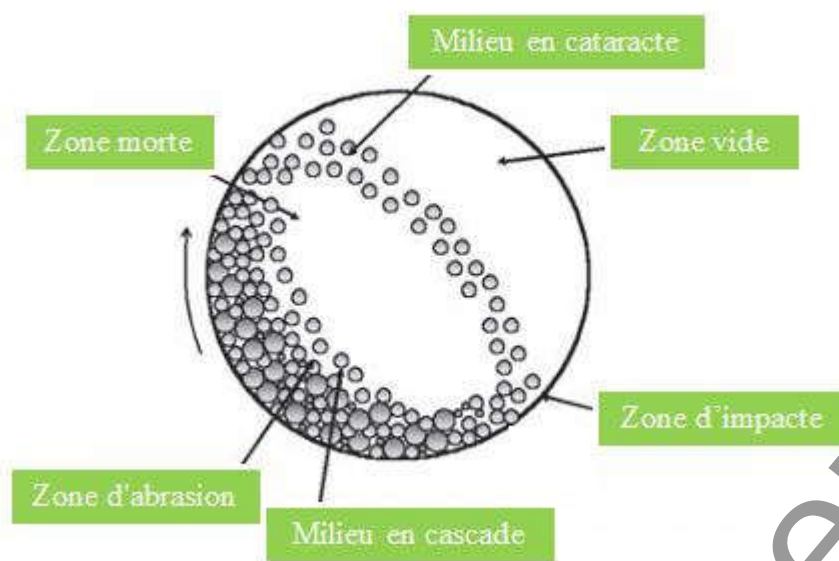


Figure III.7 : Mouvement de la charge dans un broyeur à boulets.

Les broyeurs à boulets cylindrique peuvent s'agir de simples broyeurs à débordement à tourillon, fonctionnant en circuit ouvert ou fermé, ou de broyeurs à décharge à grille (décharge de bas niveau). Ce dernier type est équipé de grilles de décharge entre le corps cylindrique du broyeur et le tourillon de décharge. La pulpe peut s'écouler librement à travers les ouvertures de la grille et est ensuite soulevée jusqu'au niveau du tourillon de décharge (figure III.8). Ces broyeurs ont un niveau de pente inférieur à celui des broyeurs à débordement, réduisant ainsi le temps de séjour des particules dans le broyeur. Par conséquent, peu de broyage excessif à lieu et le produit contient une grande fraction de matière grossière, qui est renvoyée au broyeur par une forme de dispositif de classification.

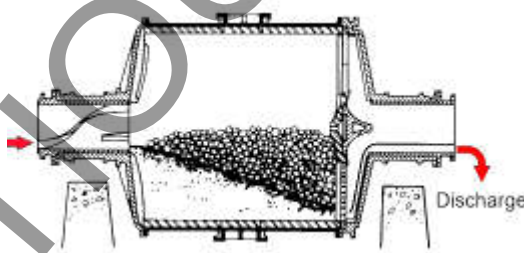


Figure III.8 : Broyeur à décharge à grille

III.3.2.2. Corps broyants

Les billes de broyage sont généralement constituées d'acier forgé ou laminé à haute teneur en carbone ou allié, d'acier allié moulé et d'une partie de fer blanc [22]. La consommation varie entre 0,1 et jusqu'à 1 kg par tonne de minerai en fonction de la dureté du minerai, de la finesse de broyage et de la qualité moyenne. La consommation moyenne peut représenter une proportion élevée, parfois jusqu'à 40 % du coût total de broyage, c'est donc un domaine qui mérite souvent une attention particulière. Les corps de broyage de bonne qualité peuvent être plus chers, mais peuvent être économiques en raison de taux d'usure inférieurs. Un broyage plus fin peut conduire à une efficacité métallurgique améliorée, mais

au détriment d'une énergie de broyage et d'une consommation de corps plus élevées. Par conséquent, en particulier avec du minerai de faible valeur, où les coûts de broyage sont cruciaux, la limite économique du broyage doit être soigneusement évaluée.

III.3.3. Broyeur autogène et semi-autogène

III.3.3.1. Broyeur autogène

Les broyeurs autogènes sont le développement le plus récent pour le broyage fin. Le broyage dans ces unités se fait en utilisant les roches elles-mêmes comme support de broyage, les plus gros morceaux agissant comme des billes de broyage sur les plus petits morceaux et se cassant contre les revêtements au cours du processus. Le broyeur autogène utilise des particules de minerai grossières comme milieu de broyage. Le broyage est obtenu par l'action des particules de minerai les unes sur les autres lorsque des particules de minerai de différentes tailles sont mises en rotation ensemble dans un broyeur à tambour. Le broyeur est de très grand diamètre. Les plus grosses particules de l'alimentation doivent être de taille et de nombre suffisants pour briser les plus petites particules aussi rapidement qu'elles sont elles-mêmes décomposées dans le broyeur. Le broyage autogène réduit considérablement l'usure du métal et réduit également le nombre d'étapes de broyage et de broyage par rapport aux opérations conventionnelles de réduction de taille, offrant ainsi la possibilité de réaliser d'importantes économies en capital et en coûts d'exploitation. Cependant, il n'est pratique que pour un nombre limité de types de minerais.

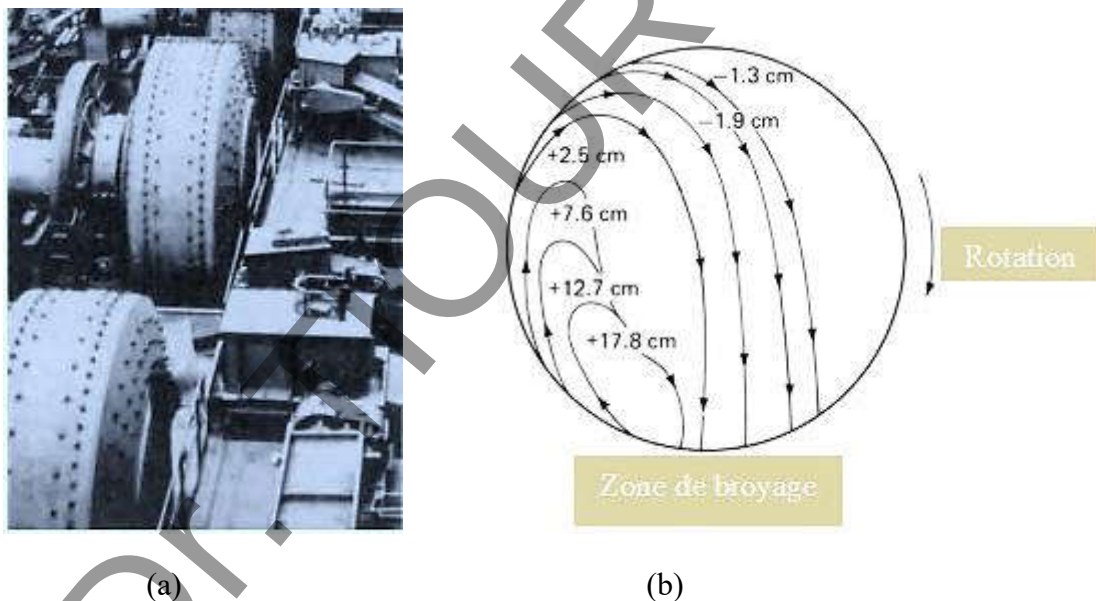


Figure III.9 : (a) série de broyeur autogène, (b) Coupe transversale du broyeur autogène montrant le chemin des particules de broyage.

Le broyage autogène diffère du broyage avec des billes ou des tiges métalliques en ce que la rupture est beaucoup plus confinée aux zones de faiblesse de la roche, telles que les surfaces cristallines et les fines fissures. Un minerai avec une granulométrie naturelle prononcée, ou taille de cristal, peut être broyé de manière autogène à cette taille avec une facilité relative, mais n'est broyé plus finement qu'avec difficulté.

III.3.3.2. Broyeur semi-autogène

Un broyeur semi-autogène utilise une combinaison du minerai et une charge réduite de billes ou de tiges comme moyen de broyage pour surmonter les difficultés rencontrées lors du broyage autogène. Le broyeur semi-autogène est également utilisé lorsque certaines billes de meulage en acier (généralement de 10 à 12,5 cm) sont ajoutées à la charge du broyeur pour faciliter l'action de broyage. La densité des billes d'acier est d'environ 7,8 ce qui est considérablement plus élevé que la densité des minerais naturels qui variera entre 2,7 et 3,5. Cet ajout augmente la densité apparente de la charge de broyage et augmente le débit du broyeur, tout en étant plus efficace qu'un simple broyage autogène sur les matériaux broyables les plus difficiles.



Figure III.10 : Broyeur semi-autogène industriel

Dans le broyage semi-autogène, le débit du broyeur augmente généralement à mesure que la taille supérieure de l'alimentation du broyeur diminue. Il est donc généralement recommandé de faire fonctionner les concasseurs précédents à leur réglage le plus grand lors de l'alimentation de broyeurs entièrement autogènes et à un réglage plus petit lors de l'alimentation de broyeurs semi-autogènes.

Avec tous ces broyeurs, les particules minéralisées ont tendance à être broyées plus facilement, laissant les cailloux arrondis des stériles les plus durs agir comme principaux supports de broyage. Cependant, les broyeurs AG et SAG ont également leurs problèmes et le débit variera en fonction des changements de dureté du minerai et de tout problème de taille survenant, ce qui entraîne des difficultés de contrôle.

Etre chargés pour tirer parti de leur potentiel de taille, ce qui signifie également que la fiabilité est essentielle car tout le tonnage de matériel végétal est maintenant acheminé par quelques grandes usines et tout arrêt de travail serait très grave. Par rapport aux circuits conventionnels des broyeurs à barres et à boulets, les AG et les SAG ont beaucoup plus de variables de fonctionnement et un ajustement plus important du tonnage d'alimentation est nécessaire pour éviter le sur-broyage des minerais mous et le sous-broyage des minerais durs

lorsque la broyabilité de l'alimentation fluctue. De plus, le broyage autogène et dans une moindre mesure le broyage semi-autogène, produit une charge pour la flottation qui permet généralement un pourcentage plus élevé de récupération de valeur. Cela est dû à l'augmentation de la rupture des limites qui permet au produit de broyage autogène d'avoir une taille de grain qui se rapproche plus de la taille de grain du matériau naturel trouvé dans le minerai.

III.4. Milieu de broyage (humide, sec) et circuits de broyage

Dans une opération de broyage en circuit fermé, le matériau surdimensionné du crible est renvoyé vers le même broyeur. La quantité de matériau surdimensionné renvoyée au broyeur est appelée charge de circulation. Le matériau sous-dimensionné est le produit final requis. Initialement, la quantité de produit final produite est inférieure à la quantité de matière première. Au fur et à mesure que l'opération se poursuit, la quantité de produit final augmente progressivement et sera égale à la quantité de matière première après un certain temps. Après avoir atteint cette condition d'équilibre, la quantité de produit final est toujours égale à la quantité de matière première et la charge circulante est constante. La charge de circulation est exprimée en pourcentage de la quantité de matière première. Il est à noter que le débit du broyeur est supérieur à celui du broyeur utilisé en broyage en circuit ouvert et égal à la quantité de matière première augmentée de la quantité de matière surdimensionnée renvoyée par le crible.

III.4.1. Broyage à sec

Le broyage peut être humide ou sec selon le procédé ultérieur et la nature du produit. Il est utilisé chaque fois que des modifications physiques ou chimiques du matériau se produisent si de l'eau est ajoutée. Il provoque moins d'usure sur les revêtements et les supports de broyage. Les broyeurs à sec sont souvent utilisés pour produire un produit extrêmement fin. Cela résulte de la vitesse de décantation élevée des solides en suspension dans l'air par rapport aux solides en suspension dans l'eau.

