

Technologie des Broyeurs à boulets de cimenterie (Broyage du ciment)

Marc Piccinin
Grinding Process Engineer
The Cement Grinding Office

Technologie des Broyeurs à Boulets

Introduction

Je m'appelle l'Ingénieur de broyage.

J'ai acquis mon diplôme d'ingénieur un peu par hasard.

Quand on ne sait pas si on est plus littéraire ou plus scientifique, cela complique évidemment les choses lorsqu'il faut choisir ses études.

Ce fut donc sans beaucoup d'enthousiasme que je commençais et terminais ce cycle de 4 ans.

Et avec brio puisque je fus le 1er de ma promotion.

Néanmoins, mes premières expériences dans le milieu industriel me confortèrent dans l'idée que ce n'était pas vraiment ce que je cherchais dans la vie.

Et puis un jour, je vis une petite annonce d'emploi dans un journal à grand tirage qui m'intéressa.

On y parlait de broyage du ciment, de voyages courts mais fréquents.

Je n'avais aucune idée de la fabrication du ciment à cette époque-là, mais cela piqua ma curiosité et je répondis prestement à cette annonce.

Après plusieurs étapes que je franchis plus ou moins bien, je restais en lice avec deux autres personnes pour le poste, que je perdis puis que je regagnai lors d'un ultime entretien.

Me voilà donc entré dans le monde du broyage non seulement du ciment, mais aussi des mines.

La société pour laquelle je travaillais maintenant, bien qu'étant mondialement réputée pour ses compétences en matière de broyage, n'était pas réellement organisée pour la formation de ses nouveaux employés.

Très peu d'écrits structurés étaient à disposition, mais plutôt un ensemble de textes et calculs hétéroclites qu'il fallait digérer en peu de temps.

Le reste de la formation étant basée sur des études de broyeurs avec correction par les Ingénieurs les plus expérimentés.

Et très vite, je vécus ma première expérience sur site.

C'était un mois de janvier, près d'Amman, la plus grande cimenterie de Jordanie.

Il faisait assez froid et il avait même neigé la veille.

J'entrais dans le broyeur par le tourillon de l'alimentation.

C'était impressionnant.

Un broyeur de diamètre 5,2 m !

Le broyeur était vidé de sa charge broyante parce que le personnel de maintenance devait enlever les grilles de la cloison intermédiaire.

Le châssis de la cloison présentait, en effet, des défauts structurels, et je devais contrôler cela en détail.

C'était le but de ma visite et on m'avait envoyé, moi le débutant, parce que personne n'était chaud pour réaliser ce job.

Et c'est ainsi que j'acquis de l'expérience, comme cette fois-là où on m'envoya tenter de résoudre un problème dans un broyeur en circuit ouvert en Angleterre.

Puis après, je pris en charge tout le Moyen-Orient.

Je retiens beaucoup de souvenirs épiques de cette période lorsque je voyageais dans cette région.

Comme par exemple, la visite d'un grand broyeur à décharge centrale en Iran.

Nous n'étions pas moins de 10 personnes dans la chambre de séchage du broyeur à cru lorsque quelqu'un actionna le moteur auxiliaire.

Mouvement de panique, tout le monde voulut sortir par la porte de la chambre en même temps.

Heureusement, cette porte était haute et au niveau du sol.

Personne ne fut blessé excepté mon collègue qui se blessa légèrement au bras.

Quelques années passèrent, je maîtrisais de plus en plus mon sujet et prenais du plaisir.

Un beau jour, quelqu'un me proposa de travailler pour lui.

Il s'agissait d'un entrepreneur voulant investir dans une station de broyage.

C'est vrai qu'à l'époque, la région où il voulait installer son usine était très mal desservie et les autorités locales venaient de poser la première pierre d'une zone d'activité prévue pour un usage industriel.

Mon nouveau boulot était tout simplement directeur des Opérations.

Technologie des Broyeurs à Boulets

Lorsque je commençais, divers équipements étaient déjà installés comme les silos pour le clinker et le gypse, le silo à ciment et les bandes transporteuses.

Il manquait le broyeur à boulets pour produire un ciment Portland de type CEM I 32,5 avec 95% de ciment et 5% de gypse.

Le clinker devait provenir principalement d'une cimenterie située à 120 km.

Là, ce clinker était produit dans un four du type Lepol.

Cela signifiait, à mes yeux, que la granulométrie serait très stable dans le temps avec une majorité de grains compris entre 9 et 10 mm.

Il était également reconnu que la broyabilité et la dureté du clinker du système Lepol étaient très favorables pour le broyage en circuit ouvert.

En fonction de ces données, je calculai la dimension du broyeur dont on avait besoin pour produire 50 t/h de ciment à 3200 Blaine avec 3% de résidus sur 90 μ m et 80% de passants sur 40 μ m.

La formule de Bond que j'usais généralement me donna une énergie nécessaire de 35,83 kWh/t.

Cette énergie spécifique multipliée par la production (35,83 x 50) donnait donc une puissance absorbée nécessaire de 1800kW.

Comme le projet envisageait un circuit ouvert, je cherchais un broyeur ayant un rapport L/D égal à 3,5.

Le broyeur d'occasion finalement sélectionné avait un diamètre de 3,5m pour une longueur totale de 11,375m et une puissance installée de 2000kW.

Le rapport L/D était légèrement inférieur à la valeur optimale, mais l'objectif de finesse du ciment n'étant pas si élevé, je ne fus pas préoccupé.

Le broyeur à ciment était équipé d'un blindage releveur en chambre 1, d'une cloison intermédiaire simple et d'un blindage non-classant en chambre 2.

L'étape suivante consista à remplir le broyeur avec une charge adaptée.

Et enfin, je choisis un filtre à manches et son ventilateur pour assurer la ventilation du broyeur.

Les premières semaines de fonctionnement de la nouvelle station de broyage se déroulèrent sans problèmes majeurs.

Cependant, la production n'était que d'environ 46 t/h.

Certains ajustements furent alors décidés pour atteindre l'objectif prévu.

Premièrement, on augmenta le degré de remplissage dans les deux compartiments.

Ensuite, et après des tests de résistance, on décida de produire à une finesse un peu moins élevée.

