



N° d'ordre : M2...../GPE/2020

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DEMASTER ACADEMIQUE

**Filière : Génie des procédés**

**Option: Génie des Procédés de l'Environnement**

### Thème

**Étude de l'effet des paramètres opératoires d'un  
broyeur à boulets**

1- Mr. MESSABIHI Abdelkader

2- Mr. NADERHamza

Soutenu le .... /...../ 2020 devant le jury composé de :

Président M. Benderdouche Nouredine Pr. Université de Mostaganem

Examineur M. Termoul Mourad MCA Université de Mostaganem

Rapporteur M. Bestani Benaouda Pr. Université de Mostaganem

Année Universitaire 2019/2020

## *Remerciements*

Tout d'abord, nous remercions le Dieu, notre créateur de nos avoir donné les forces pour accomplir ce travail. Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur Mr : Bestani Benaouda pour ses conseils.

Nous remercions, également les membres de jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail.

Par ailleurs, la réalisation de ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien moral et effectif de nos familles. Nous remercions donc, nos parents pour leurs appuis et leurs soutiens durant toutes ces années d'étude.

Finalement, Nous remercions toute personne qui m'a aidé de manière directe ou indirecte à la réalisation de cette étude.

*Hamza et Bahaa eddine*

## ***Dédicaces***

*Nous dédions ce modeste travail à :*

*Nos chères mères et à nos chers pères*

*Nos frères et sœurs,*

*Toutes nos familles*

*Nos amis proches*

*Et à tous les étudiants de la promotion 2019/2020*

*Messabihi Abdelkader Bahaa- eddine  
Nader Hamza*

# *Sommaire*

**Dédicaces**

**Remerciements**

**Sommaire**

**Introduction générale** 01

## **Chapitre I : Le broyage**

I.1. Définition de broyage	02
I.2. Utilités et avantages du broyage	02
I.3. Applications du broyage	02
I.4. Différents types de broyage	03
I.4.1. Broyage simple	03
I.4.2. Broyage poussé	03
I.4.3. Broyage ménage	03
I.4.4. Broyage différentiel (broyage sélectif)	03
I.4.5. Broyage formel	03
I.4.6. Broyage autogène	04
I.4.7. Broyage combinés	04
I.5. Propriétés des matériaux à broyer	04

## **Chapitre II : Broyeurs à boulets**

II.1. Définition du broyeur à boulets	
II.2. Objectifs du broyeur à boulets	
II.2.1. Broyeur à boulets	06
II.3. Les différents broyeurs à boulets	06
II.4. Spécifications des broyeurs à boulets	10
II.5. Travail de la charge	10
II.6. Caractéristique de broyeur à boulet	11
II.7. Principe de fonctionnement de broyeur à boulet	11
II.8. Les régimes de fonctionnements	12
II.9. Temps de passage	13
II.10. Les paramètres influençant le fonctionnement du broyeur	13
II.11. Energie de broyage	14
II.11.1. Loi de Rittinger	14
II.11.2. Loi de Kick	14

II.11.3. Loi de Bond	14
----------------------	----

### **Chapitre III : Partie pratique**

III.1. Détermination de la vitesse de rotation	15
III.2. Broyage et analyse granulométrique	16
III.3. Analyse granulométrique par tamisage	17
III.4. Analyse granulométrique en utilisant la méthode de RRSB	20
Conclusion	22
Bibliographie	

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau II.2 : Spécification des broyeurs à boulets	10
Tableau III.1. Valeurs expérimentales de broyage	15
Tableau III.2. Données de départ pour l'analyse granulométrique	17
Tableau III.3. Résultats de l'analyse granulométrique	18

## **LISTE DES FIGURES**

Figure I.1 : Les différentes étapes de fragmentation et les machines qui y sont associées	05
Figure II.1: Effet d'impact et l'effet d'attrition	07
Figure II.2 : Le broyeur à boulets	07
Figure II.3. Broyeur Air-Sweep	08
Figure II.4 : Broyeur à décharge centrale	09
Figure II.5. Broyeur à deux compartiments de broyage	09
Figure II.6 : L'effet cataracte et cascade	11
Figure II.7 : Régime responsable sur l'effet cataracte et cascade	11
Figure III.1. Détermination de la vitesse optimale de broyage	13
Figure III.2. Schéma simplifié d'un broyeur à boulets	16
Figure III.3. Batterie de tamis pour séparation	17
Figure III.4. : Courbe de répartition granulométrique(méthode I)	19
Figure III.5. : Courbe de répartition granulométrique (méthode II)	19

# *Introduction générale*

Parmi toutes les opérations unitaires d'obtention de poudres, le broyage est sans doute celle qui est la plus utilisée comme méthode de fragmentation.

Le broyage est une opération de mise en forme des solides, elle vise à diminuer et à maîtriser la granularité des solides, dans le but de faciliter les étapes ultérieures de traitements des produits. Il se présente dans différents domaines industriels tels que, la métallurgie, la chimie, la pharmacie, l'agroalimentaire, etc..

Le broyage peut être fin, moyen et gros. Il peut se réaliser lorsque la matière est à l'état sec (broyage sec) ou bien humide (broyage humide).

Parmi les applications majeures, on le retrouve dans l'industrie du ciment, qui a connu un important essor car ce produit a une large utilisation dans la construction.

Dans ce cadre, nous avons opté pour une étude théorique qui concerne l'effet des paramètres opératoires d'un broyeur à boulets pour le broyage du sable comme matière solide, donc notre mémoire comprend quatre chapitres repartis comme suit:

- Le premier chapitre présente une généralité sur le broyage et les appareils de fragmentation associés.
- Le deuxième chapitre est consacré à la description du broyeur à boulets très utilisé dans plusieurs industries telles que les cimenteries, pharmaceutiques etc.
- Le troisième chapitre est consacré à la détermination expérimentale de certains paramètres influençant le broyage.

# Chapitre I : Le broyage

## I.1. Définition de broyage

Le terme broyage, bien que n'appliquant en réalité qu'une tranche des opérations de fragmentation, est très couramment utilisé pour désigner l'ensemble de ces opérations, et se retrouve par conséquent, dans de nombreuses expressions qui s'y rapportent

Le broyage est une opération de mise en forme des solides, elle vise à diminuer et à maîtriser la granularité des solides, dans le but de faciliter les étapes ultérieures du traitement des produits, manutention, conditionnement, ou de mise en suspension.

## I.2. Utilités et avantages du broyage

Cette technique présente une large utilisation dans le domaine industriel, elle peut être effectuée suivant les modes suivants : la première sèche (broyage sec : moins de 2 % d'eau dans le produit), bien semi humide (broyage humide : 2 à 25% d'eau dans le produit) ou bien Broyage en phase liquide (broyage à voie humide (25 à 300% d'eau dans le produit). Parmi les intérêts du broyage, on peut citer :

- La préparation de formes galéniques (poudres, comprimés, gélules...).
- Avoir une granulométrie maîtrisée.
- Meilleure homogénéité et stabilité des mélanges de poudres.
- Améliorer la stabilité des suspensions.
- Accélérer le séchage.
- Extraction liquide des principes actifs (plante) est plus facile.
- Augmenter la vitesse de dissolution ce qui améliore la biodisponibilité.

## I.3. Applications du broyage

Avec le développement technologique, le broyage est devenu omniprésent dans le monde des industries métallurgiques, chimique, pharmaceutique, agroalimentaire, etc.

Cette variété de discipline résulte en fait des multiples aspects que revêtent ces procédés et des nombreuses utilisations qui en résultent.

A titre d'exemple dans l'industrie minérale, on enregistre l'utilisation de deux termes pour qualifier la fragmentation du produit brut pour faciliter sa manutention et le préparer pour la

fragmentation ultérieure (le broyage).

D'autre part, la production de la poussière et le bruit se présentent comme les inconvénients de ce procédé industriel. De même, sa forte consommation énergétique (> 3%) de l'énergie totale demeure un problème économique.