Le broyage à sec est nécessaire avec certains matériaux en raison des changements physiques ou chimiques qui se produisent si de l'eau est ajoutée. Les zones où il y a pénurie d'eau et la détermination croissante de limiter l'utilisation de l'eau pourraient voir une augmentation du broyage à sec. Cela peut entraîner moins d'usure sur les revêtements et les supports de broyage car il n'y a pas de corrosion. Il a également tendance à y avoir une proportion plus élevée de fines dans le produit, ce qui peut être souhaitable dans certains cas et le contrôle de la poussière est un problème.

III.4.2. Broyage humide et circuits de broyage

Il est généralement utilisé dans les usines d'enrichissement des minerais, car les opérations ultérieures pour la plupart des minerais sont effectuées par voie humide. Le broyage humide est généralement effectué avec 20 à 35% d'eau en poids. Les principaux avantages du broyage humide sont une capacité accrue (jusqu'à 15%) pour une taille d'équipement donnée et une consommation d'énergie moindre par tonne de produit. La faible

consommation d'énergie est due à la pénétration d'eau dans les fissures des particules, ce qui réduit la force de liaison à l'extrémité de la fissure.

Le broyage humide est généralement utilisé dans les opérations de traitement des minerais en raison des économies globales d'exploitation. Les avantages du broyage humide comprennent:

1. Faible puissance par tonne de produit.
2. Capacité plus élevée par unité de volume de broyage.
3. Rend possible l'utilisation du criblage humide ou de la classification pour un contrôle étroit du produit.
4. Élimine le problème de la poussière.
5. Rend possible l'utilisation des méthodes de manutention et de transport simples telles que des pompes, des tuyaux et des laveuses.

Le type de broyeur pour une opération particulière et le circuit dans lequel il doit être utilisé, doit être considéré simultanément. Les circuits sont divisés en deux grandes catégories, **ouvertes** et **fermées** (les mêmes termes introduits pour les circuits de broyage, chapitres II).

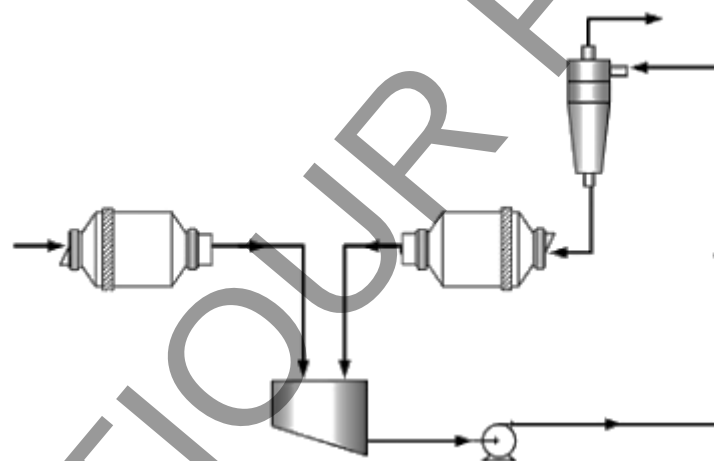


Figure III.11 : Circuit broyeur à barres / boulets illustrant le circuit ouvert (broyeur à barres) et le circuit fermé (broyeur à boulets-hydrocyclone).

La figure III.11 montre le broyeur à barres qui illustre le circuit ouvert, le broyeur à boulets et le circuit fermé, le broyeur à boulets fermé avec un hydrocyclone. Le minerai brut est introduit dans le broyeur à barres, une machine qui réduit la taille des particules en utilisant des barres métalliques comme éléments de broyage. Cet équipement est souvent utilisé pour un broyage primaire ou grossier (Cycle ouvert).

Après le broyage dans le broyeur à barres, le minerai est dirigé vers un mélangeur, souvent un réservoir d'agitation où la pulpe est homogénéisée.

La pulpe passe ensuite dans l'hydrocyclone qui utilise une force centrifuge pour effectuer une classification en fonction de la taille et de la densité des particules. Les particules les plus fines, contenant moins de solides, sortent par le haut de l'hydrocyclone et sont envoyées à l'étape suivante (souvent pour une récupération ou une concentration). Les

particules plus grosses et plus lourdes tombent par le bas et sont dirigées vers le broyeur à boulets pour un broyage plus fin.

Le broyeur à boulets traite les particules grossières issues de l'hydrocyclone. Cet équipement effectue un broyage plus fin pour réduire davantage la taille des particules à un niveau optimal pour les étapes finales du processus.

Les particules trop grossières issues de l'hydrocyclone sont renvoyées vers le broyeur à boulets pour un nouveau cycle fermé de broyage.

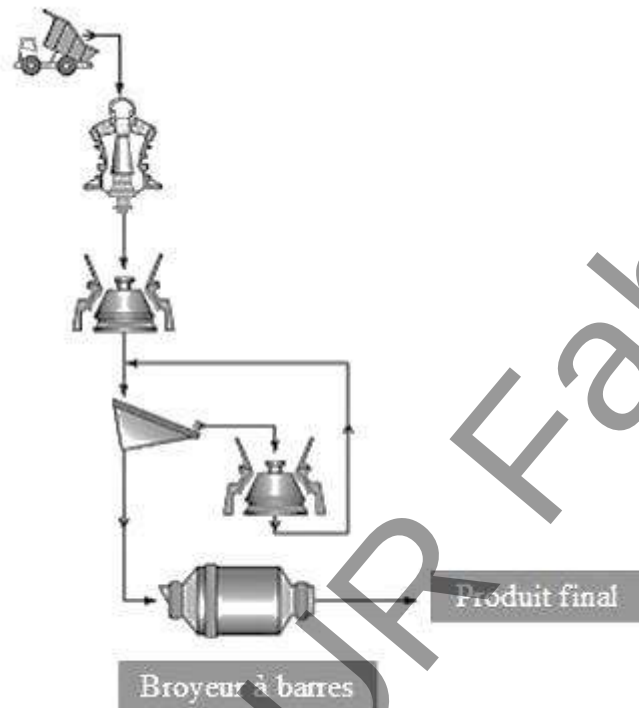


Figure III.12 : Schéma de préparation mécanique des minerais

Le minerai brut est introduit dans un concasseur giratoire (Figure III.12), une machine qui réduit la taille des roches. Cet équipement est utilisé pour un concassage primaire ou grossier (Cycle ouvert). Après le concassage primaire par le concasseur giratoire, le minerai est transporté vers un deuxième concasseur à conne. Cet équipement est utilisé pour un concassage secondaire (Cycle ouvert). Ensuite, le minerai va subir une opération de criblage. Le produit refus, va être concassé pour la troisième fois par le concasseur à conne. Cet équipement est utilisé pour un concassage tertiaire (Cycle fermé). Une fois concassé, le minerai va être criblé à l'infini. Par contre le produit passant, va passer directement vers le broyeur à barres pour une opération de broyage final (Cycle ouvert).

La Figure III.13 illustre le circuit du broyeur à boulets semi-autogène. Dans ce cas, le produit est recyclé vers le concasseur à cône, pour distinguer d'une autre possibilité que le produit broyé aille au broyeur à boulets. Le circuit de la figure III.13 peut être modifié en incluant un étage de séparation (flottation) entre le concasseur à cône et le broyeur à boulets, appelé « étage de flottation » [23].

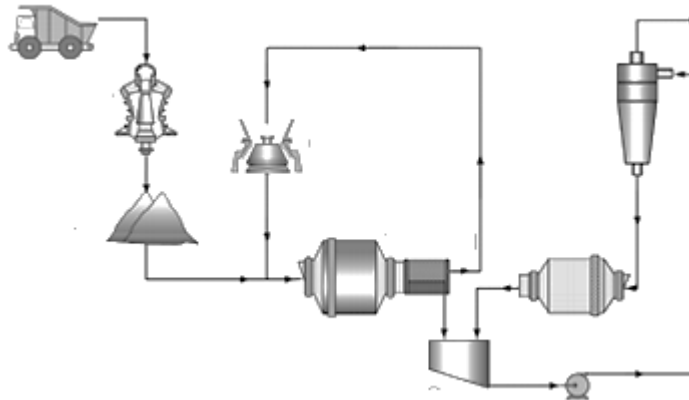


Figure III.13 : Circuit semi-autogène/broyeur à boulets.

Les étapes finales du broyage dans l'industrie minière sont presque toujours en circuit fermé dans lesquelles le matériau de la taille requise est éliminé par un classificateur, qui renvoie les surdimensionnements au broyeur, qui est généralement un broyeur à boulets. La figure III.14 montre les deux broyeurs à boulets fermé - circuit cyclone: classification directe (a) où la charge fraîche va directement au broyeur et classification inverse (b) où la charge fraîche va d'abord au classificateur. En règle générale, la classification du circuit direct est utilisée si l'alimentation fraîche contient moins de 30 % de produit fini (c'est-à-dire plus fin que le produit du circuit P 80). Le matériau renvoyé au broyeur par le classificateur est appelé charge en circulation et est exprimé en rapport ou en pourcentage du poids de la nouvelle charge. Les charges en circulation sont typiquement 150 – 350 %. Le dimensionnement d'un broyeur à boulets est basé sur un broyeur en circuit fermé avec une charge de circulation de 250.

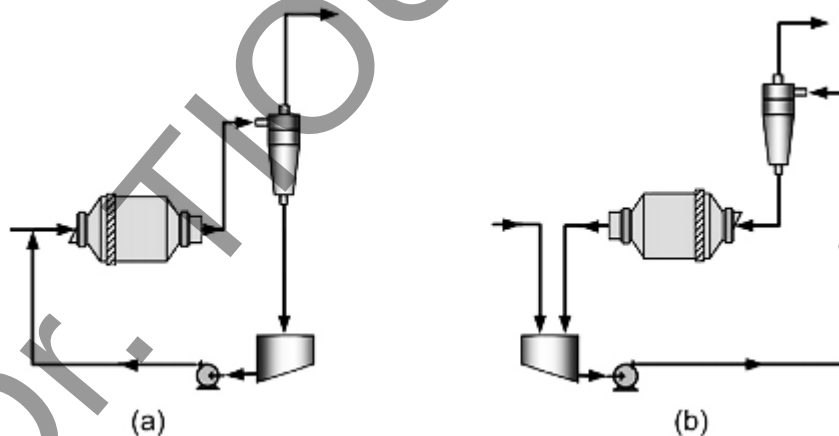


Figure III.14 : Dispositions en circuit fermé:

(a) Circuit de classification directe et (b) Circuit de classification inverse

III.4.3. Broyage en plusieurs étapes

Dans le circuit broyage en plusieurs étapes, les broyeurs à boulets sont disposés en série peut être utilisé pour produire successivement des produits plus fins (figure III.15). Ces circuits introduisent la possibilité d'étages de séparation entre les unités de broyage mais la tendance est aux grands broyeurs à boulets primaires à un étage, à la fois pour réduire les coûts d'investissement et d'exploitation et pour faciliter le contrôle automatique. L'inconvénient du broyage en une seule étape est que si un rapport de réduction élevé est requis, des billes relativement grosses sont nécessaires pour l'alimentation grossière, ce qui peut ne pas broyer efficacement les particules les plus fines.