La production se stabilisa à 49 t/h.

Quelques mois passèrent et le débit de l'installation commença à diminuer jusqu'à 44 t/h.

Après une visite dans le broyeur et quelques prélèvements de matière, il apparut qu'une pollution d'imbroyés avait réduit drastiquement le rendement de broyage.

Nous étions certains que la situation ne pouvait que s'aggraver.

La cimenterie qui fournissait le clinker confirma que les propriétés minéralogiques avaient été modifiées après quelques travaux effectués autour du four.

Il fut donc décidé d'organiser une réunion avec quelques fournisseurs pour trouver la meilleure solution pour améliorer le rendement de l'installation.

Après un calcul précis du retour sur investissement, la solution de remplacer tous les équipements internes du broyeur fut prise.

Suite à cet investissement, la production atteignit 50 t/h à la bonne finesse.

Après quelques années d'exploitation sans problèmes majeurs, je comparai les performances de notre unité de broyage avec celles des cimenteries de la région et constatai que la production de ciment en circuit ouvert était devenue peu à peu obsolète.

Un nouvel investissement s'imposait donc, c'est-à-dire fermer le circuit avec un de ces nouveaux séparateurs dynamiques, également appelés turboséparateurs.

Modifiant également la charge broyante du broyeur et augmentant la ventilation, le nouveau débit de l'installation atteignit 57 t/h, soit une amélioration de 14%.

En plus, la qualité du produit fini était meilleure.

Un jour, compte tenu de la demande du marché, la société proposa de nouveaux produits à ses clients, deux types de ciment OPC de type I 42,5 et 52,5.

Technologie des Broyeurs à Boulets

Je fus cependant déçu par les performances de l'installation, et le séparateur de 1ère génération était suspecté d'être le responsable de cette importante énergie consommée.

En effet, lors de la production du ciment le plus fin à 4900 Blaine, les données du débitmètre à impact dans la salle de contrôle montraient un facteur de circulation énorme, entre 6 et 8.

Puisqu'il existait un nouveau type de séparateur sur le marché, appelé également séparateur à haut rendement, nous remplaçâmes le nôtre.

Avec un gain de 10% sur le ciment le plus grossier et des gains de 15 et 20% sur les ciments plus fins.

Le retour sur investissement fut rapide, 15 mois!

Le pôle industriel développé quelques années plus tôt avait eu un tel succès qu'il entraîna une nouvelle pénurie de matériaux de construction.

Entre autres, la demande de ciment augmentait donc de manière exponentielle pour satisfaire les besoins en logements résidentiels.

Le propriétaire de notre station de broyage me demanda un ultime effort afin de suivre la demande.

Mis au pied du mur, je lui proposai la solution radicale du pré broyage semi-intégral.

Solution coûteuse mais avec la certitude d'engranger une augmentation de production significative.

Une installation avec presse à rouleaux en circuit fermé sur un séparateur à haut rendement fut approuvée par mon patron.

Les travaux de réalisation n'empêchèrent pas le broyeur de produire du ciment, excepté une mise à l'arrêt de deux semaines pour le modifier en monochambre.

Le résultat de cette ultime opération fut à la hauteur des espérances.

Si la puissance absorbée totale de l'installation avait augmenté de 28%, les débits pour les trois types de ciments CEM I 32,5, CEM I 42,5 et CEM I 52,5 augmentèrent de 76% en moyenne.

Ma mission était remplie.

Ceci est l'histoire de l'Ingénieur de broyage.

Cette histoire est inspirée d'un mélange de faits réels et de fiction.

Si je l'ai racontée, c'est parce qu'avec la révolution industrielle et le développement dans la grande majorité des pays du monde, l'industrie du ciment est devenue un gros consommateur d'énergie.

La production mondiale de ciment était d'environ 4,1 milliards de tonnes en 2016.

Compte tenu d'une consommation moyenne de 110 kWh pour produire 1 tonne de ciment, la consommation d'électricité est d'environ 451 milliards de kWh!

La part du broyage représente 65% de la consommation totale (23% pour le broyage de la farine crue et 42% pour le broyage du clinker ou de la finition).

Le parc mondial des broyeurs se divise en quatre types, les broyeurs à boulets, les broyeurs verticaux, les presses à rouleaux et les broyeurs horizontaux.

L'efficacité de broyage de ces machines est très faible et la plus grande partie de l'énergie fournie par la puissance absorbée est perdue en chaleur, en vibrations, en usure par friction ou en bruit.

Le broyeur à boulets est le moins efficace de tous, mais est toujours l'équipement le plus répandu dans le monde, en dépit de l'émergence de dispositifs plus efficaces comme le broyeur vertical.

Et il est aussi communément admis qu'il existe encore un fort potentiel d'améliorations possibles concernant les broyeurs à boulets.

L'histoire de l'Ingénieur de broyage est une histoire peut-être banale, mais pour la concrétiser, il faut lire ce qui va suivre.

Bonne lecture dans le monde du broyage!

Chapitre 1

Comminution

1. Introduction

- La réduction de la taille des particules, ou broyage est une étape importante dans de nombreuses opérations technologiques.
- Dans l'industrie du ciment, le broyage du clinker et de la matière première est le processus qui requiert le plus fort pourcentage d'énergie.
- Par conséquent, ces coûts d'énergie élevés nous poussent à optimiser les procédés industriels, et parmi eux les procédés de broyage.
- Diverses méthodes pour étudier les procédés de broyage et pour connaître l'énergie nécessaire ont été développées (comme l'indice de travail par exemple).
- Toutes ces méthodes proviennent des lois de la comminution.

2. Définition de la comminution

- La fragmentation ou le broyage est l'action de séparer un matériau donné en plusieurs parties ou de diminuer sa taille.

Cela concerne donc la réduction d'un ou de plusieurs corps en fragments de dimension préalablement établie, ou à la réduction d'un ensemble solide, déjà fragmenté en éléments encore plus petits.