## **I.4. Différents types de broyage**

### **I.4.1. Broyage simple**

Il n'y a pas d'autre impératif que celui de ramener la totalité de l'échantillon jusqu'en dessous d'un calibre déterminé (sans aucune considération de la granulométrie interne de deuxième produit), cela suffit lorsque par exemple, la réduction opérée a simplement pour but de rendre le produit plus aisément manutentionnable [1].

### **I.4.2. Broyage poussé**

Le produit broyé doit contenir le maximum possible d'élément nettement plus fins que la limite supérieure imposée. En d'autres termes, l'échantillon broyé doit présenter une surface spécifique aussi élevée que possible (liants hydrauliques, perte de valeur) [1].

### **I.4.3. Broyage ménage**

En sens inverse du broyage applicable seulement, on peut avoir intérêt à chercher le moins de sur broyage possible. Soit parce qu'il est inutile (dans ce cas l'économie de force motrice) soit même parce qu'il est nuisible (difficulté de récupération, perte de valeur) [1].

### **I.4.4. Broyage différentiel (broyage sélectif)**

Ce mode de broyage applicable seulement à des produits structurellement hétérogènes, permet au prix de certaines précautions de pousser la réduction des constituants friables un peu plus loin que celle de constituants plus durs [1].

### **I.4.5. Broyage formel**

Ce terme désigne les opérations de fragmentation au cours desquelles la forme des fragments obtenus a une influence sur la valeur du produit. La forme recherchée peut être :

- \* soit celle de petits grains cubiques (cas des matières thermoplastiques).
- \* soit celle de fragments se rapprochant le plus possible la forme cuboïde (matériaux souliers, agrégats pour la fabrication de béton...etc.) pour lesquels le coefficient de

forme est un des éléments du cahier des charges.

\* soit au contraire, celle d'éléments plats paillettes ou écailles, telles que dans le cas des poudres de talc, graphite, pigment pour peinture, etc. [1].

#### **I.4.6. Broyage autogène**

Il s'agit ici d'opérations de réduction volumique dans lesquelles les éléments du produit à broyer se fragmentent par percussion et frottement réciproques (self ou auto broyage) [1].

#### **I.4.7. Broyage combinés**

Il arrive assez souvent que les opérations de fragmentations puissent être combinées dans un même appareil avec d'autres opérations plus ou moins complémentaires, on peut avoir :

- Des broyeurs cribleurs ou broyeurs tamiseurs.
- Des broyeurs séparateurs ou sélecteurs à courant d'air.
- Des broyeurs sécheurs.
- Des broyeurs mélangeurs.
- Des broyeur dans lesquels débutent ou se poursuivent des réactions chimiques ou physiques (fabrication de l'alumine par le procédé broyer, Amalgamation de minerais d'or, etc.) [1].

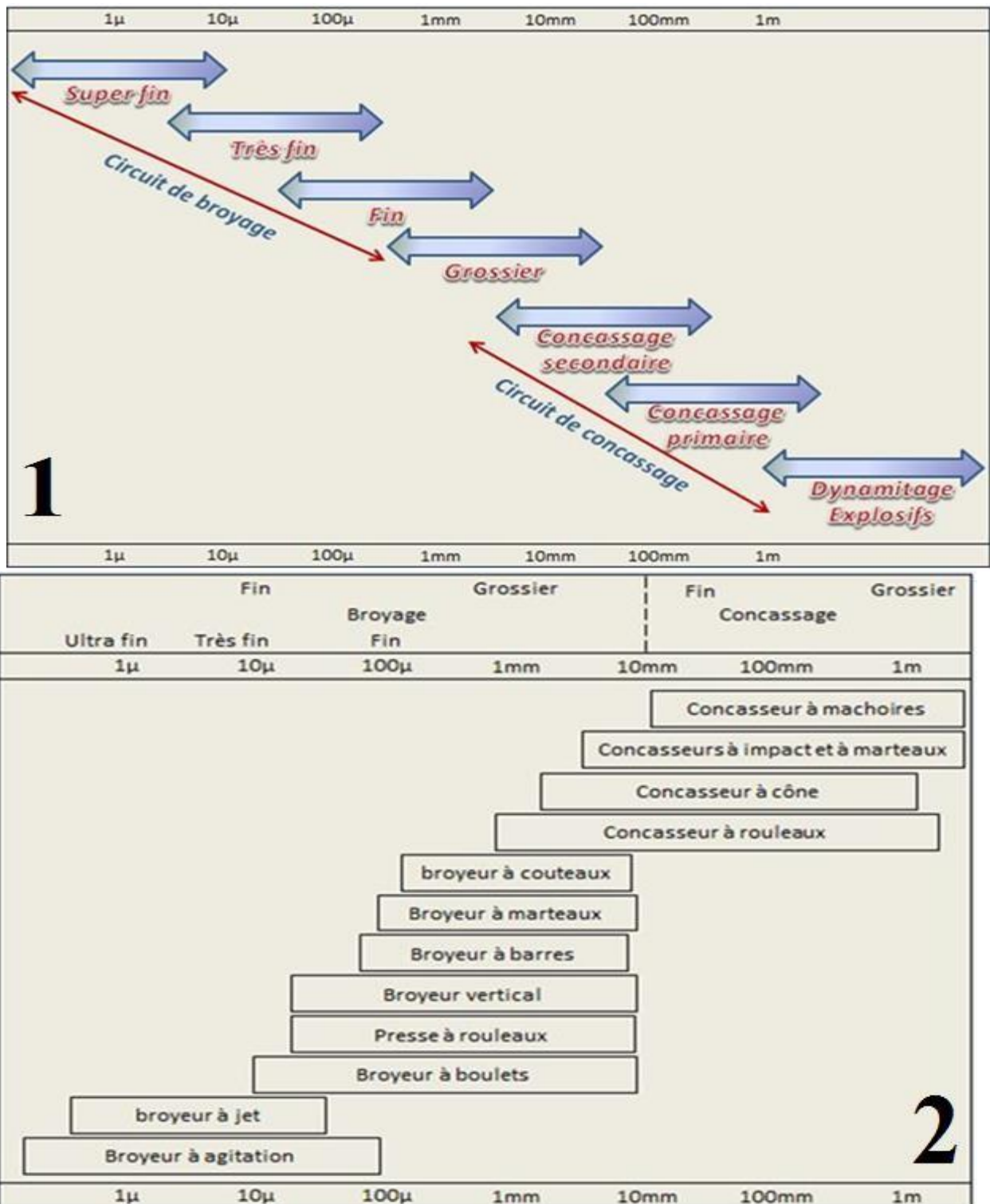
### **I.5. Propriétés des matériaux à broyer**

Les propriétés physiques des matériaux à fragmenter ont une influence sur le choix des appareils de fragmentation. Elles sont caractérisées par des indices tels que l'indice de friabilité de Hardgrove, l'indice énergétique de Bond, l'indice d'aptitude à l'agglomération de Papadakis et l'indice d'abrasion [1, 2]. Leurs déterminations se font à partir des essais sur des échantillons moyens des matériaux à fragmenter. On cite parmi ces propriétés :

- **L'abrasivité** : C'est l'aptitude d'un matériau donné à éliminer ou user la surface d'un autre matériau.
- **La dureté** : C'est la propriété la plus répandue et la plus utilisée dans le domaine du broyage, elle est définie comme étant la résistance d'une particule à la pénétration par un corps étranger.
- **La granulométrie de départ**: C'est un facteur de grande importance dans le choix du type broyage, à titre d'exemple, si la distribution de départ est très large, le broyage doit s'effectuer en plusieurs étapes tout en évitant le phénomène de

subbroyage.

Selon Berthieux (1994), on peut caractériser sept zones conventionnelles, chacune d'entre elles présente un intervalle de taille donné comme le montre la Figure (I.1):



**Figure I.1 :** Les différentes étapes de la fragmentation (1) et les machines qui y sont associées (2)

# Chapitre II : Broyeurs à boulets

## II.1. Définition du broyeur à boulets

Un broyeur à boulets est un cylindre en rotation contenant des boulets d'acier qui agissent comme des médias de meulage, le matériau à broyer est mis dans le baril cylindrique, qui tourne à une vitesse comprise entre 4 et 20 tours par minute, inversement proportionnelle au diamètre du cylindre. Plus le diamètre de l'appareil cylindrique est large, plus la vitesse de rotation est lente.