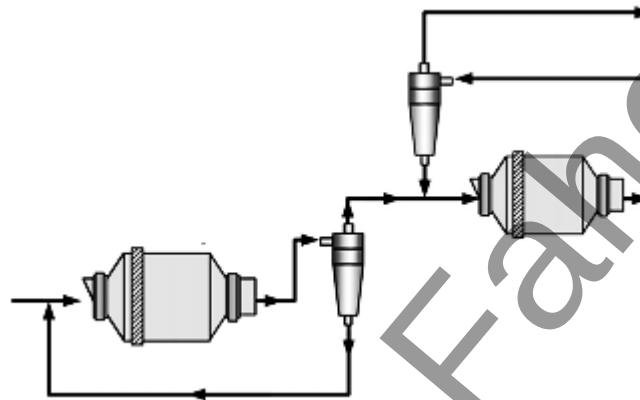


Figure III.15 : Circuit de broyage à deux étages du broyeur à boulets

Chapitre IV : Criblage

IV.1. Introduction

Avant de se lancer dans le cœur de ce chapitre, il est utile de définir certains termes courants du criblage. Le procédé de la classification des matériaux composés d'un mélange des particules en différentes dimensions s'appelle « criblage ». L'or de criblage, la classification est réalisée au moyen d'une surface criblante. On appelle criblage le procédé de classement sur une surface criblante des particules de différentes dimensions par classe de grosseur et les cribles peuvent comporter une ou bien plusieurs surfaces criblantes. Le criblage est largement utilisé pour la classification des particules selon leurs dimensions, bien que l'efficacité diminue rapidement avec la finesse.

Le produit alimentant un crible constitue le tout-venant, le criblage permet de classer le tout-venant en passant et en refus. Le débit d'un crible (ou la capacité de criblage) correspond à la quantité horaire massique que peut recevoir cet appareil pour une efficacité de criblage déterminée.

La granularité désigne l'ensemble des caractéristiques définissant l'état granulaire d'un produit, avec :

- la granulométrie, mesure des dimensions des grains et de leur répartition ;
- la longueur d'un grain, plus grande dimension et son épaisseur, distance entre deux plans parallèles dans laquelle peut passer ce grain ;
- la grosseur du grain, mesurée par l'ouverture de la plus petite maille ou le diamètre de la plus petite perforation, à travers laquelle ce grain peut passer ;
- le coefficient volumétrique, rapport entre le volume d'un grain et celui de la sphère de diamètre égal à la longueur de ce grain ;
- la forme et les coefficients de forme d'un grain, déterminés par des relations qui existent (mais ne sont pas normalisées) entre ses diverses dimensions, telles que longueur/grosseur et grosseur/épaisseur donnant respectivement le coefficient d'allongement et le facteur de forme.

Les courbes granulométriques représentatives de l'analyse granulométrique d'un échantillon sont généralement établies en portant en abscisse la dimension des coupures successives et en ordonnée le pourcentage cumulé de refus et passant.

Concernant le classement dimensionnel, plusieurs termes peuvent être rencontrés dans la littérature spécialisée, en particulier :

- le scalpage, qui est l'élimination de blocs particulièrement gros dans une alimentation ; on parle de précriblage quand ce sont les fractions fines qui sont éliminées avant une opération de fragmentation ;
- le calibrage, qui est le classement portant sur de gros éléments (en principe supérieurs à 100 mm), on utilise des grilles fixes ou animées ;
- le criblage, qui est la classification portant sur des granulométries comprises entre 1 et 100 mm et réalisées avec des cribles rotatifs (trommels), des cribles plans à secousses ou des cribles vibrants ;
- le tamisage, qui est l'opération portant sur des produits de granulométrie comprise entre 0,04 et 1 mm avec des blutoirs rotatifs ou des tamis vibrants variés ;

- l'égouttage, qui est l'opération visant à éliminer par voie d'écoulement naturel l'excédent de liquide dans les mélanges solide-liquide ;
- l'essorage, qui est un égouttage amplifié par des moyens mécaniques (centrifugation ou vibration par exemple) ;
- le dépoussiérage et le déschlammage, qui sont des opérations visant à éliminer les plus fines particules respectivement par voie sèche et par voie humide.

IV.2. Objectif et action du criblage

L'objectif du criblage est de retenir les particules surdimensionnées qui sont trop grosses pour passer à travers les ouvertures du crible et de laisser passer sous-dimensionnées toutes ces particules suffisamment petites pour passer à travers, en séparant les particules (+) restantes et (-) particules passant à travers.

Le criblage à sec est généralement limité au matériau au-dessus de 5 mm, tandis que le criblage humide descend à 250 μm . Bien qu'il existe des types de tamis capables de classer efficacement les tailles jusqu'à 40 μm , les tailles inférieures à 250 μm sont plus couramment effectuées par classification. La sélection entre le criblage et la classification est influencée par le fait que les séparations plus fines nécessitent de grandes surfaces de criblage et peuvent donc être coûteuses par rapport à la classification pour les applications à haut débit.

IV.3. Modes de criblage

On distingue les modes de criblage suivants :

- Criblage indépendant** : Est effectué dans le but d'obtenir un produit marchant.
- Criblage préparatoire** : Il est effectué dans le but de séparer les morceaux de minerai d'après la grosseur, en plusieurs classes pour le traitement suivant.
- Criblage préalable** : est employé pour la séparation des fines avant le concassage afin de ne pas surcharger le concasseur par les produits dont la grosseur est inférieure à l'ouverture de déchargement.

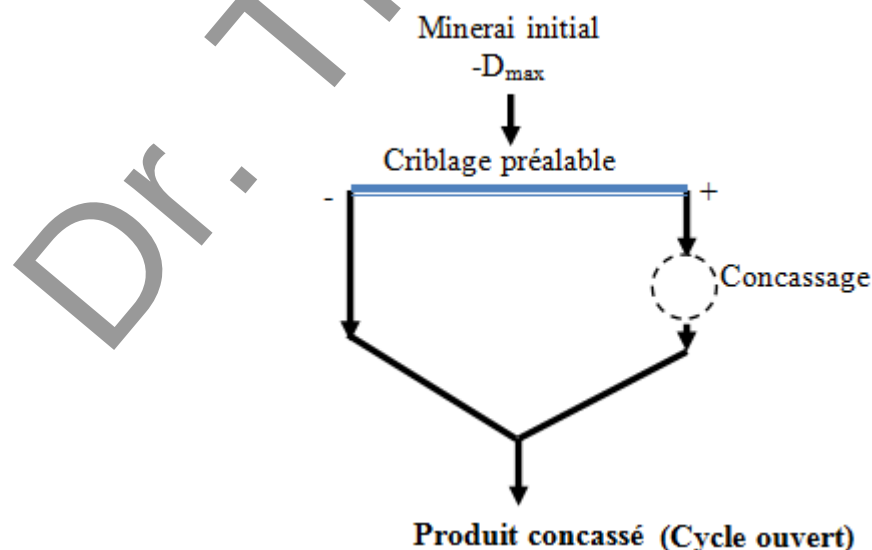


Figure IV.1 : Schéma de préparation mécanique avec criblage préalable

- d) **Criblage de contrôle** : le criblage de contrôle est employé dans le cas où le minerai concassé doit être régulier en termes de grosseur.

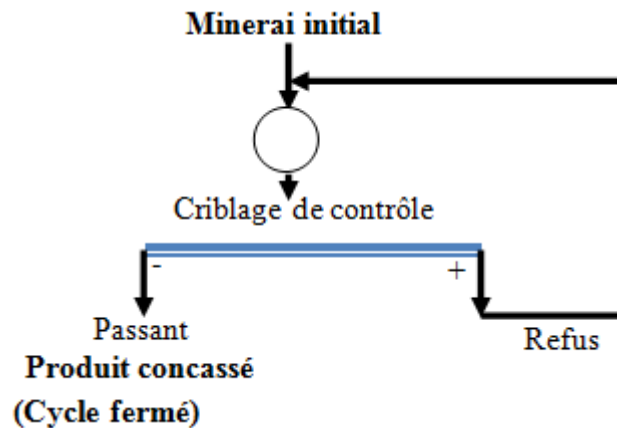


Figure IV.2 : Schéma de préparation mécanique avec criblage de contrôle

- e) **Criblage sélectif** : est un procédé d'enrichissement qui est utilisé par sélection d'une ou des classes de grosseurs.
- f) **Criblage d'égouttage** : est employé pour égoutter les produits d'enrichissement humides.

IV.4. Surfaces criblantes

Les surfaces criblantes sont en général obtenues par l'entrelacement de fils tendus parallèles, appelés fils de chaîne et de fils disposés perpendiculairement aux premiers par un moyen mécanique et appelés fils de trame [24]. Ils sont entrecroisés selon divers modes appelés armure. La texture précise les différences existant entre la chaîne et la trame (diamètre des fils, écartement des fils, matière, etc.). La maille désigne l'ouverture formée par cet entrelacement. Elle peut être **carrée**, **rectangulaire**, **triangulaire**, etc. L'ouverture nominale correspond au diamètre de la sphère tangente aux fils formant la maille. Le pas représente la distance axe à axe de deux fils consécutifs, le numéro étant le nombre de pas par longueur de référence (dénomination plus en vigueur maintenant).

Un paramètre très important caractérisant ces surfaces criblantes est la surface utile de passage par unité de surface totale. Elle s'exprime aussi en pourcentage de vide, ou transparence et varie de 20 à 75 % selon la nature des surfaces et la dimension des ouvertures. La porosité de la surface criblante exprime le pourcentage du volume des vides par rapport au volume total.

IV.4.1. Différentes types de surfaces criblantes

Selon les produits traités, deux types essentiels de surfaces criblantes garnissent les cribles vibrants.

Le premier possède trois formes très classiques en acier :

- les tôles perforées ;
- les grilles métalliques ;
- les tissus métalliques.

Le deuxième type reprend les trois formes, mais fabriqué en matière synthétique, armée ou non, Les tissus synthétiques sont peu ou pas utilisés, sauf en minoterie :

- Caoutchouc
- Polyuréthane
- Nylon.

IV.4.1.1. Surfaces criblantes en tôles perforées

Elles sont utilisées dans de nombreuses installations, en particulier pour le criblage des produits lourds et de granulométrie supérieure à 70 mm. On peut distinguer :

- les **tôles planes sans crochet**, livrées avec des trous permettant une fixation aisée, leur changement s'effectuant sans perte de temps ;
- les **tôles planes avec des crochets de tension** pouvant faire corps avec la tôle ou être rapportés par soudure si les tôles ont plus de 5 mm d'épaisseur ;
- les **tôles avec crochets et chapes de renfort** pour les tôles d'épaisseur inférieure à 2 mm ;
- les **tôles pour trommels** qui habillent la carcasse (armature) en 1 à 8 éléments sur la circonférence.

IV.4.1.2. Surfaces criblantes en grilles métalliques

On utilise généralement, pour les granulométries comprises entre 1 et 70 mm, des grilles tissées. Les différents types sont réalisables en acier haute résistance, mais aussi en aciers inoxydables. On peut distinguer les grilles suivant leur armure (figure IV.3).

- La **grille ondulée simple**, type le plus courant pour les mailles de dimensions inférieures ou égales à 12 mm, est utilisée pour des produits dont les composants granulométriques ont une bonne faculté à être séparés.
- La **grille ondulée droite**, qui vient en prolongement de celle ondulée simple, présente une très grande rigidité en raison de l'ancrage parfait des fils.
- La **grille surface plane**, dans laquelle toutes les saillies des ondulations sont sur la même face de la toile, forme un plan de travail sans point d'accrochage où l'usure se trouve répartie sur toute la surface du grillage.
- La **grille ondulée simple à maille rectangulaire** est destinée au criblage à grand rendement et au traitement de matériaux légèrement colmatant ;
- La **grille harphy (ou harpe)**, destinée au criblage de produits très colmatant, qui assure un auto-nettoyage des grilles, est à utiliser sous une tension exercée parallèlement au grand côté de la maille ; le coefficient d'allongement de la maille est compris entre 10 et 30.
- La **grille harpe droite**, d'utilisation similaire à l'armure harphy mais qui assure une plus grande précision granulométrique, convient pour des matériaux très colmatant et pour l'égouttage.
- La **grille anti-colmatante** existe avec plusieurs réseaux pour répondre aux problèmes de colmatage par agrégation des fines ou blocage d'un morceau dans une maille et pour stabiliser le rendement.