- Les objectifs de la fragmentation sont principalement les suivants:

- * Génération d'une certaine taille de particules ou d'une distribution granulométrique définie

Exemples: ciment, teintes, pigments, matières filler, matières plastiques, papier, cosmétiques, aliments

- * Accroissement de la surface spécifique afin de permettre, d'améliorer respectivement les réactions chimiques et physiques

Exemples: dissolution et fusion des solides, extraction de la phase solide, le durcissement des liants, transport et combustion de matières solides, réaction hétérogène

- * Décomposition de matières solides hétérogènes pour une séparation ultérieure

Exemples: concentration de minerais, la flottation, traitement des déchets

- Le résultat du broyage est mesuré par le rapport de réduction:

$$R_r = \frac{F_{80}}{P_{80}}$$

Où:

R_r est le rapport de réduction

F₈₀ est la dimension de l'alimentation ayant 80% de passants

P₈₀ est la dimension du produit fini ayant 80% de passants

- Classement en fonction de la dureté de la matière:

Comminution difficile	Comminution moyenne	Comminution facile
basalte	calcaire	lignite
minerai dur	charbon	sel
galets	gypse	craie
quartzite	potasse	plastique
laitier		maïs
clinker		épices

... La suite dans le livre complet

Chapitre 2

Les lois de la comminution

Les lois de la comminution sont au nombre de trois.

1. Première loi - RITTINGER (1867)

- Selon cette loi, la nouvelle surface obtenue par concassage ou broyage est directement proportionnelle au travail utile consommé, c'est-à-dire que le travail de fragmentation est proportionnel à la somme des nouvelles surfaces produites.

- Mathématiquement, elle est exprimée par la relation suivante:

$$W = K \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) = K(S_f - S_i)$$

Où:

W est l'énergie consommée,

d est la dimension des particules du produit,

D est la dimension des particules de l'alimentation,

S_i la surface initiale,

S_f est la surface finale,

et K est un coefficient

- Le coefficient K dépend de la forme de la particule, le type de matériau, le nombre de défauts et de l'efficacité des forces appliquées pour le travail de broyage.

- Cette loi s'applique uniquement à la fragmentation des particules fines (<100μ).

2. Deuxième loi - KICK (1885)

- Cette loi dit que l'énergie nécessaire est directement proportionnelle à la réduction de volume entre les particules avant et après l'opération de fragmentation (concassage), c'est-à-dire proportionnelle à la variation de volume des particules.

- Mathématiquement, elle est exprimée par la relation suivante:

$$W = K \cdot \log \left(\frac{D_{80}}{d_{80}} \right)$$

Où:

W est l'énergie consommée,

d₈₀ est la dimension à 80% de passants du produit,

D₈₀ est la dimension à 80% de passants de l'alimentation

et K est un coefficient

- Cette loi ne s'applique que pour le concassage, c'est-à-dire pour une fragmentation grossière (> 10 cm).

... La suite dans le livre complet

Chapitre 3

Types de broyeurs à boulets

1. Introduction

- Ce chapitre a l'intention de décrire les différents types de tubes broyeurs rencontrés dans l'industrie.
- Nous ne parlerons pas de vieux broyeurs comme les moulins coniques.
- Différents types de classification sont possibles.
- Par exemple, nous pouvons effectuer un premier tri des différents types de moulins par type de corps de broyage utilisé:
 - * Broyeurs à barres
 - * Broyeurs à boulets
 - * Broyeurs SAG
 - * Broyeurs AG
 - * Broyeurs à galets
- On peut classer aussi selon les broyeurs fonctionnant en mode discontinu (de laboratoire) ou en mode continu (industrie du ciment, exploitation minière, des pigments, industrie alimentaire, etc...).
- Dans cette présentation, nous devons d'abord diviser en deux procédés:
 - * Voie humide
 - * Voie sèche

2. Tubes broyeurs en voie humide

- Le procédé par voie humide est le procédé où le broyage est effectué avec un matériau formant une pâte avec addition d'eau (30% minimum).
- Broyeurs présentés dans ce chapitre:
 - * Broyeurs à barres
 - * Broyeurs AG
 - * Broyeurs SAG
 - * Broyeurs à galets
 - * Broyeurs à boulets

2.1 Broyeurs à barres:

- Les broyeurs à barres sont généralement utilisés comme première étape de broyage après le concassage dans l'industrie minière.
- Avec la croissance de l'AG, broyeur semi-autogène (avec des capacités beaucoup plus élevées), la technologie du broyeur à barres est presque tombée en désuétude.
- Leur utilisation est alors généralement limitée à des cas spéciaux tels que:
 - * Une taille très grossière de produit est nécessaire
 - * Le surbroyage doit être minimisé
 - * Le minerai est très difficile
- NB: Notez que les broyeurs à barres peuvent être utilisés dans le procédé sec pour broyer le coke ou le minerai de fer.
- Différents dispositifs de décharge sont possibles:
 - * Décharge par overflow
 - * Décharge périphérique en sortie
 - * Décharge périphérique centrale

... La suite dans le livre complet

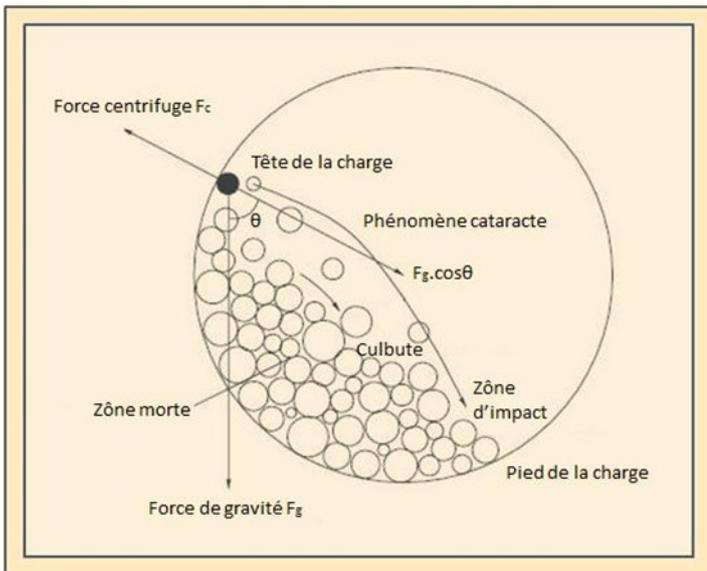
Chapitre 4

Vitesse de rotation

- La vitesse de rotation est souvent exprimée en pourcentage de la vitesse critique.
- Nous verrons ci-dessous comment calculer la vitesse critique du broyeur.
- En deux mots, la vitesse critique est définie comme étant la vitesse de rotation où les forces centrifuges égalent les forces de gravité à la paroi de la virole du broyeur.
- À ce stade-là, les boulets ne tombent plus et restent collés à la virole.