La rotation produit des forces centrifuges qui soulèvent les boulets à une hauteur donnée, et les font tomber dans le cylindre et sur le matériau pour être broyé.

Le produit est mélangé et broyé en poudre par le media de meulage (boulets d'acier) à la suite de la rotation. Si la vitesse du moulin est trop grande, le cylindre agira comme une centrifuge, ce qui permet aux boulets de rester sur le périmètre du moulin au lieu de retomber.

La vitesse de rotation ou un broyeur à boulets agit comme une centrifugeuse est appelée la « vitesse critique ». La vitesse de fonctionnement du broyeur à boulets est généralement comprise entre 50% et 90% de la valeur de la vitesse critique.

### II.1.1. Objectifs du broyeur à boulets

- \* Broyer la matière crue, le clinker (cas des cimenteries) et les combustibles solides pour obtenir une poudre fine adaptée aux besoins.
- \* Le broyeur doit produire aussi une finesse régulière avec une consommation d'énergie minimale et une bonne fiabilité (taux de fiabilité > 98%).

## II.2. Broyeur à boulets

Le système le plus commun est le broyeur à boulets (ex : 70% des broyeurs utilisés dans les cimenteries Lafarge) c'est la technologie la plus ancienne et donc la mieux connue.

Ils sont utilisés pour broyer toute sorte de matériaux solides normaux. Ils sont aussi utilisés dans les voies humides pour la pâte.

La matière est introduite dans tube rotatif contenant des boulets en acier. La réduction de la taille est due au choc entre les boulets et la matière. Deux phénomènes se produisent :

- 1) L'effet de **cataracte**, concassage de matière,
- 2) L'effet de **cascade**, attrition.

Les fines sont évacuées du broyeur par la poussée de la matière entrant dans le broyeur et aussi par le flux gazeux emportant les particules les plus fines [6].

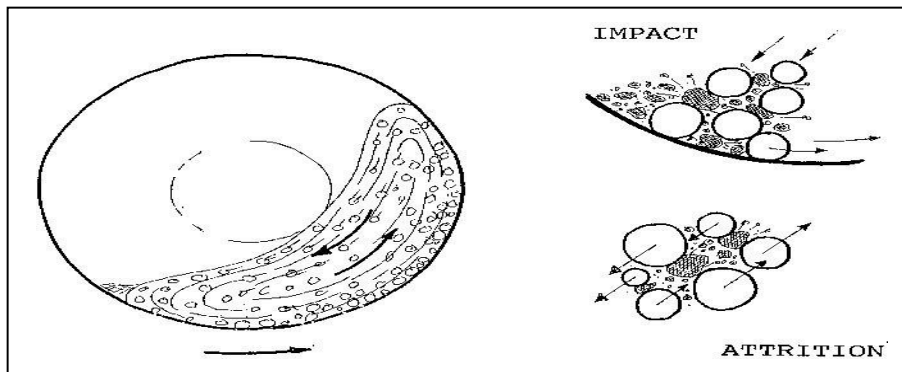


Figure II.1: Effet d'impact et l'effet d'attrition [7].

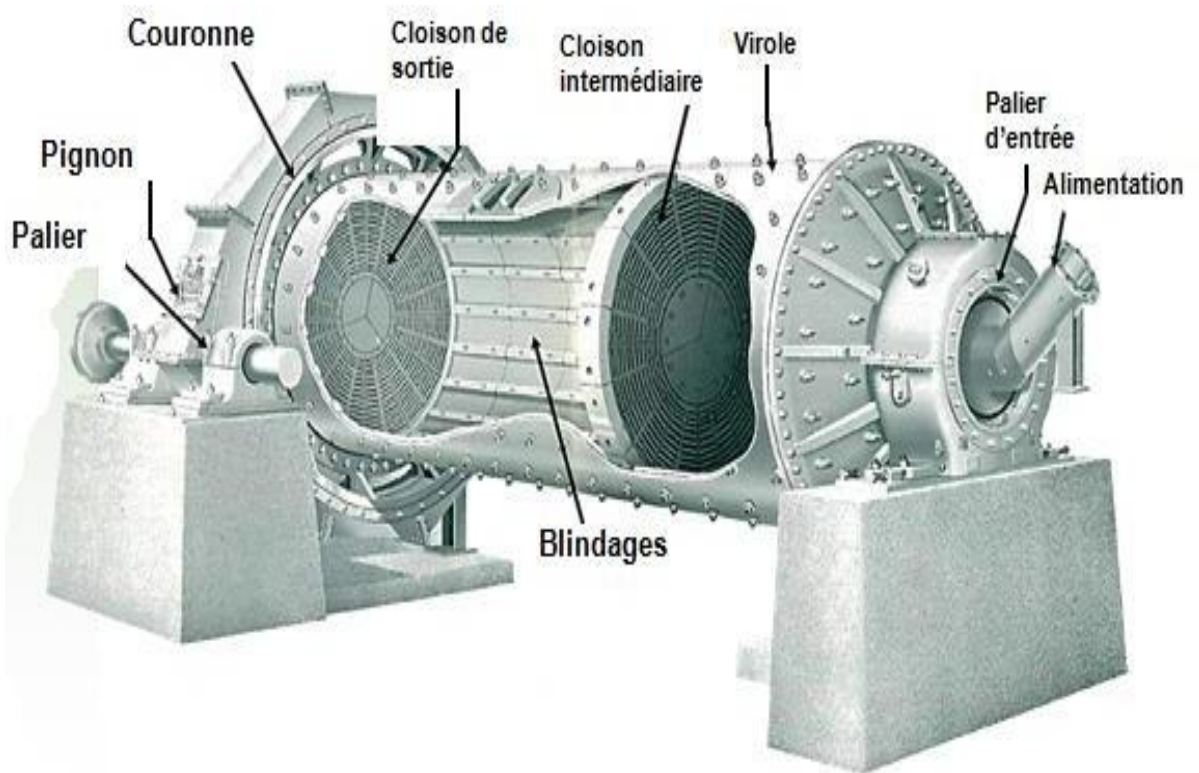


Figure II.2 : Le broyeur à boulets.

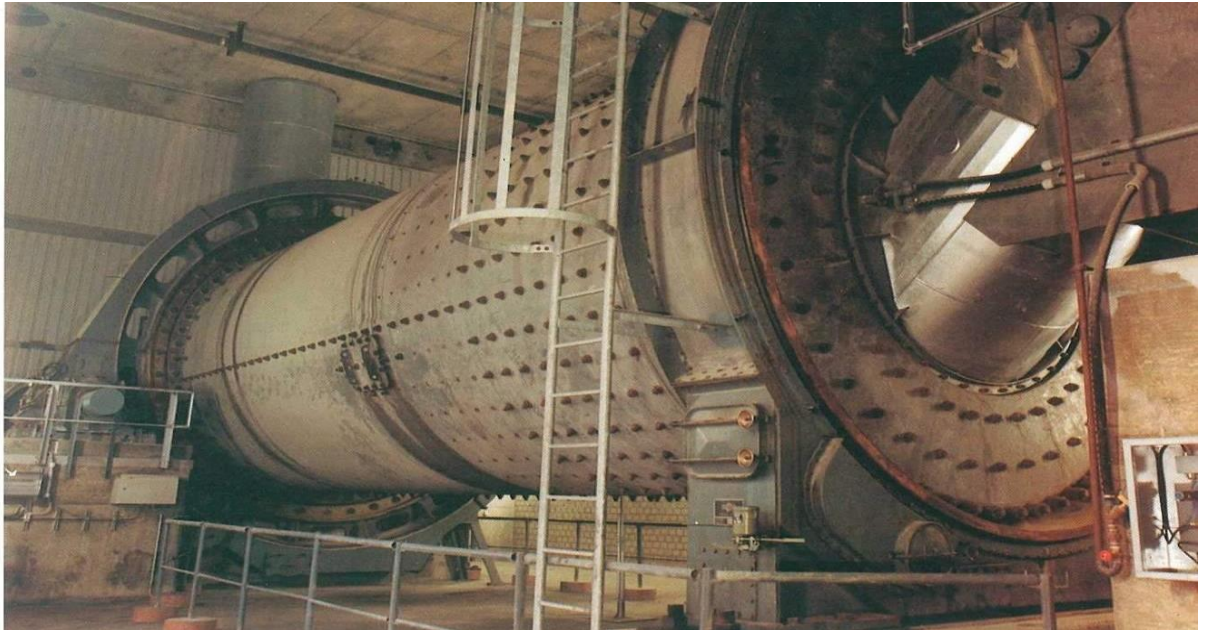
### II.3. Les différents broyeurs à boulets