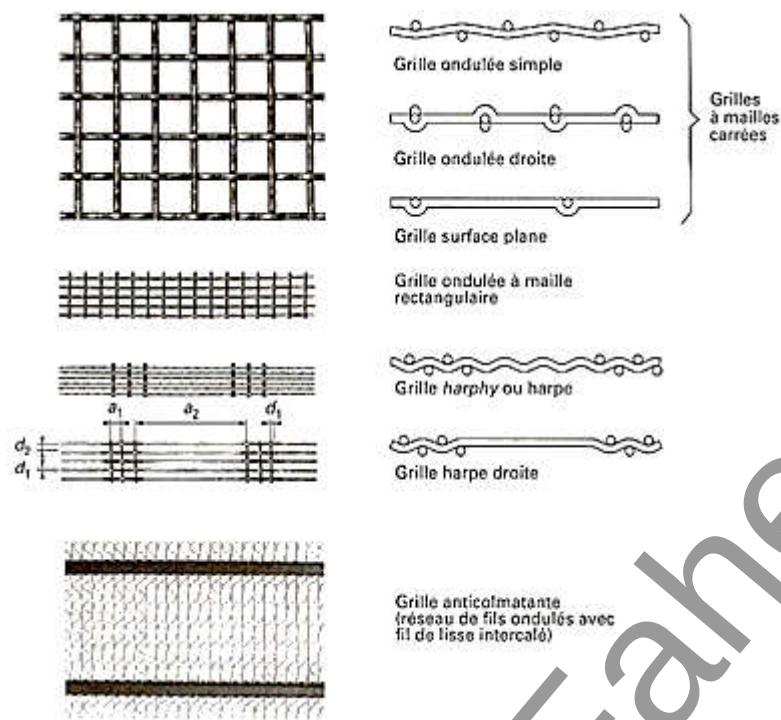


Figure IV.3 : Surfaces criblantes en grilles métalliques

IV.4.1.3. Surfaces criblantes en toiles métalliques

Pour les granulométries inférieures à 20 mm, on utilise des tissus métalliques généralement en acier inoxydable. Ce sont :

- Des toiles à mailles carrées (de 1 mm à 20 mm) ;
- Des toiles à mailles rectangulaires, tissées sur demande selon des séries à petite dimension normalisée avec trames pré-ondulées et montées avec chape à bavette et joint d'étanchéité.

IV.4.1.4. Plaques perforées et grilles en matériau synthétique anti-abrasion

Elles se montent aussi bien en tension qu'en panneaux plans avec la même facilité qu'une grille métallique ou qu'une tôle perforée. Elles peuvent apporter, malgré leur pourcentage de surface utile de passage inférieur à celui des autres surfaces :

- ✓ Meilleure tenue à l'abrasion que d'autres matières ;
- ✓ Protection contre les sollicitations des traverses de l'appareil ;
- ✓ Protection contre l'abrasion de l'armature et des crochets de tension ;
- ✓ Criblage moins bruyant ;
- ✓ Classification précise due à une porosité réduite par rapport aux grilles métalliques ;
- ✓ Réduction du coût d'exploitation tous frais comparés ;
- ✓ Montage sans modification de l'appareil ;
- ✓ Système de tension expérimenté pour une bonne stabilisation de la grille.

Il existe diverses formes de trous en fonction de leur application pour un rendement optimal : fissures, trous carrés, trous oblongs. Ces grilles et ces plaques peuvent être réalisées en plusieurs qualités de polyuréthane, de duretés différentes.

IV.4.1.5. Plaques perforées et grilles en caoutchouc anti-abrasion

L'emploi de ce matériau a des conséquences sur le montage et présente des avantages similaires au cas du polyuréthane. Le domaine d'application est orienté vers les coupures techniques. La forme des trous est variable (oblongs, carrés, ronds).

IV.5. Choix des surfaces criblantes

Le choix de la surface criblante est lié aux caractéristiques des surfaces utilisables [25] :

- La **solidité** (indéformabilité, résistance à l'usure et aux ruptures de fatigue), critère primordial lorsque le produit comporte des éléments volumineux et lourds ; la préférence est donnée, par ordre décroissant, aux caoutchoucs et polyuréthane, aux tôles perforées, aux grilles métalliques à gros fils ;
- La **régularité des ouvertures** ; le classement donne cette fois tôle perforée, toiles tissées et grilles métalliques, en caoutchouc et en polyuréthane ;
- Le **pourcentage de vide** ; les moyennes usuelles décroissantes indiquent pour :
 - ✓ les tissus en fil fin à haute résistance, 65 à 75 %,
 - ✓ les tissus ordinaires, 50 à 65 %,
 - ✓ les tôles perforées, 30 à 45 % ;
- La **résistance au colmatage** ; on utilise des artifices thermiques (toiles chauffantes) ou mécaniques (billes et frappeurs) et on emploie des grilles à mailles rectangulaires, à barreaux flottants, anti-colmatante ;
- La **résistance aux obstructions par goujonnage** ; on utilise des grilles à barreaux divergents, des grilles anti-colmatante.

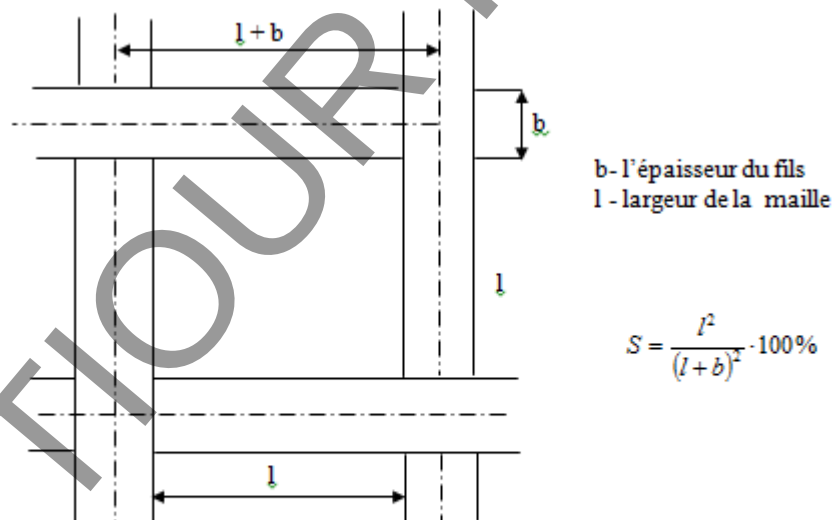
IV.5.1. Coefficient de proposition des vides d'un crible

L'emploi de surfaces en matière plus ou moins élastique (plastique ou caoutchouc) a permis d'améliorer considérablement la résistance à l'abrasion, au colmatage et au goujonnage. En revanche, le pourcentage de surface utile de passage est plus faible. Le tableau IV.1 signale les valeurs que peut prendre le pourcentage de vide en fonction de la surface criblante utilisée.

Tableau 1 – Pourcentage de vide en fonction des caractéristiques de surfaces criblantes à mailles carrées

Ouverture de maille (mm)	Diamètre de fil (mm)	Pourcentage de vide (%)
100	20	70
71	12	73
50	10	69
40	8	69
31,5	6	71
20	5	64
12,5	4	58
8	2,5	58
4	2	45
2	1,25	38
1	0,8	39
0,5	0,315	38
0,315	0,200	37
0,16	0,112	35

Le rapport de la surface de toutes les ouvertures d'un crible à la surface total (y compris la surface des files) s'appelle la proportion des vides d'un crible.



$$S = \frac{l^2}{(l+b)^2} \cdot 100\%$$

Rectangle :

$$S = \frac{l \cdot a}{(l+b)(a+b)} \cdot 100\%$$

Figure IV.4 : Maille carrée d'un crible

Exemple

On considère un crible d'ouverture de : $l = 0.074 \text{ mm}$, $b = 0.053 \text{ mm}$.

$$S = \frac{(0.074)^2}{(0.074 + 0.053)^2} \cdot 100\% = 34\% \text{ de la surface qui travaille.}$$

IV.6. Caractéristiques du procédé de criblage

IV.6.1. Stratification

Du fait de la vibration de la surface criblante, le lit de matériau se comporte plus ou moins comme un lit fluidisé : les particules les plus grosses se retrouvent dans la partie la plus haute, tandis que les plus fines passent à travers les interstices et se concentrent dans la partie la plus basse du lit. Ce phénomène de différenciation se nomme stratification.

Sans stratification de la matière, la séparation n'est pas envisageable [26] [27]. Il est à noter qu'il existe une épaisseur optimale du lit de matière pour que la stratification intervienne dans les meilleures conditions : un lit trop fin (figure IV.5.a) entraîne une réduction de l'efficacité, tandis qu'un lit trop épais provoque l'altération de la stratification, amortit le mouvement du lit et diminue la précision de la coupure.

Après stratification, les particules les plus fines peuvent traverser la surface, les grosses venant alors obturer les orifices du crible. Il faut donc que, par rebonds successifs, toutes les particules de taille inférieure aux ouvertures aient eu la possibilité de se présenter en face d'un trou. Il peut arriver le plus que :

- Plusieurs particules se présentent simultanément devant le même orifice, se gênent et ne puissent le traverser ;
- Des plus grosses particules obturent les orifices (goujonage) ;
- Des particules fines obturent progressivement les ouvertures par suite de l'humidité (colmatage) et empêchent tout criblage ultérieur [28] ;
- La fraction granulométrique critique (fraction des grains dont la dimension est comprise entre 0,70 et 1,5 fois l'ouverture) soit très importante, réduisant considérablement la capacité du crible, etc.

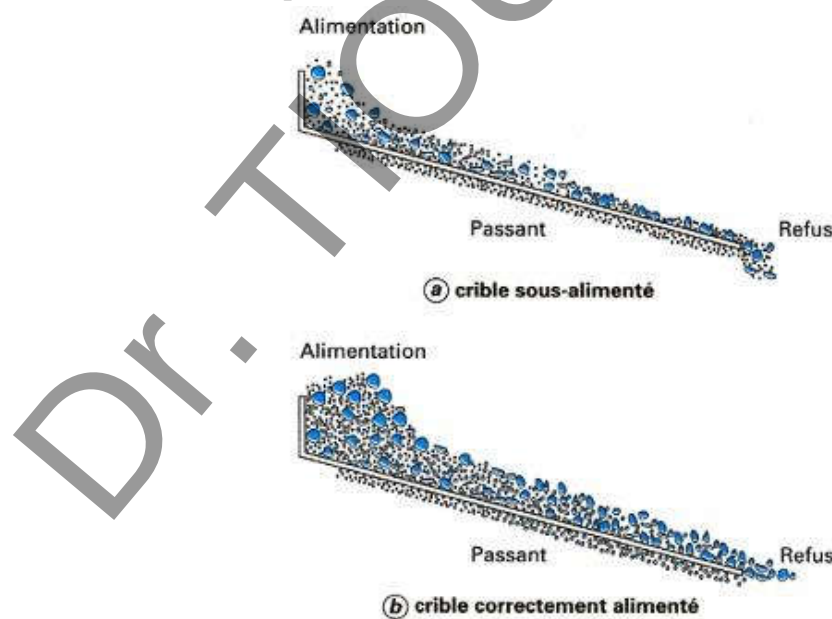


Figure IV.5 : Influence de la stratification sur la classification [27] [29]

IV.6.2. Capacité d'un crible

Dans tous les cas, il faut considérer séparément pour chaque type de crible :

- **Capacité de transport** : débit total admissible sur la surface criblante, fonction de l'épaisseur de la couche à traiter et de la vitesse de progression des produits ;
- **Capacité de passage** : débit possible de traverser de la surface criblante, elle-même fonction, d'une part, de la nature de la surface criblante (dimension, forme et disposition des ouvertures, taux de surface libre), d'autre part, de la nature du mouvement du crible, et en dernier lieu, de la répartition granulométrique, de la nature et de la forme des grains de la masse à cribler.
 - La capacité de criblage est en fait un compromis entre les deux capacités précédentes.
 - Le criblage mécanique repose sur la probabilité de passage du grain à travers la surface criblante. Ces chances sont fonction de la trajectoire des grains (vitesse, direction), de la forme et de l'épaisseur de l'orifice ou du nombre d'orifices successifs que peut rencontrer un grain donné.
 - La probabilité de passage pour un grain de dimension égale à 0,9 fois celle de l'ouverture est d'environ 1 %, c'est-à-dire que pour cribler la totalité des grains de cette dimension, il faut un minimum de 100 ouvertures sur la trajectoire de chaque grain.
 - On appelle **grains difficiles** ceux dont la dimension est comprise entre 0,70 et 1,5 fois celle de l'ouverture : ils constituent la **fraction critique**. Cette notion est extrêmement utile pour l'appréciation de la capacité de criblage.