1. Calcul:

- Schéma général:



- Le boulet de broyage est soumis à deux forces:
 - * La force centrifuge: F_c
 - * Force de gravité: F_g
- La force centrifuge est donnée par la formule suivante:

$$F_c = m\omega^2 \frac{D_i}{2}$$

- Où:
- m est la masse du boulet,
 - ω est la vitesse angulaire,
 - et D_i est le diamètre interne du broyeur
- La force gravitationnelle est donnée par la formule suivante:

$$F_g = mg$$

... La suite dans le livre complet

Chapitre 5

Équipements internes des broyeurs à boulets

1. Introduction

- Les équipements internes d'un broyeur à boulets peuvent être divisés en quatre catégories:

- * Revêtements d'entrée
- * Revêtements de virole (blindages)
- * Cloisons de séparation
- * Corps broyants

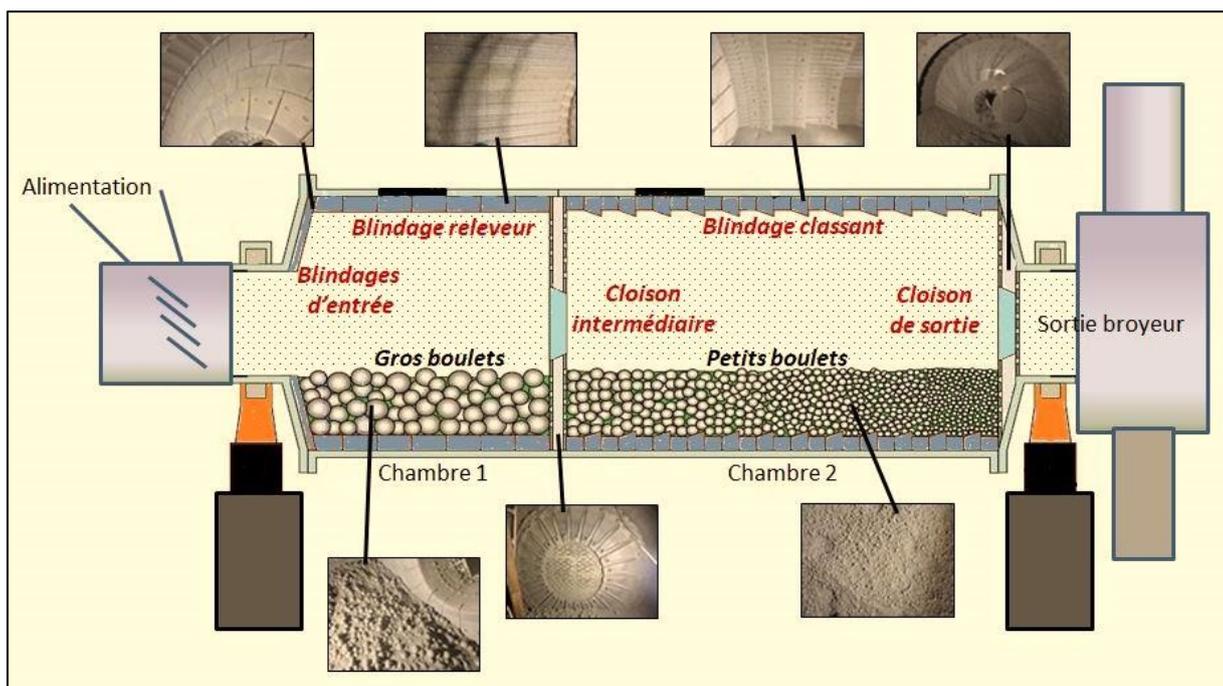
- Cette dernière catégorie est différente des trois premières et sera abordée au chapitre suivant.

- Les trois premières catégories sont conçues et fabriquées pour:

- * Protéger la virole du broyeur
- * Avoir la meilleure espérance de vie
- * Minimiser les coûts d'exploitation
- * Améliorer la consommation spécifique d'énergie du broyeur
- * Permettre une augmentation de la production

- Chaque catégorie sera détaillée dans les sous-chapitres suivants.

- Croquis des équipements internes du broyeur:



... La suite dans le livre complet

Chapitre 6

Corps broyants

1. Introduction

- Les corps broyants sont un élément très important des équipements internes des broyeurs, non seulement au point de vue du rendement, mais aussi d'un point de vue de l'usure.
- En règle générale, la charge en boulets de broyage consiste en boulets de différentes tailles et de différentes qualités de matériaux.
- Pour le compartiment de broyage grossier (chambre 1), des boulets entre 100 et 60mm sont utilisés.
- Pour la finition (chambre 2), des boulets entre 60 et 15 mm sont normalement utilisés.
- La composition de la charge de boulets dépend de divers facteurs tels que:
 - * Diamètre du broyeur
 - * Longueur du broyeur
 - * Ratio L/D
 - * La vitesse du broyeur
 - * Types de revêtements
 - * Type de circuit du broyeur
 - * Type de séparateur
 - * Broyabilité de la matière (clinker...etc)
 - * La granulométrie de la matière
 - * Dureté de la matière
 - * Finesse du produit
- En ce qui concerne la qualité du boulet, cela dépend de:
 - * Les forces d'impact dans la première chambre
 - * Les forces de frottement entre les boulets et blindages
 - * L'abrasivité des matériaux
 - * La corrosion, en particulier en milieu humide



2. Composition des charges broyantes

- Cela sera détaillé au chapitre 25.