Les broyeurs industriels peuvent avoir 1,2 ou 3 compartiments. Ainsi il n'est pas rare de trouver des broyeurs mono-chambre courts utilisant de la matière grossière comme charge. Il existe trois types :

#### 1) Broyeur Air-Swept

- Il ne comprend qu'un compartiment de broyage sans ou avec cloison de sortie.
- La matière est transportée pneumatiquement à la sortie du broyeur.

- Cette conception est surtout utilisée pour les matériaux à fort taux d'humidité et comprend généralement un compartiment de séchage.

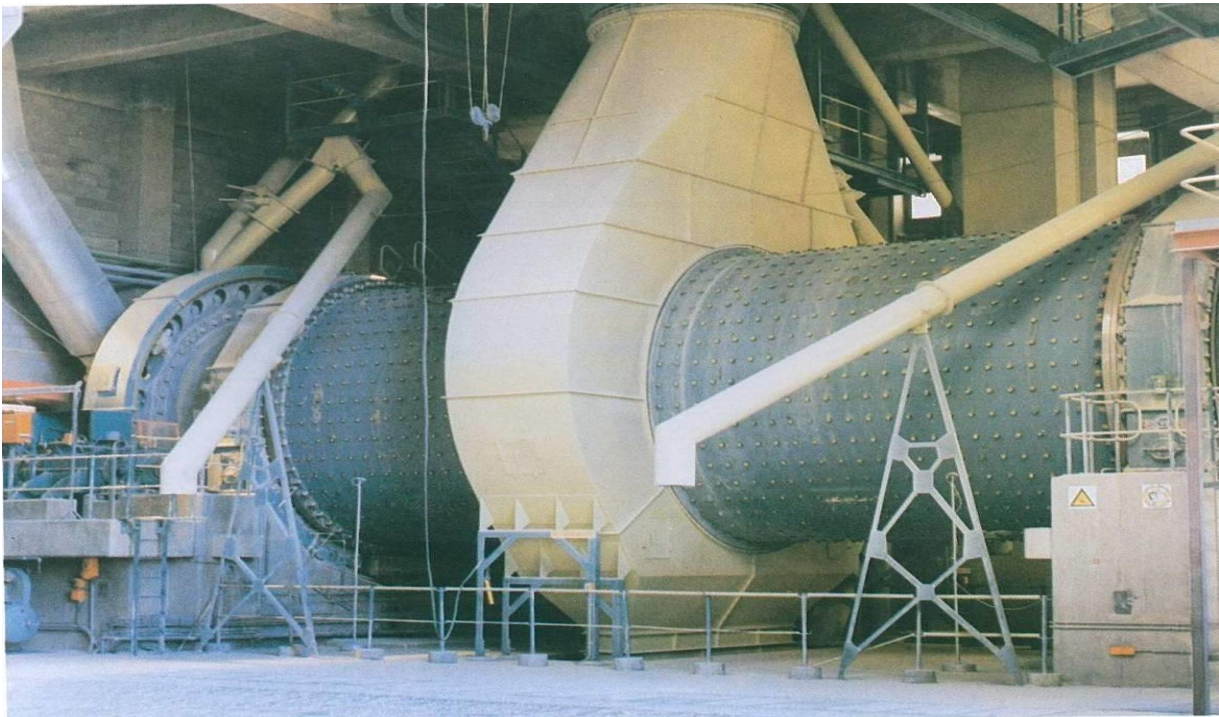


**Figure II.3.** Broyeur Air-Sweep

## 2) **Bi-rotateur (Décharge centrale)**

Ce système accepte aussi les flux d'air importants, il est utilisé pour sécher la matière crue :

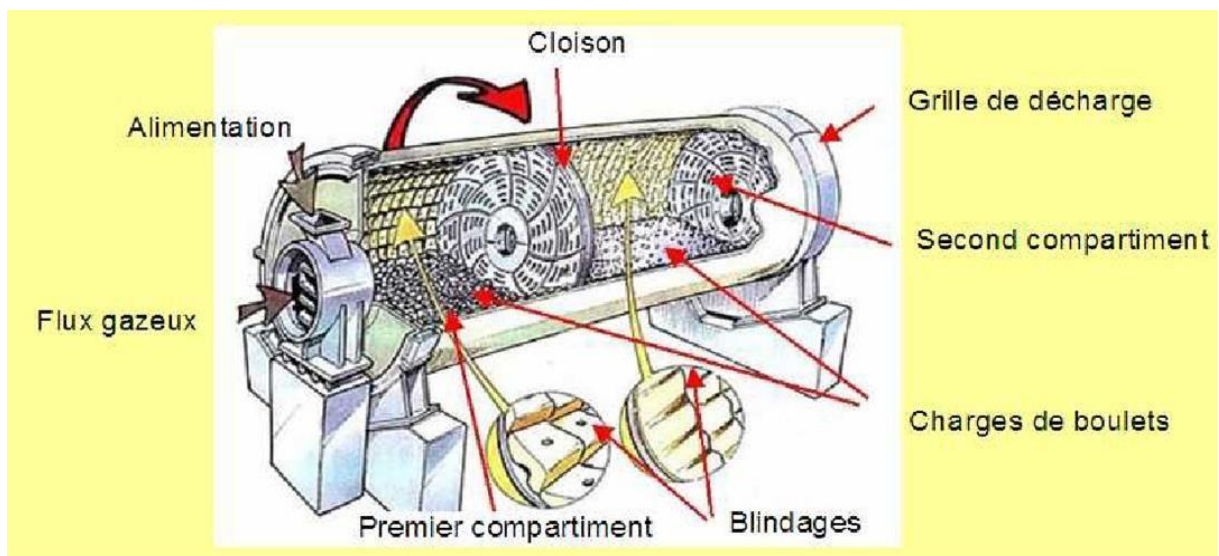
- Le broyeur à boulets comporte deux compartiments de broyage séparés par une décharge centrale.
- La matière peut être séchée dans un compartiment de séchage situé en amont, puis pré broyée dans le 1<sup>er</sup>compartiment.
- Ensuite, la matière sort du 1<sup>er</sup> compartiment en passant par la décharge centrale pour être transportée jusqu'au séparateur.
- Le séparateur trie la matière. Les particules grossières retournent au broyeur (principalement dans le 2<sup>ème</sup> compartiment de broyage). Les fines sont envoyées directement au silo farine.
- La matière broyée dans le 2<sup>ème</sup> compartiment sort également par la décharge centrale, pour être à nouveau triée dans le séparateur.



**Figure II.4 :** Broyeur à décharge centrale

### 3) Compound (deux compartiments de broyage)

C'est t le système le plus fréquemment utilise chez Lafarge (66%). Il a 2 compartiments pour optimiser le procès : le premier est utilisé pour concasser, le second pour broyer finement. Les deux sont séparés par une cloison. Cette séparation permet la constitution de deux charges différentes et régule aussi le flux de matière.