IV.6.2.1. Modèles Empiriques

Les modèles empiriques ou de capacité visent à prédire la surface du crible requise et sont fréquemment utilisés par les fabricants des cribles. Il existe un certain nombre de formulations de ces modèles de la forme générale [30].

$$S = \frac{T}{C * F1 * F2 * F3 * Fn}$$

Où : **S** : Surface requise

T : Taux d'alimentation du crible en tonne par heure

F1 à Fn sont des facteurs de correction et **C** : est la capacité du crible de base en t/h par unité de surface lorsque les autres facteurs sont 1

Un ensemble de facteurs de correction: tenez compte de la distribution de la taille de l'alimentation, à savoir: la quantité de surdimensionnement (matériau plus grand que l'ouverture), de demi-taille (matériau inférieur à la moitié de la taille de l'ouverture) et de quasi-taille (matériau entre 75 % et 125 % de la taille de l'ouverture). D'autres facteurs incluent: la densité du matériau criblé; si le crible est un pont supérieur ou un pont inférieur sur un crible à plusieurs étages; la zone ouverte de la toile du crible; si des ouvertures carrées

ou fendues sont utilisées; si un criblage humide est utilisé; et l'efficacité de criblage souhaitée.

IV.6.2.2. Modèles Numériques

Les simulations numériques sur ordinateur sont de plus en plus utilisées pour modéliser le comportement des particules dans divers équipements de traitement, y compris les cribles [31]. On s'attend à ce que les techniques de simulation numérique telles que la Méthode des éléments discrets gagnent une application plus large dans la modélisation des cribles industriels et aident à la conception et à l'optimisation de nouvelles machines de criblage.

IV.7. Facteurs influant l'efficacité de criblage

Aucune opération industrielle ne produisant de résultats parfaits, le criblage est donc affecté par un certain nombre de facteurs pouvant entraîner des écarts avec la réalité, par exemple :

- les tolérances d'exécution des surfaces criblantes ;
- la détérioration accidentelle des surfaces criblantes qui peuvent introduire des perturbations qui ne sont pas immédiatement décelables ;
- les rapports d'équivalence qui tiennent compte des différences de forme ou d'inclinaison des ouvertures et qui ne sont que des approximations ;
- les trajectoires des grains au voisinage des surfaces ;
- la longueur du crible qui est forcément limitée et ne permet pas d'obtenir une probabilité de passant de 100 % ;
- les appareils de contrôle utilisés en laboratoire, qui peuvent avoir des problèmes de maintenance ; il est de nos jours possible de contrôler ces tamis sur des bancs d'examen [32].

L'efficacité du crible doit toujours être couplée à la capacité car il est souvent possible, par l'utilisation d'un faible débit d'alimentation et d'un temps de criblage très long, d'effectuer une séparation presque complète. A capacité donnée, l'efficacité dépend de la nature de l'opération de criblage, c'est-à-dire de la probabilité globale qu'une particule traverse le crible une fois qu'elle l'a atteint. Le processus de criblage est fréquemment décrit comme une série d'événements probabilistes, où des particules sont présentées plusieurs fois sur une surface de criblage, et sur chaque présentation, il existe une probabilité donnée qu'une particule d'une taille donnée passe. L'efficacité de criblage est donc affectée par des facteurs qui influencent la probabilité de passage des particules et des facteurs qui influencent le nombre d'opportunités offertes aux particules de passer à travers la maille de criblage.

IV.7. 1.Taille des particules

Taggart (1945) calcule certaines probabilités de passage liées à la taille des particules à l'aide de l'égaliseur. Les figures relatent la chance probable pour mille de passage illimité à travers une ouverture carrée d'une particule sphérique et donnent le nombre probable d'ouvertures en série sur le trajet de la particule nécessaires pour assurer son passage à travers le crible.

IV.7. 2.Taux d'alimentation

Le principe de l'analyse de dimensionnement des cribles est d'utiliser une faible masse d'alimentation et un long temps de tamisage pour effectuer une séparation presque complète (parfaite). Dans la pratique du criblage industriel, les aspects économiques dictent que des débits d'alimentation relativement élevés et des temps de séjour des particules courts sur le crible doivent être utilisés. À des débits d'alimentation élevés, un lit de matériau est présenté à l'écran et les fines doivent se déplacer jusqu'au fond du lit de particules avant qu'elles aient la possibilité de traverser la surface du crible. L'effet net est une efficacité réduite. Une capacité élevée et un rendement élevé sont souvent des exigences opposées pour une séparation donnée, et un compromis est nécessaire.

IV.7. 3. Angle du crible

La particule s'approche de l'ouverture perpendiculairement. Si une particule s'approche de l'ouverture à un angle peu profond, elle verra une dimension d'ouverture effective plus étroite et les particules proches de la maille sont moins susceptibles de passer. La pente de la surface de crible affecte l'angle auquel les particules sont présentées aux ouvertures de l'écran. Certains écrans utilisent cet effet pour obtenir des séparations nettement plus fines que l'ouverture du crible.

IV.7. 4. Forme des particules

La plupart des matériaux granulaires traités sur des cribles ne sont pas sphériques. Alors que les particules sphériques passent avec une probabilité égale dans n'importe quelle orientation, les particules de forme irrégulière proches de la maille doivent s'orienter dans une attitude qui leur permet de passer. Les particules allongées et brisées présenteront une petite section transversale pour le passage dans certaines orientations et une grande section transversale dans d'autres. Les formes de particules extrêmes ont donc une faible efficacité de criblage: le mica, par exemple, filtre mal les cribles à ouvertures carrées, ses cristaux plats en forme de plaque ayant tendance à chevaucher les ouvertures de l'écran.

IV.7. 5. Espace ouvert

La chance de passer à travers l'ouverture est proportionnelle au pourcentage de surface ouverte dans le matériau du crible, qui est défini comme le rapport de la surface nette des ouvertures sur toute la surface de la surface de tamisage. Plus la surface occupée par le matériau de construction du tablier du crible est petite, plus il y a de chances qu'une particule atteigne une ouverture. La surface ouverte diminue généralement avec la finesse de l'ouverture du crible. Afin d'augmenter la surface ouverte d'un crible fin, des fils ou une construction de pont très fins et fragiles doivent être utilisés. Cette fragilité et la faible capacité de débit sont les principales raisons pour lesquelles les classificateurs remplacent les cribles à des tailles d'ouverture fines. Des progrès dans la conception des cribles continuent d'être réalisés et des exemples de cyclones remplacés par des écrans sont rapportés [33]; [34].

IV.7. 6. Vibrations

Des cribles sont vibrés afin de jeter des particules outre de la surface de crible pour qu'elles puissent à nouveau être présentées à la surface criblante, et pour acheminer les particules le long du crible. Le bon type de vibration induit également une stratification du matériau d'alimentation, ce qui permet à l'aptitude de traverser la couche de particules jusqu'à la surface du crible tout en faisant monter les particules plus grosses vers le haut. La stratification tend à augmenter le taux de passage dans la partie médiane du crible. La vibration doit être suffisante pour empêcher l'accrochage et l'aveuglement. Cependant, une intensité de vibration excessive fera rebondir les particules du plateau du crible et les projettera si loin de la surface qu'il y aura très peu de présentations efficaces sur la surface de l'écran. Des taux de vibration plus élevés peuvent, en général, être utilisés avec des taux d'alimentation plus élevés, car le lit de matériau plus profond a un effet amortissant qui inhibe le rebond des particules.

IV.7. 7. Humidité

Le taux d'humidité de surface présente dans l'alimentation a un effet marqué sur l'efficacité du criblage, tout comme la présence d'argiles et d'autres matières collantes. L'humidité alimente mal le criblage, car elle a tendance à s'agglomérer et à boucher les ouvertures du crible. En règle générale, le criblage à sec à une ouverture inférieure à environ 5 mm doit être effectué sur un matériau parfaitement, à moins que des mesures spéciales ne soient prises pour éviter le bouchage. Ces mesures peuvent inclure l'utilisation de ponts chauffants pour briser la tension superficielle de l'eau entre le fil de criblage et les particules, des ponts à billes (une cage métallique contenant des billes directement sous la surface de crible) pour transmettre des vibrations supplémentaires au-dessous de la toile de criblage, ou l'utilisation de criblage de toile de criblage non aveuglants.

Le criblage humide permet de traiter efficacement des tailles plus fines jusqu'à 250 μm et moins. Les fines adhérentes sont éliminées des grosses particules et le crible est nettoyé par le flux de pâte et des pulvérisations d'eau supplémentaires.

Chapitre V

Classification hydraulique et pneumatique

V.1. Introduction

La classification telle que définie par [35] Heiskanen est une méthode de classification des particules d'un mélange en deux ou plusieurs produits sur la base de la vitesse à laquelle les particules tombent à travers un milieu fluide. C'est un procédé qui consiste à classer les particules solides en fonction de leurs caractéristiques physiques, principalement leur **taille, densité et leur forme**. Ce processus est largement utilisé dans des domaines comme le traitement des minerais, la production de ciment et le recyclage, car il permet d'obtenir des fractions granulométriques spécifiques pour différentes applications.

Les classificateurs hydrauliques et pneumatiques sont des équipements de classification utilisés pour trier les particules en fonction de leurs caractéristiques physiques. Ils utilisent des fluides (eau ou air) pour générer des forces qui séparent les particules selon leur comportement dans le flux.

La classification permet une meilleure gestion des matériaux en améliorant leur qualité, leur uniformité et en facilitant leur traitement ultérieur. C'est un processus essentiel dans de nombreuses chaînes de production pour optimiser la matière première et améliorer l'efficacité des procédés.

V.2. Principe de la classification

La classification repose sur l'utilisation des forces, généralement gravitaires, centrifuges ou hydrodynamiques (avec de l'eau ou de l'air), pour trier les particules. Lorsqu'on laisse tomber dans l'eau des particules de grosseurs et de masses volumiques différentes, celles qui sont plus lourdes, que ce soit en raison de leur volume supérieur ou de leur masse volumique plus élevée, auront une vitesse de chute plus grande que celles qui sont moins lourdes. Il s'agit de joindre à ce principe des mécanismes d'alimentation de la pulpe et de soutirage des produits, puis de travailler dans des conditions telles que ce soit l'effet volume des particules qui soit à la base de la discrimination, c'est-à-dire que l'appareil classe selon le volume plutôt que selon la masse volumique et l'on obtient un classificateur.

Le principe de base est que les particules réagissent différemment à ces forces en fonction de leur taille, de leur forme et de leur densité sur le principe des vitesses terminales de chute différentes. La figure V.1 illustre de façon simplifiée les trois comportements possibles d'une particule solide soumise l'attraction gravitationnelle. C'est donc par leur différence de vitesse de sédimentation que les grosses et les petites particules se distinguent en classification. Il est reconnu que, lorsqu'on plonge une particule dans un fluide, elle accélère sous l'effet de la force gravitationnelle, jusqu'à ce qu'elle atteigne une vitesse constante, appelée vitesse limite.