3. Qualité des charges broyantes

- Trois types de boulets existent sur le marché:
 - * Boulets forgés
 - * Boulets coulés
 - * Boulets coulés à haute teneur en chrome

... La suite dans le livre complet

Chapitre 7

Spécifications générales pour un broyeur 2 chambres à ciment

1. Introduction

- Les broyeurs à deux chambres sont les plus utilisés dans l'industrie cimentière.
- Ils constituent probablement plus que 95% du parc mondial des broyeurs à boulets.
- Ce chapitre va donc définir comment équiper un broyeur 2 chambres.
- A cette fin, une bonne expertise est indispensable.
- Ce que nous devons savoir pour étudier un broyeur à ciment:
 - * Théorie
 - * Choses pratiques
 - * Conseils
 - * Outils
 - * Logiciel de rectification

2. Remarques préliminaires

- Les broyeurs à ciment peuvent avoir:
 - * 1 chambre
 - * 2 chambres
 - * 3 chambres
 - * Et plus
- Les broyeurs à ciment peuvent être en:
 - * Circuit ouvert
 - * Circuit fermé
- Dans ce chapitre, nous allons développer les broyeurs à ciment avec 2 chambres en circuit fermé

... La suite dans le livre complet

Chapitre 8

Méthode de dimensionnement d'un broyeur à ciment

1. Introduction

- La méthode de Bond est utilisée pour dimensionner un broyeur à boulets de cimenterie.
- Des facteurs de correction d'efficacité sont appliqués à la formule de Bond.
- La méthode est valable à la fois pour le broyage du clinker et les matières crues.
- Cette méthode ne donne qu'une idée approximative et initiale pour le dimensionnement d'un broyeur à ciment.
- Pour aller de l'avant, une étude plus approfondie est nécessaire avec les fournisseurs de broyeurs ou un bureau d'études spécialisé.

2. Formule de Bond et facteurs de correction

2.1. Formule de Bond:

- La formule de Bond bien connue est la suivante:

$$E = 10 \times W_i \times C \times \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)$$

Avec:

E = énergie spécifique en kWh/t

W_i = indice de travail en kWh/t

C = facteur de correction

P_{80} = tamis qui a 80% de passants dans le produit fini

F_{80} = tamis qui a 80% de passants dans l'alimentation

- Les facteurs de correction d'efficacité sont donnés par l'équation suivante:

$$C = C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4 \times C_5 \times C_6$$

Avec:

C_1 est une correction pour le broyage en voie sèche,

C_2 est une correction pour circuit ouvert

C_3 est une correction pour le diamètre de broyeur,

C_4 est une correction pour la dimension de l'alimentation,

C_5 est une correction pour le produit fini.

C_6 est une correction pour les séparateurs à haut rendement.

2.2. Facteurs de correction:

2.2.1. Définition de C_1 :

$$C_1 = 1,3 \text{ si circuit en voie sèche et } 1 \text{ si circuit en voie humide}$$

... La suite dans le livre complet

Chapitre 9

Dimensions du broyeur en fonction du débit

1. Le tableau général

- Le tableau ci-dessous donne la production en t/h pour un broyeur à ciment en fonction de:

* L'objectif de finesse du ciment en Blaine

* Les dimensions générales du broyeur

- Les hypothèses suivantes sont utilisées:

* Broyeur en circuit fermé

* Séparateur de troisième génération

* Rapport Longueur/Diamètre du broyeur autour de 3,2

* Vitesse de rotation du broyeur autour de 73% de la vitesse critique

* Degré de remplissage des deux chambres autour de 31%

- Les puissances spécifiques utilisées sont:

* 3000 Blaine: 28 kWh/t

* 3500 Blaine: 35,8 kWh/t

* 4000 Blaine: 44,4 kWh/t

* 4500 Blaine: 53,6 kWh/t

- La longueur de la chambre 1 est définie pour les ciments les plus grossiers, ici 3000 jusqu'à 3500 Blaine.

Broyeur			Chambre 1			Chambre 2			Broyeur		Capacité selon la finesse			
Diamètre	Longueur totale	Vitesse	Longueur	Boulets	Puissance	Longueur	Boulets	Puissance	Total boulets	Puissance totale	3000 Blaine	3500 Blaine	4000 Blaine	4500 Blaine
<i>m</i>	<i>m</i>	<i>rpm</i>	<i>m</i>	<i>t</i>	<i>kW</i>	<i>m</i>	<i>t</i>	<i>kW</i>	<i>t</i>	<i>kW</i>	<i>t/h</i>	<i>t/h</i>	<i>t/h</i>	<i>t/h</i>
2,4	7,95	20,5	2,5	14	151	4,75	28	296	42	446	16	12	10	8
2,6	8,7	19,7	2,75	19	203	5,25	36	401	55	604	22	17	14	11
2,8	9,2	19,0	2,75	22	244	5,75	46	526	68	770	27	21	17	14
3	9,7	18,3	3	27	316	6	56	654	83	970	35	27	22	18
3,2	10,45	17,7	3,25	34	403	6,5	69	833	103	1237	44	35	28	23
3,4	10,95	17,2	3,5	41	506	6,75	81	1008	123	1513	54	42	34	28
3,6	11,7	16,7	3,75	49	616	7	94	1189	144	1805	64	50	41	34
3,8	12,45	16,3	3,75	55	706	7,75	117	1507	172	2213	79	62	50	41
4	12,95	15,9	4	66	856	8	134	1769	200	2625	94	73	59	49
4,2	13,45	15,5	4,25	76	1013	8,25	152	2032	228	3045	109	85	69	57
4,4	14,2	15,1	4,5	89	1205	8,75	177	2421	266	3626	130	101	82	68
4,6	14,7	14,8	4,75	103	1421	9	200	2783	303	4204	150	117	95	78
4,8	15,45	14,5	4,75	112	1568	9,75	235	3326	347	4894	175	137	110	91
5	16	14,2	5	128	1828	10	263	3778	391	5605	200	156	126	105
5,2	16,75	13,9	5,25	146	2111	10,5	299	4363	445	6474	231	181	146	121
5,4	17,25	13,7	5,5	166	2430	10,75	331	4907	496	7337	262	205	165	137
5,6	17,75	13,4	5,75	187	2780	11	365	5496	551	8277	296	231	187	155
5,8	18,5	13,2	5,75	200	3020	11,75	418	6378	618	9398	336	262	212	175