**Figure II.5.** Broyeur à deux compartiments de broyage

## II.4. Spécifications des broyeurs à boulets

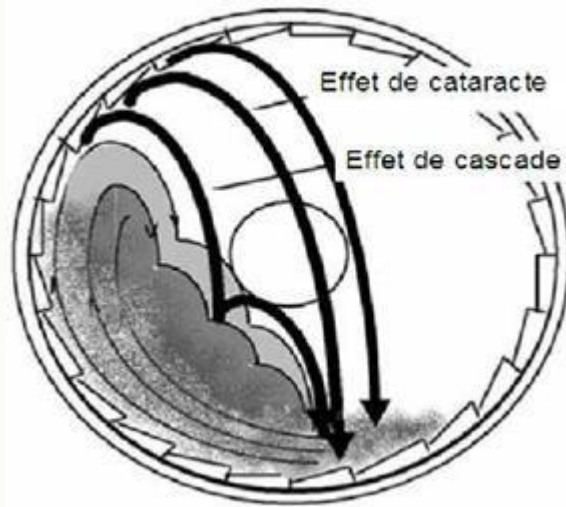
Tableau II.2 : Spécification des broyeurs à boulets

modèle	Vitesse de rotation (r/min)	Chargement du boulet (tones)	Taille d'alimentation (mm)	Taille de la sorte (mm)	Capacité (tonnes/h)	Puissance (kW)	Poids (tonnes)
<b>Ø 900*1800</b>	36-38	1.5	≤20	0.075-0.9	0.65-2	18.5	4.6
<b>Ø 900*3000</b>	36	2.7	≤20	0.075-0.9	1.1-3.5	22	5.6
<b>Ø 1200*2400</b>	36	3	≤25	0.075-0.6	1.5-4.8	30	12
<b>Ø 1200*3000</b>	36	3.5	≤25	0.074-0.4	1.6-5	37	12.8
<b>Ø 1200*4500</b>	32.4	5	≤25	0.074-0.4	1.6-5.8	55	13.8
<b>Ø 1500*3000</b>	29.7	7.5	≤25	0.074-0.4	2-5	75	15.6
<b>Ø 1500*4500</b>	27	11	≤25	0.074-0.4	3-6	90	21
<b>Ø 1500*5700</b>	28	12	≤25	0.074-0.4	3.5-6	130	24.7
<b>Ø 1830*3000</b>	25.4	11	≤25	0.074-0.4	4-10	130	28
<b>Ø 1830*4500</b>	25.4	15	≤25	0.074-0.4	4.5-12	155	32
<b>Ø 1830*6400</b>	24.1	21	≤25	0.074-0.4	6.5-15	210	34
<b>Ø 1830*7000</b>	24.1	23	≤25	0.074-0.4	7.5-17	245	36
<b>Ø 2100*3000</b>	23.7	15	≤25	0.074-0.4	6.5-36	210	34
<b>Ø 2100*4500</b>	23.7	24	≤25	0.074-0.4	8-43	245	42
<b>Ø 2100*7000</b>	23.7	26	≤25	0.074-0.4	8-48	280	50
<b>Ø 2200*4500</b>	21.5	27	≤25	0.074-0.4	9-45	280	48.5
<b>Ø 2200*6500</b>	21.7	35	≤25	0.074-0.4	14-26	370	52.8
<b>Ø 2200*7000</b>	21.7	35	≤25	0.074-0.4	15-28	380	54
<b>Ø 2200*7500</b>	21.7	35	≤25	0.074-0.4	15.28	380	56

## II.5. Le travail de la charge

Les boulets et la matière sont remontés par la rotation du broyeur. L'importance de la remontée dépend la forme des blindages et de la vitesse du broyeur. Elle est conçue pour remonter la charge au point de chute le plus haut de façon à avoir l'énergie maximum. Mais les

boulets doivent tomber sur l'extrémité de la charge et non sur les blindages. Cela produit des impacts importants qui brisent grossièrement la matière fraîche.



**Figure II.6 :** L'effet cataracte et cascade

Les boulets sont remontés un point de chute moins haut que l'effet de cataracte. Quand elle retombe, la charge glisse sur elle-même en roulant en culbutant à la surface. Ce phénomène crée l'attrition nécessaire pour générer des fines.

## **II.6. Caractéristique des broyeurs à boulets**

Le broyeur à boulets est un outil de broyage efficace qui est capable de broyer différents types de matériaux en poudre fine. Le broyeur à boulets écrase et broie plusieurs sortes de minerais et de roches pendant l'extraction. Il est largement utilisé dans l'industrie minière, de construction et dans l'industrie chimique.

Deux techniques de broyage qui peuvent être utilisées sont le broyage de type-sec et le broyage de type humide. Le broyeur à boulets peut être soit de type tabulaire ou de type coulant, en fonction de la forme dans laquelle le matériau est déchargé.

Le broyeur à boulets va tourner à une vitesse spécifique provoquant l'écrasement de la matière pour les transformer en poudre, par les différentes pièces du media de meulage cela peut prendre plusieurs heures. Cependant, plus le broyeur à boulets est court, plus le matériel deviendra poudre. La taille de la particule ultime dépend en grande partie de la dureté de la matière à broyer, et le temps utilisé dans le procédé de broyage.

## **II.7. Principe de fonctionnement de broyeur à boulets**

Le matériau entre en spirale et uniformément le premier entrepôt de la machine de

fraisage dans l'axe creux matériaux d'entrée périphérique matériel. Dans cet entrepôt, il y a une échelle ou ondulation scoreboard, du fait que le corps de baril tourne et puis produit force centrifuge, à cette époque, la bille d'acier est effectuée à une certaine hauteur et tombe vers le bas pour rendre le matériel lourd barre et broyées. Après avoir été broyées grossièrement dans le premier entrepôt, le matériel, puis entre dans le deuxième entrepôt pour réaffutage avec la bille d'acier et scoreboard. En fin de compte, la poudre est déchargée par le matériel de bord sortie et les produits finaux sont compète. Dans un autre cas :

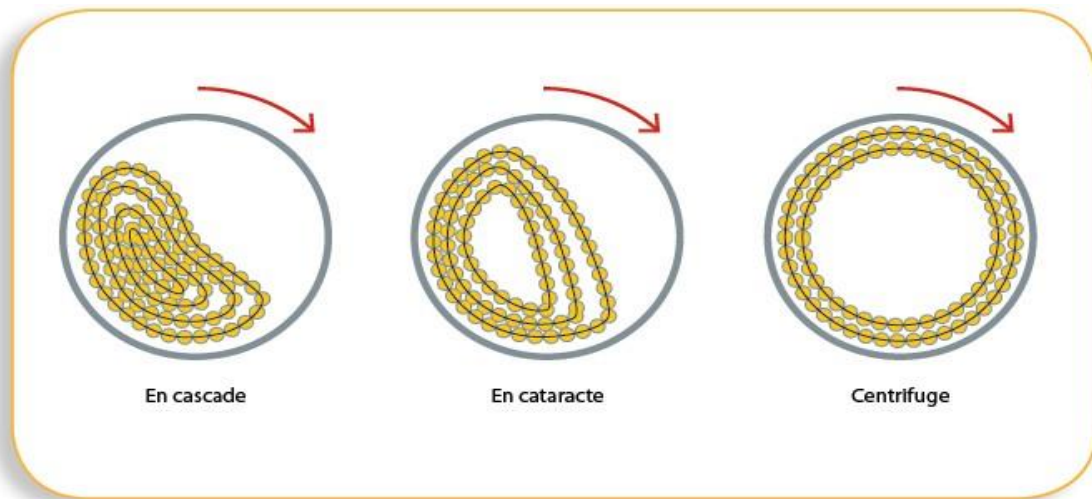
- Contrôle de la finesse qui est fonction de la durée de séjour de la matière dans l'appareil.
- La qualité des corps broyant peut-être adaptée à la matière ainsi que le revêtement.
- Souplesse d'utilisation: on peut passer rapidement d'une matière à une autre.
- Possibilités de ventilation, chauffage, refroidissement. La température de la matière peut être ainsi maintenue dans limites strictes.
- Investissement réduit : convient parfaitement pour les domaines d'utilisation ou la quantité sont relativement peu importantes .