Lorsqu'une particule solide se situe dans le vide absolu, sa vitesse augmente continuellement en fonction de l'accélération. Par contre, sa vitesse augmente à un taux moindre lorsqu'elle se situe dans un fluide visqueux quelconque comme l'air ou l'eau. En effet, la force due à la gravité est combattue par la force due à la friction occasionnée par le mouvement de la particule dans le fluide visqueux.

La force due à la friction est proportionnelle à la vitesse de la particule dans le fluide. Quand la force due à la friction a atteint une valeur égale à la force due à la gravité, la vitesse de la particule atteint une valeur constante, appelée vitesse terminale de chute. Cette dernière varie en fonction des paramètres suivants :

- ✓ La taille de la particule solide ;
- ✓ La masse volumique de la particule solide ;
- ✓ La forme de la particule solide ;
- ✓ La viscosité du fluide ;
- ✓ La masse volumique du fluide.

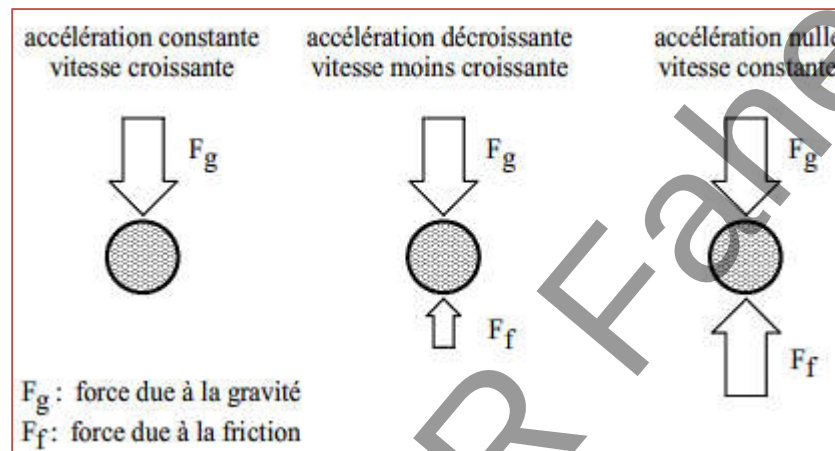


Figure V.1 : Comportements d'une particule solide située dans un champ d'attraction gravitationnelle

Le fluide dans lequel baignent les particules est généralement de l'eau mais il peut parfois s'agir de l'air. Les équipements de classification pneumatique (utilisant l'air comme fluide) nécessitent un matériel parfaitement sec.

V.3. Types de la classification

Bien qu'ils puissent être classés par de nombreuses caractéristiques, la plus importante est le champ de force appliqué à la particule : gravitationnel ou centrifuge. Les classificateurs centrifuges sont de plus en plus utilisés comme équipement de classification pour de nombreux types de minerais. En comparaison, les classificateurs gravitationnels, en raison de leur faible efficacité à de petites tailles de particules ($< 70 \mu\text{m}$), ont une utilisation limitée comme classificateurs. Le tableau V.1 décrit les principales différences entre les deux types de classificateurs et met en évidence les avantages des classificateurs centrifuges. De nombreux types de classificateurs ont été conçus et construits, et seuls quelques classificateurs courants seront introduits.

Tableau V.1 : Comparaison des paramètres clés pour les classificateurs centrifuges et gravitationnels.

Caractéristique	Classificateurs centrifuge	Classificateurs gravitationnel
Capacité	Élevée	Faible
Taille de coupe	Fin-Grossier	Grossier
Dépendance	Oui	No
Consommation d'énergie	Haut (pression d'alimentation)	Faible
Investissement initial	Faible	Élevé
Empreinte au sol	Petite	Grand

Il existe plusieurs sortes de classificateurs. Étant donné l'importance du présent ouvrage, nous nous limiterons seulement ici à l'étude des classificateurs mécaniques (à vis) et des hydrocyclones, qui sont les classificateurs les plus utilisés dans l'industrie minière. Les classificateurs peuvent être regroupés en trois grandes classes comme suit:

- **Classification Hydraulique :** Utilise l'eau pour créer des courants ascendants ou horizontaux, facilitant la séparation des particules par gravité et flottabilité.
- **Classification Pneumatique :** Utilise un courant d'air pour séparer les particules en fonction de leur comportement dans le flux d'air. C'est adapté aux matériaux secs et sensibles à l'humidité.
- **Classification Centrifuge :** Utilise une force centrifuge dans des dispositifs comme les hydrocyclones ou classificateurs cycloniques pour séparer les particules en fonction de leur densité et de leur taille.

Les classificateurs gravitationnels sont les mieux adaptés pour une classification plus grossière et sont souvent utilisés comme équipement de déshydratation et de lavage. Ils sont simples à utiliser et ont de faibles besoins énergétiques, mais les dépenses en capital sont relativement élevées par rapport aux cyclones. Les classificateurs gravitationnels peuvent être classés en deux grands groupes, en fonction de la direction d'écoulement du courant porteur:

- Si le mouvement du fluide est horizontal et forme un angle avec la trajectoire des particules, la classification est appelée classification de sédimentation; si les directions de déplacement du fluide et de décantation des particules sont opposées, la classification est appelée écoulement hydraulique ou à contre-courant. Les classificateurs à sédimentation, ou courant horizontal, sont essentiellement du type à décantation libre et accentuent la fonction de dimensionnement. D'autre part, les classificateurs hydrauliques ou à courant vertical sont généralement des types à décantation entravée et augmentent ainsi l'effet de la densité sur la séparation.

V.3.1. Classificateurs de sédimentation mécanique

La figure V.2 montre le fonctionnement et les principales parties constitutives d'un classificateur mécanique typique; dans l'illustration, la vis sans fin qui sert à remonter la sousverse peut être remplacée par un train de râtaux. La figure V.3 illustre les différentes zones de comportement des particules. On remarque que les classificateurs mécaniques

comportent un bassin dans lequel est alimentée la pulpe à classer. Les particules plus petites que la dimension de coupure (surverse) sont entraînées par un courant latéral dirigé vers un seuil de débordement. Les particules plus grosses que la dimension de coupure (sousverse) sédimentent pour atteindre le fond du bassin, d'où elles sont remontées le long d'une auge (plan incliné) par un dispositif de manutention; ce dispositif est un assemblage de râteaux ou une vis, de là les noms de classificateur à râteaux et de classificateur à vis.

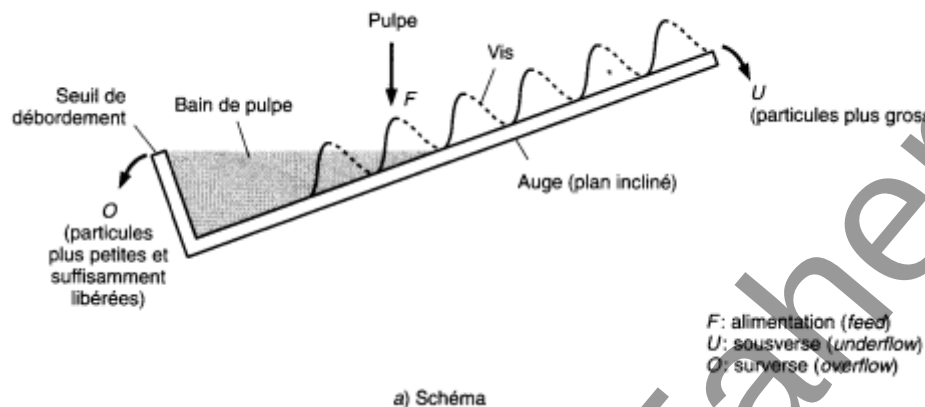


Figure V.2 : Description d'un classificateur à vis

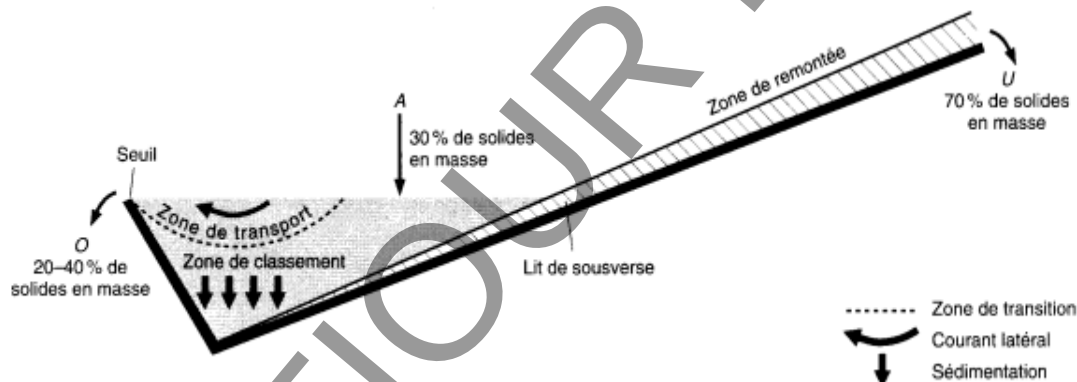


Figure V.3 : Zones d'un classificateur mécanique

C'est par le mécanisme de remontée de la sousverse que ces classificateurs diffèrent le plus. Dans le cas des classificateurs à râteaux (Figure V.4), chaque râteau a un mouvement cyclique de rotation semi-elliptique au cours duquel il se dirige vers la partie la plus basse du bassin, creuse à travers le lit de sousverse, remonte une courte distance le long de l'auge en entraînant la sousverse, sort du lit et commence un autre cycle. L'assemblage des râteaux cause une agitation importante de la pulpe de la sousverse, et leur efficacité de remontée est médiocre, ce qui oblige l'utilisation d'une auge avec une inclinaison peu élevée par rapport à l'horizontale; l'espace requis dans l'usine en est d'autant accru, si l'on désire décharger la sousverse à une hauteur déterminée.

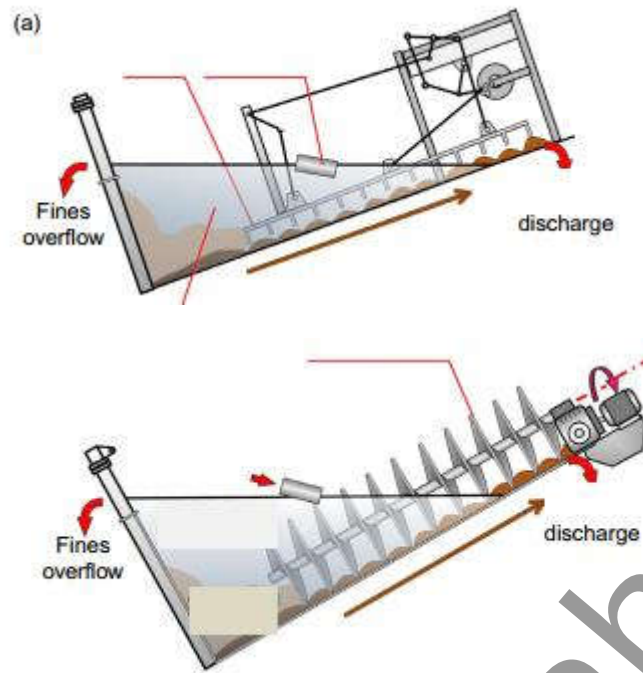


Figure V.4 : Principe du classificateur mécanique :
(a) classificateur de râteau, (b) classificateur à vis.

Les classificateurs mécaniques ont été utilisés dans les opérations de broyage en circuit fermé et dans la classification des produits des usines de lavage du minerai. Dans les installations de lavage, ils agissent plus ou moins comme des dispositifs d'encollage, car les particules sont essentiellement non libérées et ont donc une densité similaire. Dans le broyage en circuit fermé, ils ont tendance à renvoyer de petites particules denses vers le broyeur, c'est-à-dire les mêmes que celles notées pour les cyclones. Ils ont également été utilisés pour densifier les milieux denses.