... La suite dans le livre complet

Chapitre 10

Inspection du broyeur à boulets

1. Introduction

- Ce document est destiné à aider le personnel des cimenteries.
- D'un point de vue technique, l'inspection d'une installation de broyage est uniquement représentative si le circuit de broyage est dans un état de marche stable et produit un type de ciment bien représentatif.
- Quand ces conditions sont remplies, l'ensemble de l'installation doit être arrêtée en crash-stop.
- Cela veut dire que l'ensemble des équipements doivent arrêter au même moment.
- Avant de travailler autour et dans le broyeur à boulets, toutes les procédures de sécurité doivent être effectuées et vérifiées par le personnel concerné par la visite de l'installation.
- Il est également préférable de laisser une petite ventilation pour refroidir les chambres du broyeur plus rapidement et diminuer ainsi l'arrêt de production
- Une ouverture du registre de l'ordre de 5 - 10% devrait être suffisante.
- Il est préférable de visiter en premier le premier compartiment de manière à suivre le trajet d'écoulement de la matière à partir du début jusqu'à la fin du broyage, cela semble plus logique.
- Généralement, les gens entrent par un trou d'homme.
- De temps à autre, lorsque le diamètre du broyeur est plus grand, il est possible d'entrer à partir de l'entrée du broyeur, par le tourillon.
- Cette méthode fait gagner du temps, car on ne doit plus retirer les deux portes (trous d'homme) de la virole.
- Il faudra seulement enlever la grille centrale de la cloison intermédiaire.
- Il est important limiter le nombre de personnes qui vont visiter le broyeur pour des raisons de sécurité.
- La procédure ci-après a été réalisée pour un broyeur 2 chambres.
- Pour d'autres configurations de broyeurs, une simple extrapolation est suffisante.
- Pour le personnel extérieur, il est également nécessaire de vérifier la nature des équipements internes et la longueur des chambres.

2. Accessoires essentiels

- Afin de réaliser une bonne inspection, certains accessoires sont indispensables.
- En voici une liste ci-dessous.
- La lumière:
- * Une torche électrique portable est le minimum requis, mais n'est pas suffisante la plupart du temps:



- * Comme certaines personnes peuvent prendre des mesures, des photos ou prendre des notes, il est préférable d'installer une baladeuse dans le but d'éclairer la totalité du compartiment.

... La suite dans le livre complet

Chapitre 11

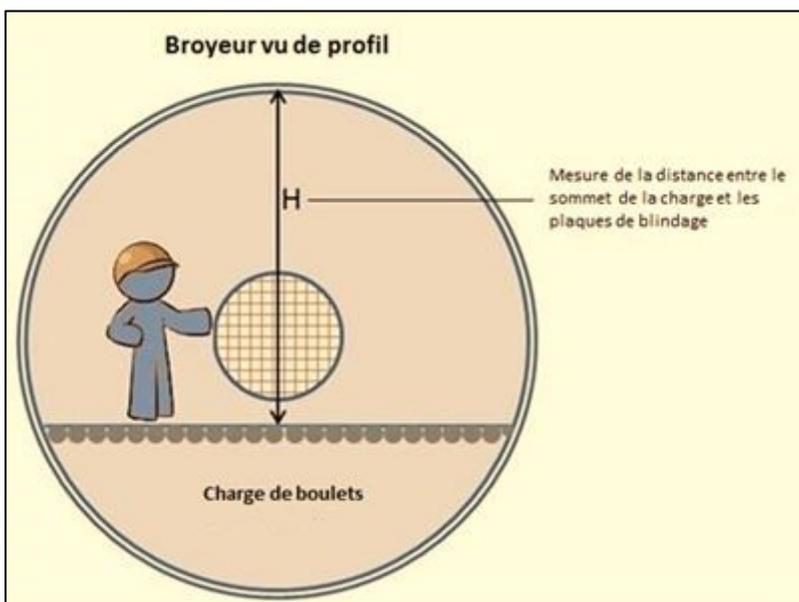
Mesure du degré de remplissage du broyeur

1. Introduction

- Le volume de charge est aussi appelé le degré de remplissage et est toujours exprimé en %.
- La mesure du degré de remplissage du broyeur est une opération de base du département de maintenance.
- Il y a trois façons de réaliser cette mesure:
 - * La mesure de la hauteur entre le haut de la charge et le blindage.
 - * Compter le nombre de plaques de revêtement visibles sur le diamètre.
 - * La mesure du tamis central (ou tourillon d'entrée) et la distance entre le sommet du tamis central et le haut de la charge.
- Les trois méthodes sont développées ci-dessous.

2. Mesure de la hauteur (H)

- On mesure H parce que le calcul est effectué avec le rapport H/D .
- D étant le diamètre interne du broyeur et est censé être connu.
- La mesure est facile à faire, sauf pour les grands diamètres (plus de 3,5 m), car H est alors supérieur à 2,2 m.



- Dans ce cas, beaucoup de gens adoptent un outil de mesure fait maison et qui permet une mesure très fiable.
- Au blindage, le point exact où mettre le mètre est la hauteur moyenne de la plaque, comme le montre le schéma ci-dessous pour la première chambre.

... La suite dans le livre complet

Chapitre 12

Prise d'échantillons dans le broyeur à boulets

1. Introduction

- Afin d'avoir une bonne idée de l'efficacité du broyeur à boulets (blindages, charge de boulets, cloisons, ventilation), une analyse granulométrique à l'intérieur du broyeur est indispensable.
- Cette analyse comprend trois étapes:
 - * La campagne d'échantillonnage à l'intérieur du broyeur
 - * Le tamisage des échantillons en laboratoire
 - * L'analyse des résultats avec la courbe du test axial et son interprétation

Pour cette présentation, nous considérons un broyeur classique avec 2 chambres comme exemple.

2. La prise d'échantillons

- La prise d'échantillons après un crash-stop est également connue sous le nom de "test axial".