## **II.8. Les régimes de fonctionnements**

La vitesse à laquelle le broyeur tourne est un élément déterminant du processus de Broyage. C'est ce paramètre qui va déterminer le régime de fonctionnement du broyeur. La vitesse permet de déterminer à quel moment la masse bruyante va se détacher de la Surface du cylindre pour retomber sur les granulats solides.

À vitesse réduite, le régime est dit « en cascade ». Dans ce cas, la charge bruyante a tendance à rouler jusqu'au point bas du cylindre. Il y a un phénomène d'abrasion des granulats à cause de cette charge bruyante qui « roule » tout simplement sur eux. Ce régime induit la production de particules fines. Afin d'éviter l'usure du broyeur à cause de cette même abrasion, il faut augmenter l'épaisseur du blindage, ce qui peut s'avérer coûteux. Ce régime n'est dès lors pas choisi préférentiellement.

À plus haute vitesse, le régime est dit « en cataracte ». La charge bruyante est dans ce cas projetée sur les granulats à broyer en une série de paraboles et s'écrase sur ces derniers. La fragmentation produit dès lors de plus gros grains. Cette méthode permet de réduire l'épaisseur du blindage. Ce régime est choisi préférentiellement. Lorsque la vitesse augmente encore, la charge bruyante ainsi que les granulats sont plaqués contre les parois et il n'y a plus aucune réduction de taille. Ce point correspond à la vitesse critique du système. En pratique, on choisit une vitesse entre 50 et 90 % de la vitesse critique. Ce choix est influencé par des considérations économiques.



**Figure II.7 :** Régime responsable sur l'effet cataracte et cascade

## II.9. Temps de passage

À cause de la différence de vitesse des gaz et du passage dans le broyeur [6], le temps de passage n'est pas le même dans les circuits ouverts ou fermés:

- $\geq 12$  min pour les circuits ouverts.
- $\geq 5$  min pour les circuits fermés.

## II.10. Les paramètres influençant le fonctionnement du broyeur

Il existe plusieurs paramètres qui affectent le fonctionnement des broyeurs à boulet, on distingue : *Les paramètres liés au broyeur:*

- a) - Le volume de cylindre.
- b) - La taille et la nature des éléments broyant.
- c)- Le taux de charge des boulets.
- d)- La vitesse de rotation.

*Les paramètres liés au produit à broyer:*

- a) - La nature de produit.
- b) - La taille du produit (la distribution granulométrique).
- c) - Le taux de charge dans le broyeur.
- d) - Le taux d'humidité.

## II.11. Energie de broyage

### II.11.1 Loi de Rittinger

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

$$E' = K_R f_c \left( \frac{1}{L_2} - \frac{1}{L_1} \right) \quad (1)$$

Avec  $L_1$  et  $L_2$  dimensions initiale et finale des particules,

### II.11.2 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  $R = L_1/L_2$ . Cette deuxième loi de la fragmentation s'écrit alors :

$$E' = K_K' f_c \ln \left( \frac{L_1}{L_2} \right) \quad (2)$$

### II.11.3 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 :

$$E = E_i \sqrt{\left[ \left( \frac{100}{L_2} \right) - \left( 1 - \frac{1}{q^{0.5}} \right) \right]} \quad (3)$$

Où  $q = \frac{L_1}{L_2}$  est le coefficient de réduction. Le terme de Bond  $E_i$  est appelé l'indice énergétique que l'on détermine expérimentalement.

## Chapitre III : Partie pratique

### III.1. Détermination de la vitesse de rotation

Généralement, la vitesse de rotation est déterminée expérimentalement par un certain nombre d'essais en gardant le temps de broyage, la charge et le remplissage constants. Par contre, on fait varier la vitesse de broyage.

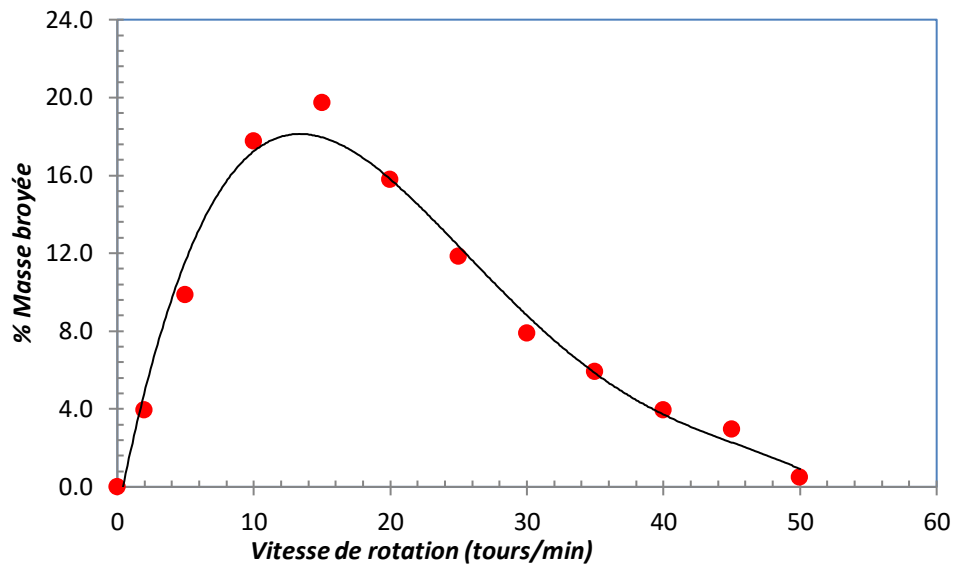
Dimensions des particules :  $0,2 \leq d < 0,3\text{mm}$

Temps de broyage : 10 minutes

Charge : 915 g de sable

**Tableau III.1. Valeurs expérimentales de broyage**

Vitesse de broyage (tr/min)	Masse broyée	% correspondant
0	0	0,000
2	20	3,941
5	60	9,852
10	90	17,734
15	120	19,704
20	145	15,764
25	160	11,823
30	140	7,882
35	100	5,911
40	50	3,941
45	20	2,956
50	10	0,493
	<b><math>\sum M_i = 915</math></b>	<b>100%</b>



**Figure III.1. Détermination de la vitesse optimale de broyage**

Dans la pratique, cette vitesse doit correspondre à 0,5 à 0,9 vitesse de rotation critique

$$\vartheta_{optimale} = (50\% \text{ à } 90\%) \vartheta_{critique}$$

$$\vartheta_{critique} = \frac{42,3}{d^{0,5}}$$

d = diamètre interne du broyeur

La vitesse critique de rotation du broyeur considéré est égale à :

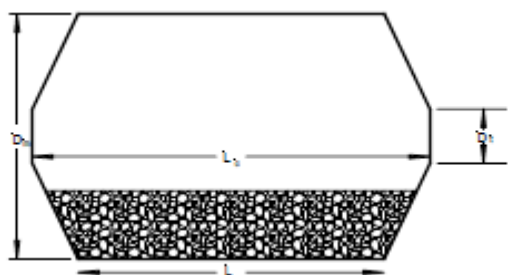
$$\vartheta_{critique} = \frac{42,3}{10^{0,5}} = 13,37 \text{ tours/min}$$

Et la vitesse optimale obtenue graphiquement par expérience est :

$$10 < \vartheta_{optimale} < 15 \text{ tours/min}$$

### III.2. Broyage et analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est l'opération consistant à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (poids, taille, ...).



**Figure III.2. Schéma simplifié d'un broyeur à boulets**

Après l'opération de broyage d'une matière granulée, on procède par tamisage afin de classer les particules obtenues selon leurs dimensions. Cette opération de tamisage est effectuée en utilisant une série de tamis superposés par ordre décroissant sur lesquels on verse la matière broyée de masse initiale  $m$ . On lance cette opération pendant 20 minutes. Puis on détermine la masse retenue par chaque tamis par pesée. Le tableau suivant résume les résultats obtenus.