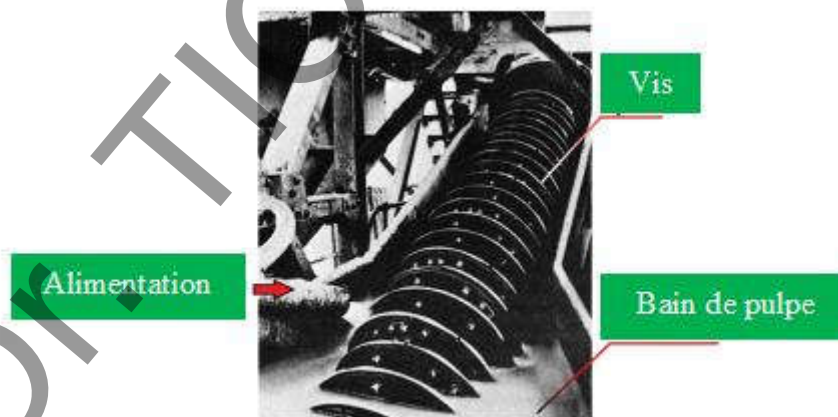


Figure V.5 : Classificateur à vis

L'alimentation en pulpe est introduite dans l'auge inclinée (figure V.5) et forme un bassin de décantation dans lequel les particules grossières à haute vitesse de chute atteignent rapidement le fond de l'auge. Au-dessus, le sable grossier est une zone de sables mouvants où se produit une sédimentation entravée. La profondeur et la forme de cette zone dépendent de

l'action du classificateur et de la densité de la pâte d'alimentation. Au-dessus des sables mouvants se trouve une zone de matériau essentiellement à décantation libre, comprenant un flux de pâte s'écoulant horizontalement à travers le sommet de la zone de sables mouvants depuis l'entrée d'alimentation jusqu'au déversoir de trop-plein, où les fines sont éliminées.

V.3.2. Classificateurs de sédimentation non mécaniques

En tant que forme la plus simple de classificateur, il y a peu d'efforts pour faire plus que séparer les solides du liquide, et en tant que tels, ils sont parfois utilisés comme unités de déshydratation dans des opérations à petite échelle. Par conséquent, ils ne conviennent pas à une classification fine ou si une efficacité de séparation élevée est requise. Ils sont souvent utilisés dans l'industrie des agrégats pour éliminer la boue des produits de sable grossier. Le principe du cône de décantation est illustré à la figure V.6.

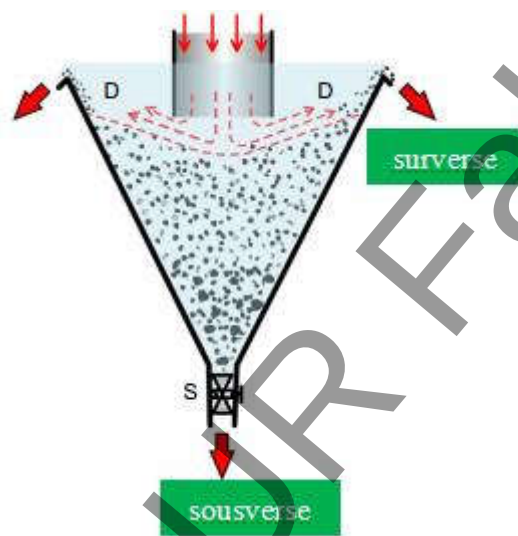


Figure V.6 : Classificateur de sédimentation non mécanique
(Opération de cône de décantation)

La pulpe est introduite dans le réservoir sous forme de flux distribué, avec la vanne de décharge de la zone S, initialement fermée. Lorsque le réservoir est plein, un débordement d'eau et de boues commence et un lit du sable décanté s'accumule jusqu'à ce qu'il atteigne le niveau indiqué. La vanne à robinet est maintenant ouverte et le sable est évacué à un débit égal à celui de l'entrée. La classification par action horizontale du courant s'effectue radialement à travers la zone D de la conduite d'alimentation à la lèvre de trop-plein. La principale difficulté de fonctionnement d'un tel dispositif est l'équilibrage des débits de décharge et de dépôt de sable; il est pratiquement impossible de maintenir une décharge régulière de sable à travers un tuyau ouvert sous l'influence de la gravité. De nombreuses conceptions différentes de cônes ont été introduites pour surmonter ce problème [9].

V.3.3. Classificateurs hydrocyclones

Les classificateurs hydrauliques utilisent de l'eau pour séparer les particules en fonction de leur taille et densité. Ils comportent bon nombre de caractéristiques souvent subtiles, dont la principale peut-être est le diamètre de coupure. Nous verrons ici les critères de performance dont les principaux sont l'efficacité et la capacité.

Classificateurs centrifuges sous la force de gravité, le taux de sédimentation d'une particule varie en fonction de sa masse effective. Si une force centrifuge est appliquée, la masse effective augmente et donc la vitesse de décantation augmente. Comme les particules sont broyées plus petites, elles atteignent une taille où la traînée de surface contre le fluide environnant neutralise presque l'attraction gravitationnelle, de sorte que la particule peut avoir besoin d'heures, voire de jours, pour tomber de quelques centimètres dans l'eau calme. Ce ralentissement du taux de décantation réduit le tonnage pouvant être manipulé et augmente la quantité de machines et d'installations nécessaires. En superposant la force centrifuge, l'attraction gravitationnelle peut être augmentée de 50 à 500 fois en fonction de la pression à laquelle la pulpe est alimentée et de la taille du récipient. L'hydrocyclone est celui qui utilise la force centrifuge pour accélérer le taux de sédimentation des particules.

V.3.3.1. Description et fonctionnement de l'hydrocyclone

L'hydrocyclone n'a pas de pièces mobiles (figure V.7). Il se compose d'une section cylindrique avec une entrée d'alimentation tangentielle. Une section conique, reliée à celle-ci, est ouverte en bas, diversement appelée buse de sous-écoulement, orifice de décharge, sommet ou robinet. Le sommet de la section cylindrique est fermé par une plaque traversée par un tuyau de trop-plein central monté axialement. Le tuyau est prolongé dans le corps du cyclone par une courte section amovible appelée détecteur de vortex, qui empêche le court-circuit de l'alimentation directement dans le trop-plein.

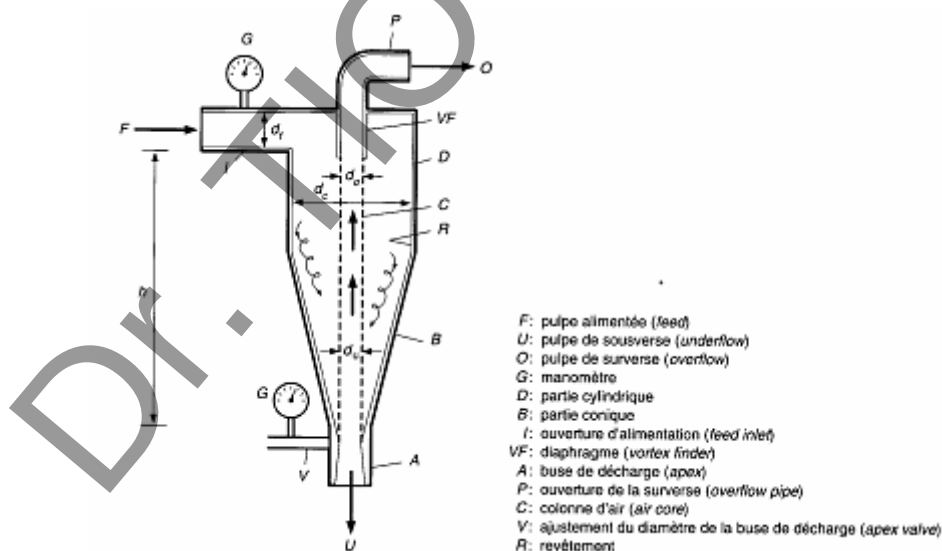


Figure V.7 : Parties constitutives d'un hydrocyclone [1]

Lorsqu'une pulpe est introduite tangentielle dans un cyclone, un tourbillon est généré autour de l'axe longitudinal. L'accélération centrifuge qui l'accompagne augmente les

taux de sédimentation des particules, dont les plus grossières atteignent la paroi du cône. Ici, ils entrent dans une zone de pression réduite et s'écoulent vers le bas jusqu'au sommet à travers lequel ils sont évacués.

Au centre du cyclone se trouve une zone de basse pression et de faible force centrifuge qui entoure un tourbillon rempli d'air. Une partie de la pulpe, transportant les particules les plus fines avec la majeure partie de l'eau d'alimentation, se déplace vers l'intérieur vers ce tourbillon et atteint la zone de rassemblement entourant la poche d'air. Ici, il est capté par le détecteur de vortex et évacué par un orifice de trop-plein central (figure V.8).

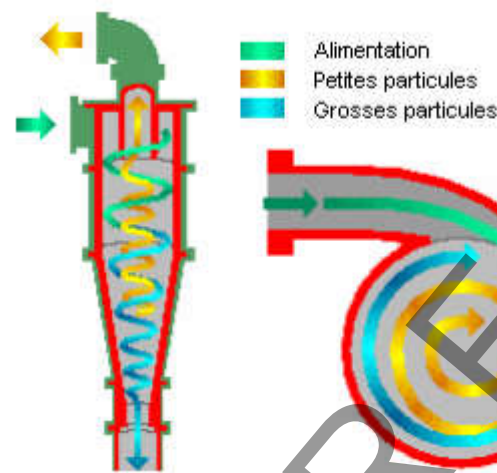


Figure V.8 : Mécanisme de fonctionnement de l'hydrocyclone

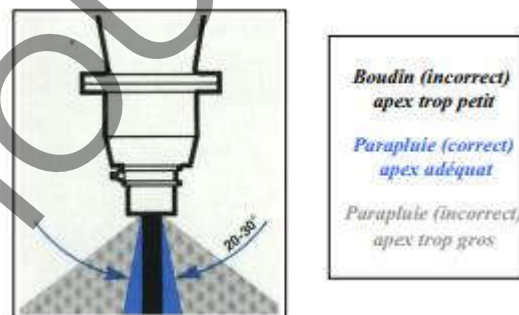


Figure V.9 : Types de décharge de la sousverse selon le diamètre de la buse de décharge

V.3.3.2. Applications et avantages de la classification

Les hydrocyclones sont les appareils de classification les plus utilisés dans l'industrie minière, particulièrement lorsque la granulométrie de l'alimentation est très petite; ils sont d'une grande efficacité dans ces conditions. Les autres avantages des hydrocyclones par rapport aux classificateurs mécaniques sont leur dimension très restreinte, signifiant qu'ils ont besoin de moins d'espace en correspondance. L'appareil étant plus petit, le temps de séjour des particules s'en trouve réduit. Les conséquences sont : un équilibrage plus rapide des circuits fermés de broyage, après la modification d'une variable de fonctionnement, de même

qu'une diminution de l'oxydation des surfaces aussitôt qu'elles sont produites par broyage, ce qui a de l'importance lorsque le procédé de flottation est appliqué sur la surverse. Le tableau V.2 résume les principales caractéristiques des hydrocyclones.

Tableau V.2 : Caractéristiques des principaux classificateurs

Appareil	Principe	Comparaison entre les classificateurs mécanique	Caractéristiques critiques
Classificateurs mécanique à râteaux	- Alimentation par gravité - Surverse par débordement	- Plan incliné moins abrupt - Plus d'agitation dans le bain	- Prend beaucoup d'espace - Temps de classification (séjour) très long
Classificateurs mécanique à vis	- Sousverse remontée par des râteaux ou une vis sans fin	- Plan incliné plus abrupt - Moins d'agitation dans le bain - Sousverse avec moins de fines - Moins d'eau	- Equilibre du circuit fermé lent à atteindre - Diamètre de coupure (d_{50}) élève - si la densité est normale ($>150 \mu\text{m}$) - Efficacité moindre
Hydrocyclone	- Alimentation sous pression - Surverse par débordement - Sousverse par gravité - Force centrifuge sur les particules		- Meilleure efficacité - Prend peu d'espace - Temps de classification court - Utilisé pour les d_{50} très petits (5 à $150 \mu\text{m}$) - Equilibre rapide des circuits fermés

V.3.4. Classificateurs pneumatiques

Les classificateurs pneumatiques utilisent un flux d'air pour séparer les particules. Ils sont couramment utilisés dans les industries où l'eau ne peut pas être utilisée.