2.1. Première chambre:

- Comme décrit dans la procédure d'inspection du broyeur dans un chapitre précédent, nous avons besoin de ce qui suit:



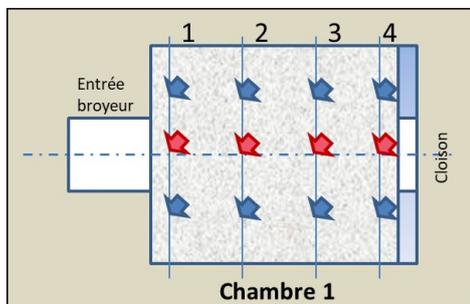
4 sacs solides



Une écope ou quelque chose de similaire pour prendre la matière

Procédure:

- Prendre 4 échantillons (entrée, 2 échantillons intermédiaires, à la cloison intermédiaire) de ± 3 kg chacun
- Idéalement, pour chaque échantillon, prendre la matière en trois points, comme indiqué sur le dessin ci-dessous:



- Si pour quelque raison que ce soit, il n'est pas possible de prendre les échantillons en 3 points, il faut prendre les échantillons dans l'axe du broyeur (flèches rouges sur la figure ci-dessus).

... La suite dans le livre complet

Chapitre 13

Analyse d'échantillons en deux étapes

1. Introduction

- Cette présentation va introduire l'analyse de tamisage en deux étapes pour les types d'échantillons suivants:
 - * Échantillons d'alimentation fraîche: clinker, gypse, calcaire, pouzzolane ...
 - * Échantillons pris dans les broyeurs
- Pour les autres types d'échantillons comme les échantillons du circuit, de cendres volantes ou de ciment, les grands tamis ne sont généralement pas utilisés.
- Le tamisage des échantillons grossiers est souvent effectué en deux étapes:
 - * Une première étape pour les plus grandes dimensions
 - * Une deuxième étape pour les plus petites dimensions
- Nous vous proposons les tamis suivants:

Exemple de tamis	
Grands tamis	Petits tamis
50mm	1,18mm
25mm	0,5mm
12,5mm	212μ
9,5mm	90μ
4,75mm	63μ
2,36mm	45μ
	32μ

- Bien sûr, des tamis similaires peuvent être utilisés.

2. Préparation de l'échantillon pour la première étape

- Les échantillons pris dans le broyeur sont généralement entre 3 et 5 kg chacun.
- L'ensemble de l'échantillon passe à travers les grands tamis sans difficulté et perte de temps.
- Les échantillons d'alimentation fraîche sont plus grands et d'un poids compris entre 20 à 50 kg chacun.
- Si le laboratoire ne veut utiliser qu'une partie de l'échantillon, il est toujours possible d'utiliser un séparateur afin d'obtenir un échantillon plus petit et représentatif.
- Photo d'un diviseur échantillonneur de type Riffle:



... La suite dans le livre complet

Chapitre 14

Échantillonnage dans le circuit d'un broyeur à ciment

1. Introduction

- Des prises d'échantillons périodiques dans un circuit de broyeur à boulets sont indispensables pour:
 - * Suivre l'installation en termes de balances de finesse et de masse
 - * Trouver les problèmes existants et tenter de les résoudre
 - * Améliorer les performances de l'installation.
 - * Atteindre la qualité souhaitée de ciment

2. Avant la campagne d'échantillonnage

- Planifier une campagne d'échantillonnage tous les 3 mois.
- Le circuit de broyage doit être dans un état stable au moins 2-3 heures avant le début de la campagne d'échantillonnage.
- Le temps pour arriver à la stabilité varie d'un broyeur à l'autre.
- Toutes les données de production doivent être prises juste avant la campagne d'échantillonnage.
- Ces données varient d'une installation à l'autre, mais, fondamentalement, nous devons au moins avoir:
 - * Type de ciment produit
 - * Production (t/h)
 - * Composition
 - * Objectif finesse (résidus et Blaine) et objectif de production
 - * Données des dernières finesses (résidus et Blaine)
 - * Débit rejets séparateur (t/h) si existe
 - * Température de ciment à la sortie du broyeur
 - * Quantité d'injection d'eau si existante
 - * Quantité d'adjuvant de mouture si existant
 - * Puissance absorbée du broyeur à boulets et d'autres équipements principaux (pour le broyeur, prendre la puissance absorbée directement dans la salle électrique, c'est plus fiable).
 - * Les autres données comme la position clapets des ventilateurs, la pression à la sortie du broyeur, la vitesse du séparateur ... etc

3. Matériel et outils nécessaires

- Ce qu'il nous faut pour réaliser une campagne d'échantillonnage dans de bonnes conditions.
- Gros sacs pour les échantillons d'alimentation fraîche (clinker, gypse, calcaire ...), par exemple, les sacs de ciment de 50kg sont une bonne option.



... La suite dans le livre complet

Chapitre 15

Formules de puissance des broyeurs

1. Introduction

- Cet article se propose de décrire les différentes méthodes pour calculer la puissance d'un broyeur à boulets.

- Sept méthodes seront présentées ici:

- * La formule de Bond
- * La formule de Hogg et Fuerstenau
- * La formule suivant le couple (FLS)
- * La formule Slegten
- * La formule du site web 911 Metallurgist
- * La formule de Beeck
- * La formule Holderbank
- * Autres formules des constructeurs

- En règle générale, la puissance absorbée d'un broyeur à boulets dépend des données de base suivantes:

- * Diamètre
- * Longueur
- * Degré de remplissage
- * Vitesse de rotation
- * Type de procédé
- * Type de broyeur
- * Type de blindage
- * Composants

- Passons en revue les différentes formules.

2. Formule de Bond

- La formule de puissance de Bond est la suivante:

$$P_b = 4,879 \times D^{0,3} \times (3,2 - 3 \times J) \times V_{cr} \times \left(1 - \frac{0,1}{2^{9-10 \times V_{cr}}}\right)$$

Où:

P_b est la puissance par tonne de boulets à l'arbre en kW/tonne

D est le diamètre interne du broyeur en m

J est le volume de charge (degré de remplissage) en %

V_{cr} est le pourcentage de la vitesse critique

- Si le broyeur est en voie sèche avec grille de décharge, la formule doit être multipliée par 1,08.