**Tableau III.2. Données de départ pour l'analyse granulométrique**

Ouverture du tamis $X (mm)$	Intervalle granulométrique $\Delta X (mm)$	Masse retenue par chaque tamis $M_i (g)$
0,500	0,400-0,500	24,08
0,400	0,315-0,400	35,32
0,315	0,250-0,315	106,08
0,250	0,200-0,250	136,56
0,200	0,140-0,200	72,88
0,140	0,100-0,140	20,40
0,100	0,071-0,100	4,68

### III.3. Analyse granulométrique par tamisage

Pour la détermination des différentes caractéristiques des particules, on doit au préalable remplir en calculant la masse totale retenue par tous les tamis c'est-à-dire  $\sum M_i$  le tableau ci-dessus.

**Tableau III.3. Résultats de l'analyse granulométrique**

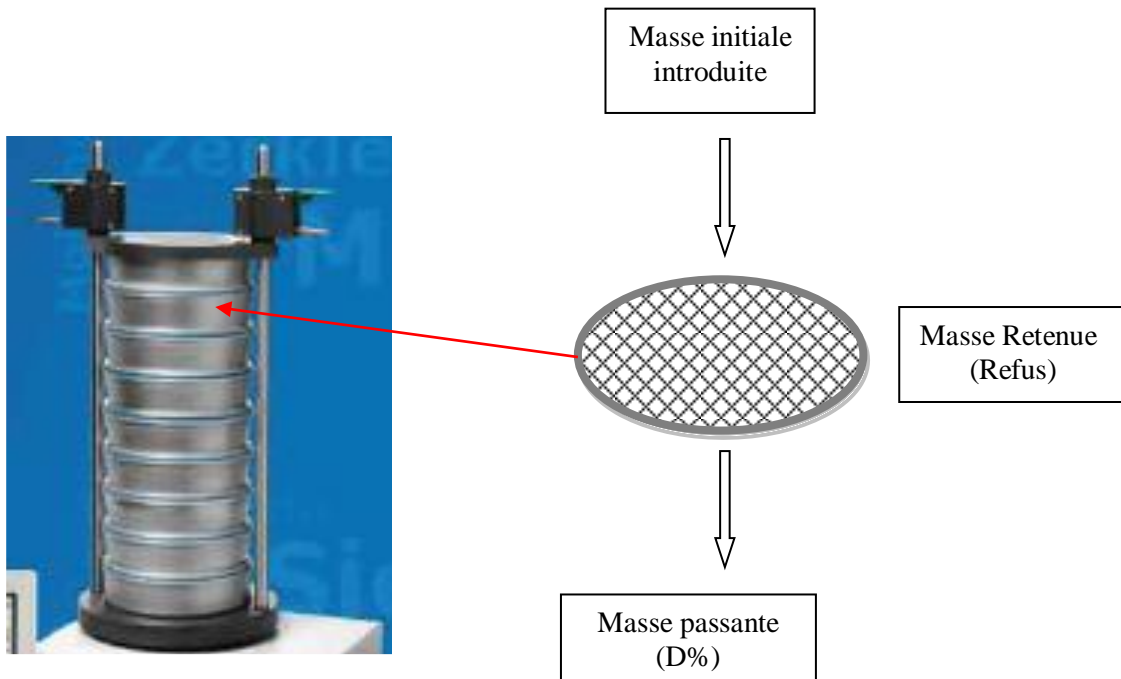
$X$ (mm)	$\Delta X$ (mm)	$M_i$ (g)	$R$ (%)	$R_{cumulé}$ (%)	$D_{cumulé}$ (%)	$M_i / \Delta X$
0,500	0,400-0,500	24,08	6,02	6,02	93,98	240,80
0,400	0,315-0,400	35,32	8,83	14,85	85,15	415,53
0,315	0,250-0,315	106,08	26,52	41,37	58,63	1632,00
0,250	0,200-0,250	136,56	34,14	75,51	24,49	2731,60
0,200	0,140-0,200	72,88	18,22	93,73	6,27	1214,67
0,140	0,100-0,140	20,40	5,10	98,83	1,17	510,00
0,100	0,071-0,100	4,68	1,17	100,00	00,00	161,38
		$\Sigma M_i = 400$ g				

$M_i$  : Masse retenue par chaque tamis (g)

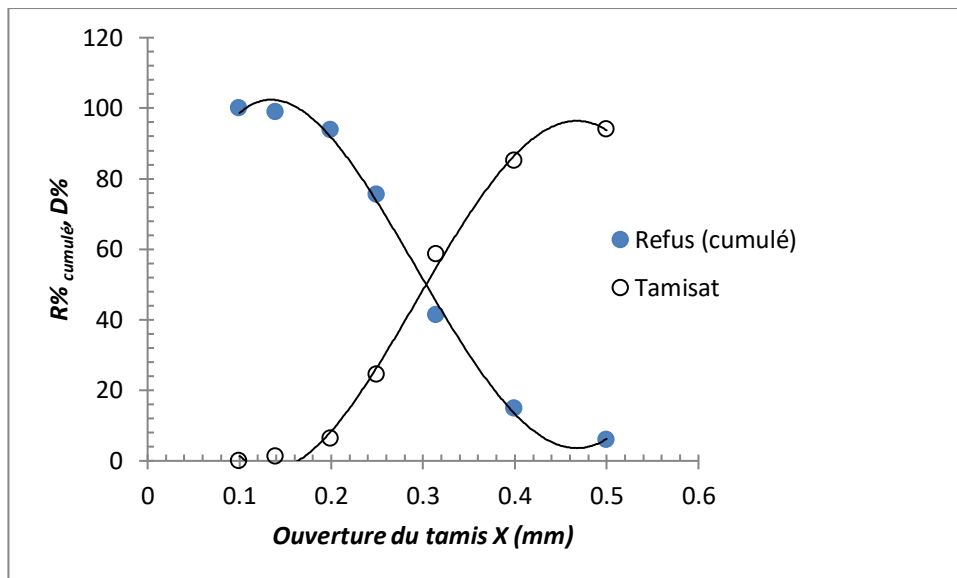
$R\%$  : le % correspondant à la masse  $M_i$

$R\%$  *cumulé* : Cumulé de la masse retenue

$D\%$  : Cumulé de passage



**Figure III.3. Batterie de tamis pour séparation**



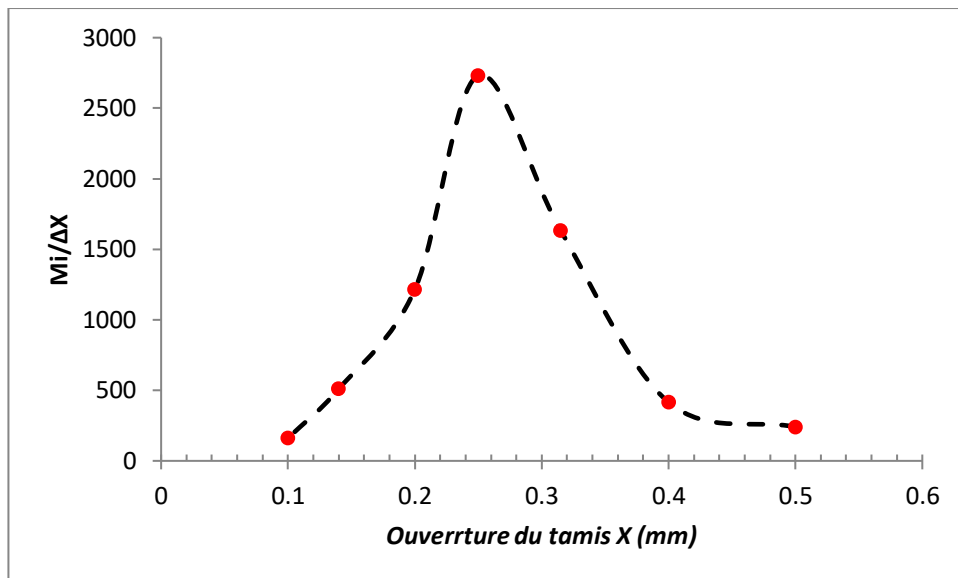
**Figure III.4. : Courbe de répartition granulométrique (méthode I)**

Selon le bilan massique autour d'un tamis (Figure III.3), on peut facilement calculer les masses retenue et passée par la pesée et leurs pourcentages (%) correspondants via la masse totale ( $\sum M_i$ ).

$$\mathbf{R\% \text{ cumulé} + D\% = 100 \%}$$

Graphiquement, la maille de partage avec un diamètre variant entre un diamètre de 0,250 et 0,315 mm et un pourcentage correspondant d'environ 50-54%.