V.3.4.1. Quelques types courants de classificateurs pneumatiques

a) Classificateur à Air

Principe : Utilise un courant d'air ascendant pour séparer les particules. Les particules fines et légères sont emportées par l'air, tandis que les particules plus lourdes tombent. Utilisé dans les industries de traitement de matériaux en poudre, comme les cimenteries, pour séparer les particules fines des particules plus grosses.

b) Séparateur Cyclonique

Principe : Un flux d'air en spirale génère une force centrifuge dans une chambre. Les particules lourdes sont projetées contre les parois et tombent, tandis que les particules fines restent dans le flux d'air et sont évacuées. Utilisé pour séparer les fines particules des gaz dans les cimenteries, les industries de la métallurgie, et le recyclage des poussières.

V.4. Principales étapes de la classification

V.4.1. Mise en suspension des particules

- ✓ Dans les systèmes hydrauliques, les particules sont mises en suspension dans un courant d'eau.
- ✓ Dans les systèmes pneumatiques, un flux d'air soulève les particules.
- ✓ La suspension permet aux particules de se déplacer en fonction de leur comportement dans le fluide.

V.4.2. Application de forces de séparation

- **Force gravitaire** : Dans les classificateurs gravitaires, les particules les plus denses ou les plus grosses tombent plus rapidement vers le fond, tandis que les particules plus légères restent en suspension.
- **Force centrifuge** : Dans les hydrocyclones ou séparateurs cycloniques, un mouvement rotatif crée une force centrifuge qui projette les particules plus lourdes vers l'extérieur, alors que les particules fines restent dans le flux central.
- **Force hydrodynamique ou aéraulique** : Dans les classificateurs à air ou à eau, les particules légères sont emportées par le flux, alors que les particules plus lourdes résistent à l'écoulement et se déposent.

V.4.3. Classification par taille et densité

Les particules se déplacent différemment selon leur taille et leur densité :

- Les particules fines et légères suivent facilement le flux et sont classifiées comme une fraction légère.
- Les particules grossières et denses, en raison de leur inertie plus importante, se déplacent moins avec le flux et se déposent plus rapidement.
- Cette classification permet d'obtenir des fractions distinctes en fonction des caractéristiques des particules.

V.4.4. Recueil des fractions

Les différentes fractions de particules sont récupérées en fonction de leur position dans le classificateur. Les fines sont généralement évacuées avec le flux (d'eau ou d'air), tandis que les grosses particules sont récupérées par gravité ou dans des zones spécifiques de l'appareil.

Conclusion

La préparation des minerais est une étape essentielle dans l'industrie minière, elle englobe un ensemble d'opérations physiques et mécaniques visant à réduire la taille des solides afin de libérer les substances utiles des gangues. Elle commence par la fragmentation, incluant le concassage, le broyage, le criblage et la classification. Ces procédés sont indispensables pour optimiser l'exploitation des ressources minérales, tout en garantissant une utilisation efficace et économique des minerais extraits.

La technique de préparation mécanique des minerais repose sur une combinaison de principes physiques, mécaniques et de technologies adaptées aux propriétés des minerais traités. L'objectif est de maximiser l'efficacité des étapes de traitement tout en minimisant les pertes et la consommation énergétique. Par ailleurs, la préparation mécanique des minerais joue un rôle clé dans la gestion durable des ressources minérales, en réduisant les déchets et en limitant l'impact environnemental grâce à l'intégration de procédés modernes et respectueux de l'environnement.

La fragmentation est un terme général pour la réduction de la taille qui peut être appliqué sans égard au mécanisme de rupture réel impliqué. Dans toute opération de fragmentation industrielle, la rupture d'une particule individuelle se produit simultanément avec celle de nombreuses autres particules. Le produit de rupture de toute particule est intimement mélangé à ceux d'autres particules. Ainsi, une opération de broyage industriel ne peut être analysée qu'en termes de répartition des particules d'alimentation et des particules de produit. Cependant, chaque particule individuelle se brise sous l'effet des contraintes qui lui sont appliquées et à elle seule.

Les machines utilisées pour le concassage et le broyage sont entièrement différentes. Il est à noter que l'énergie requise pour la fragmentation de l'unité de masse de particules plus petites est supérieure à l'énergie requise pour l'unité de masse de particules plus grossières. Cependant, l'énergie nécessaire pour réduire les particules plus grossières est supérieure à celle des particules plus petites. Par conséquent, les machines utilisées pour le concassage (concasseurs) doivent être massives et robustes et les machines utilisées pour le broyage (broyeurs) doivent être capables de disperser l'énergie sur une grande surface. Dans les concasseurs, les forces de rupture sont appliquées soit par compression, soit par impact, tandis que dans les broyeurs, les forces de cisaillement sont principalement appliquées.

L'étape de préparation des minerais constitue un maillon stratégique dans la chaîne de mise en valeur des minerais, favorisant à la fois une exploitation rationnelle et une valorisation optimale des ressources minérales.

Références bibliographiques

- [1] Serge bouchard, 2001. Traitement du minerai : flottation, méthodes physiques, Griffon d'argile, ISBN 978-2-89443-156-6.
- [2] Radziszewski, P., 2013. Energy recovery potential in comminution processes. Miner. Eng. 46-47, 8388.
- [3] Wills, B.A., Atkinson, K., 1993. Some observations on the fracture and liberation of mineral assemblies. Miner. Eng. 6 (7), 697706.
- [4] Kingman, S.W., et al., 2004. Recent developments in microwaveassisted comminution. Int. J. Miner. Process. 74 (1-4), 7183.
- [5] Partridge, A.C., 1978. Principles of comminution. Mine Quarry. 7 (288), 7073.
- [6] Major, K., 2002. Types and characteristics of crushing equipment and circuit flowsheets. In: Mular, A.L., et al., (Eds.), Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control, vol. 1. SME, Littleton, CO, USA, pp. 566583.
- [7] Major, K., 2009. Factors influencing the selection and sizing of crushers. In: Malhotra, D., et al., (Eds.), Recent Advances in Mineral Processing Plant Design. SME, Englewood, CO, USA, pp. 356360.
- [8] Broman, J., 1984. Optimising capacity and economy in jaw and gyratory crushers. Eng. Min. J. 185 (6), 6971
- [9] Taggart, A.F., 1945. Handbook of Mineral Dressing: Ore and Industrial Minerals. Wiley, & Sons., Chapman & Hall, Ltd, London, UK
- [10] Erikson, M.T., 2014. Innovations in comminution equipment: high pressure grinding rolls, semi-autogenous grinding, ball mills, and regrind mills. In: Anderson, C.G., et al., (Eds.), Mineral Processing and Extractive Metallurgy: 100 Years of Innovation. SME, Englewood, CO, USA, pp. 6576.
- [11] Major, K., 2002. Types and characteristics of crushing equipment and circuit flowsheets. In: Mular, A.L., et al., (Eds.), Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control, vol. 1. SME, Littleton, CO, USA, pp. 566583
- [12] Lewis, F.M., et al., 1976. Comminution: a guide to size-reduction system design. Mining Eng. 28 (9), 2934.
- [13] Ramos, M., et al., 1994. Aggregate shape - Prediction and control during crushing. Quarry Manage. 21 (11), 2330.
- [14] Kojovic, T., Bearman, R.A., 1997. The development of a flakiness model for the prediction of crusher product shape. Proc. 41st Annual Institute of Quarrying Conf., Brisbane, Queensland, Australia, pp. 135148.
- [15] Joe, E.G., 1979. Energy consumption in Canadian mills. CIM Bull. 72 (801-806), 147151.
- [16] Powell, M.S., et al., 2011. DEM modelling of liner evolution and its influence on grinding rate in ball mills. Miner. Eng. 24 (3-4), 341351
- [17] Pax, R.A., 2012. Determining mill operational efficiencies using noncontact acoustic emissions from microphone arrays. Proc. 11th Mill ; Operators Conference. AusIMM, Melbourne, Australia, pp. 119126

- [18] Leung, K., et al., 1992. Decision of Mount Isa Mines Limited to change to autogenous grinding. In: Kowatra, S.K. (Ed.), *Comminution - Theory and Practice*. SME, Littleton, CO, USA, pp. 331338 (Chapter 24).
- [19] Wei, D., Craig, I.K., 2009. Grinding mill circuits: a survey of control and economic concerns. *Int. J. Miner. Process.* 90 (1-4), 5666.
- [20] Lewis, F.M., et al., 1976. *Comminution: a guide to size reduction system design*. Mining Eng. 28 (Sept.), 2935.
- [21] McIvor, R.E., Finch, J.A., 1986. The effects of design and operating variables on rod mill performance. *CIM Bull.* 79 (895), 3946.
- [22] Rajagopal, V., Iwasaki, I., 1992. Grinding media selection criteria for wear resistance and flotation performance. In: Kowatra, S.K. (Ed.), *Comminution - Theory and Practice*. SME, Littleton, CO, USA, pp. 181200 (Chapter 14).
- [23] Finch, J.A., et al., 2007. Iron control in mineral processing. *Proc. 39th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors Conf.*. CIM, Ottawa, ON, Canada, pp. 365386.
- [24] Réalisé avec le concours de OUDOT (J.M.) des Établissements Gantois.
- [25] RIDDELL (R.J.). – The utilisation of modular screening. Part 1 Mine and Quarry 22 (3)p. 9-11, mars 1993 Part 2 Mine and Quarry 22 (4) p. 26-27, avril 1993
- [26] WEISS (N.L.). – *SME Mineral processing hand-book*. Section 3E Screening SME of AIMMPE p. 3E 1-41, New York (1985).
- [27] MATTHEWS (C.W.). – General classes of screens. *SME Mineral processing handbook* Section 3E Screening p. 3E, 1-13 SME of AIMMPE New York (1985).
- [28] NORGATE (T.E.) et WELLER (K.R.). – The effect of moisture on screen performance. XVIIIth IMPC p. 287-292, AIMM Sydney (1993).
- [29] SUTTILL (K.R.). – Screens for all occasions. The choice has never been wider. *Eng. and Min. Journal* vol. 191, no 2, p. 18-22, fév. 1990
- [30] Bothwell, M.A., Mular, A.L., 2002. Coarse screening. In: Mular, A.L., et al., (Eds.), *Mineral Processing Plant Design, Practice and Control*, vol. 1. SME, Littleton, CO, USA, pp. 894916
- [31] Cleary, P.W., 2003. DEM as a tool for design and optimisation of mineral processing equipment. *Proceedings of the 22th International Mineral Processing Congress (IMPC)*, Cape Town, South Africa, pp. 16481657
- [32] GUILLARD (Y.), LEGEAY (G.) et LEROY (M.). – Le banc de contrôle automatique des tamis. *Mines et Carrières* vol. 73, p. 125-127, août-sept. 1991.
- [33] Barkhuysen, N.J., 2009. Implementation strategies to improve mill capacity and efficiency through classification by particle size only, with cases studies. *Proc. of the Fifth Southern African Base Metals Conference, SAIMM, Kasane, Botswana*, pp. 101113
- [34] Valine, S.B., et al., 2009. Fine sizing with the Derricks Stack Sizert screen. In: Malhotra, D., et al., (Eds.), *Recent Advances in Mineral Processing Plant Design*. SME, Littleton, CO, USA, pp. 433443.
- [35] Heiskanen, K., 1993. *Particle Classification*. Chapman & Hall, London, UK.