Puisque les intervalles granulométriques ( $\Delta X$ ) ne sont pas identiques, les résultats obtenus par la méthode précédente englobent des erreurs dues à ces intervalles granulométriques. Donc, on a recours à une autre méthode qui tiendra compte de ces intervalles granulométriques afin de minimiser les erreurs pour de résultats satisfaisants, c'est-à-dire le tracé de ( $\Delta X$ ) en fonction de ( $X$ )



**Figure III.4. : Courbe de répartition granulométrique (méthode II)**

D'après cette 2eme méthode, le diamètre correspondant à la maille de partage est égal à 0,265mm comparé à celui obtenu par la 1ere méthode qui est de 0,3 mm

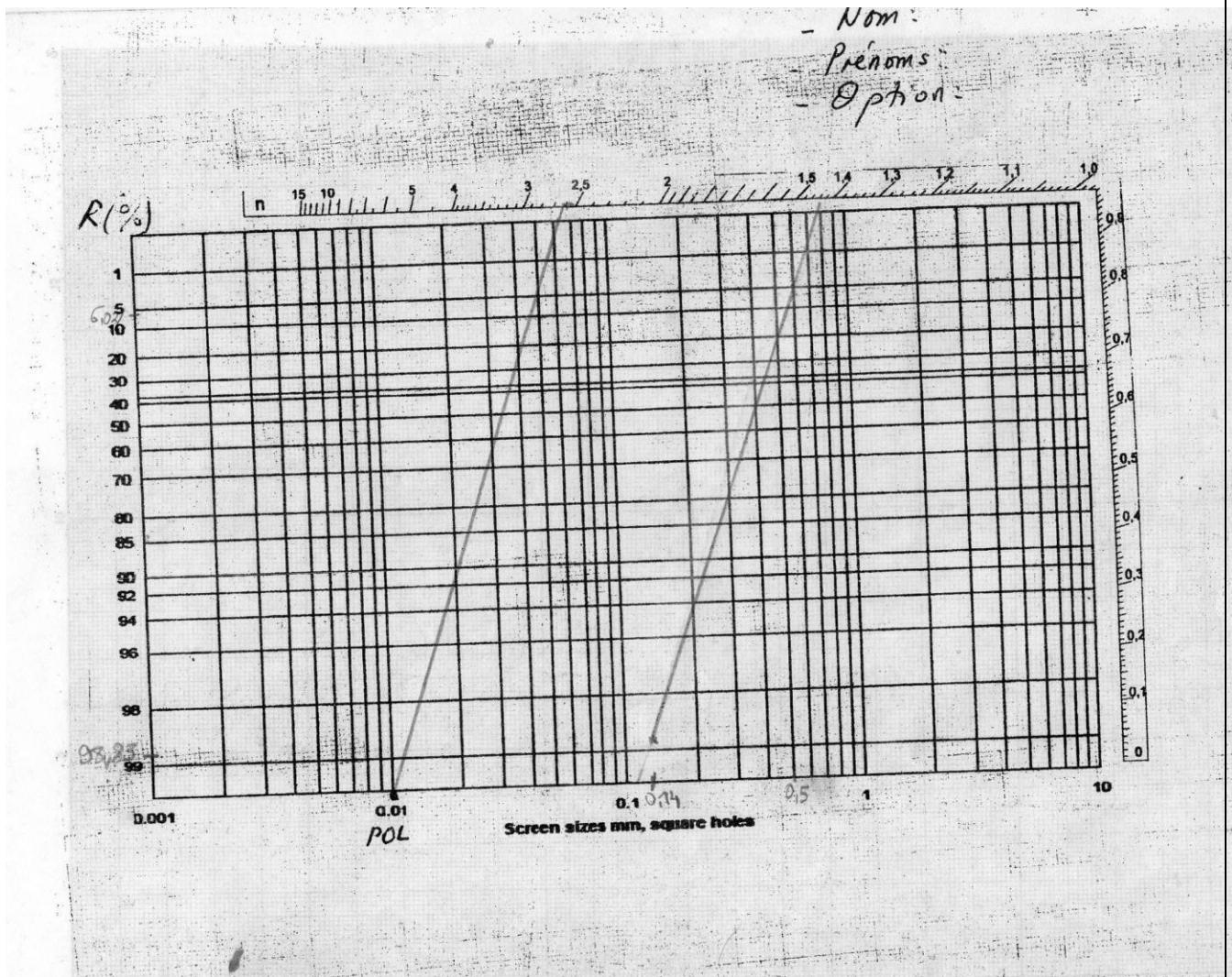
#### III.4. Analyse granulométrique en utilisant la méthode de RRSB

C'est la méthode la plus utilisée pour caractériser une matière solide obtenue par un procédé de broyage. Cette méthode développée par **Rosin-Rammler-Sperling-Bennett**, exprime la relation directe entre le  $R_{cumulé}$  (%) et  $d$

$$R \% = \exp \left[ - \left( \frac{d}{\bar{d}} \right)^n \right]$$

Après linéarisation et en traçant la courbe  $\ln (\ln (100/R_{cum} \%))$  en fonction de  $(\ln d)$ , nous obtenons une droite de pente  $n$  et la valeur de  $\bar{d}$  est déterminé à l'intersection de la droite avec l'horizontale portée dans le diagramme RRSB avec une valeur de 36,8 portée sur l'axe de  $\ln R_{cum} \%$ . Comme l'indique la figure ci-dessous.

Le terme de Bond  $E_i$  est appelé l'indice énergétique que l'on détermine expérimentalement



A partir de ce diagramme on a :

L'indice d'homogénéité  $n = 2.7$

Diamètre équivalent moyen  $\bar{d} = 0.5$

## Conclusion

Le broyage est une opération de mise en forme des solides, elle vise à diminuer et à maîtriser la granularité des solides.

C'est une opération d'une grande importance et largement utilisée dans le domaine industriel et particulièrement dans les domaines métallurgiques, chimiques, pharmaceutiques, agroalimentaire, etc.

Son but est de faciliter les étapes ultérieures du traitement des produits.

Ce procédé présente des applications vastes et variées.

Il s'effectue dans des appareils de fraction classée suivant les propriétés des matériaux utilisés.

Le choix du type de broyeur dépend des propriétés des matériaux à broyer telles que l'abrasivité, la dureté, la granulométrie du départ, etc.

Ce projet étant écourté à cause de la pandémie nous a au moins permis d'avoir une idée générale sur les procédés de fragmentation particulièrement le broyage

## Bibliographie

- [1] Cours : *Milieux Poreux et Dispersés* (MPD) Master I, Génie des procédés
- [2] [http://www.azprocede.fr/Cours\\_GC/fragmentation\\_introduction.htm](http://www.azprocede.fr/Cours_GC/fragmentation_introduction.htm)
- [3] <https://www.ceecthefuture.org/resources/ball-mill-media-optimization-through-functional-performance-modeling>
- [4] S.K. Tripathy, Y.R. Murthy, V. Singh, A. Srinivasulu, A. Ranjan†, and P.K. Satija. Performance optimization of an industrial ball mill for chromite processing. *Journal of Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. Volume 117, pp 75-81 (2017).
- [5] EDWARDS, G.R., EVANS, T.M., ROBERTSON, S.D., and SUMMERS, C.W. 1980. Assessment of the standard method of test for the grindability of coal by the Hardgrove machine. *Fuel*, vol. 59, no. 12, pp. 826–830.
- [6] BOND, F. 1961. Crushing and grinding calculations. *British Chemical Engineering*, volume 6. pp. 543–548.