- Comme c'est le cas dans l'industrie du ciment, nous avons:

$$P_b = 4,879 \times D^{0,3} \times (3,2 - 3 \times J) \times V_{cr} \times \left(1 - \frac{0,1}{2^{9-10 \times V_{cr}}}\right) \times 1,08$$

... La suite dans le livre complet

Chapitre 16

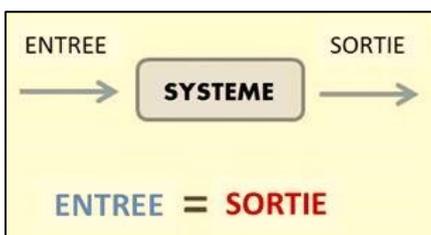
Bilan thermique du broyeur à boulets

1. Introduction

- Il est bien connu que la plus grande partie de l'énergie introduite dans un broyeur à boulets est convertie en chaleur.
- Seulement environ 5% de cette énergie est utilisée pour broyer la matière à la finesse requise.
- En conséquence, cette chaleur peut induire des températures très élevées à l'intérieur du broyeur à ciment.
- Ces températures peuvent affecter le processus de broyage si elles atteignent un certain niveau.
- Par conséquent, il est important de faire le bilan thermique de l'installation afin de résoudre les problèmes éventuels.

2. Principe

- Pour tous les bilans thermiques, il doit y avoir un équilibre entre ce qui entre à l'intérieur et ce qui sort du système.
- Bien sûr, c'est également le cas pour le bilan thermique du broyeur à boulets.
- Ce principe de base est illustré ci-dessous:



3. Les trois paramètres de base

- Indépendamment des caractéristiques et des données de production de l'installation que nous devons connaître, le bilan thermique tourne principalement autour de 3 valeurs:

3.1. Température du ciment à la sortie du broyeur:

- Il est généralement admis qu'au-delà de 105-110 degrés centigrades, des réactions indésirables au processus de broyage peuvent avoir lieu.
- Cela peut également affecter la qualité du ciment.
- Ces réactions sont les suivantes:
 - * Modification du phénomène de déshydratation du gypse qui peut causer une fausse prise du ciment (appelée false set en anglais).
 - * Agglomération des particules de ciment due aux charges électrostatiques et qui provoque le coating (sorte d'enrobage) sur les boulets et blindages.
- La température exacte qui ne doit pas être dépassée varie d'un cas à l'autre.
- Cela dépend du type de circuit, des propriétés de la matière, de la température ambiante, de la finesse requise, de l'efficacité de séparation, de la charge de boulets ... etc
- Nous estimons que 105 °C est une bonne référence à ne pas dépasser.

... La suite dans le livre complet

Chapitre 17

Ventilation du broyeur

1. Introduction

- La ventilation d'un broyeur à ciment poursuit 3 objectifs:
 - * Assurer le refroidissement du broyeur et de la matière
 - * Dépoussiérer le broyeur
 - * Enlever les très fines particules hors du broyeur

2. Refroidissement du broyeur

- Un bon refroidissement du broyeur et de la matière dans le broyeur est nécessaire pour maintenir une bonne température de travail.
- La température de référence est celle de la matière à la sortie du broyeur.
- Pour les broyeurs à ciment, on ne peut pas dépasser une température de 105 - 110°C selon le type de circuit.
- Des températures plus élevées peuvent provoquer la déshydratation du gypse.
- Cette déshydratation doit être évitée pour les problèmes de fausse prise du ciment qu'elle engendre.
- Pour les broyeurs à cru, une température inférieure à 100° C est meilleure.
- Si on dépasse ces valeurs, on observera probablement du coating (enrobage) sur les blindages et boulets.
- Sans oublier, la fluidité du ciment diminue considérablement en cas de température trop élevée.

3. Problèmes de coating

- Le coating est une agglomération de matière sur le blindage et/ou les boulets.
- Il est dû aux forces de cohésion superficielle et les forces générées par l'électricité statique.
- Ce phénomène se produit avec du ciment, mais aussi avec du calcaire.
- Comme le calcaire a la propriété de produire une grande quantité de particules ultra fines (moins de 2 microns) lorsqu'il est broyé, le problème de coating devient crucial.
- Le coating est un facteur de perte de rendement qui peut devenir important (jusqu'à 30%) parce que:
 - Le coating perturbe la bonne ségrégation des boulets dans le cas d'un blindage classant.
 - Le coating réduit aussi le rendement d'attrition des petits boulets qui ne sont plus en contact l'un avec l'autre.

4. Dépoussiérage du broyeur

- Cette fonction semble évidente si l'on veut éviter des accumulations de poussières dans le circuit.

5. Valeurs usuelles de ventilation

- Lorsque l'on veut définir la ventilation nécessaire dans une installation de broyage, c'est en termes de vitesse d'air dans la section libre du broyeur, c'est à dire:

ventilation <=> vitesse d'air en m/sec

... La suite dans le livre complet

Chapitre 18

Mesure de la Ventilation du Broyeur

1. Introduction

- La ventilation d'un broyeur à boulets est extrêmement importante pour les raisons décrites dans le chapitre précédent.
- La mesure du débit d'air est donc nécessaire pour effectuer un réglage optimal, pour vérifier le fonctionnement réel et la conformité des débits de l'installation et finalement pour repérer des erreurs d'installation ou des fuites.
- La mesure du débit (Q) consiste en fait en une mesure de la vitesse de l'air (V) que l'on multiplie ensuite par la section de passage (S) :

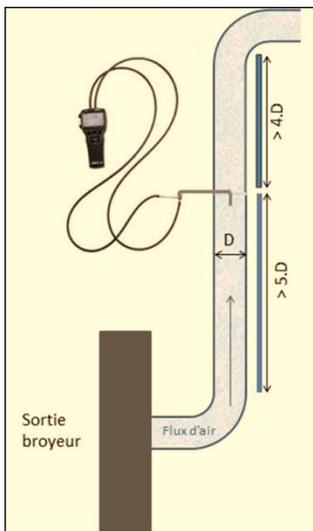
$$Q = S \times V$$

2. Déterminer le ou les point(s) de mesure dans le circuit

- Les points de mesure dépendent de la configuration du circuit de broyage.
- En général, les meilleurs points sont dans un endroit où il n'y a pas de coudes ou d'autres connexions.
- Ensuite, lorsque et où le débit d'air est le moins perturbé.
- Pour déterminer le point exact de mesure, les recommandations suivantes doivent être respectées:
 - * La forme et la dimension de la conduite doivent être constantes
 - * La longueur du segment de la conduite avant le point de mesure doit être supérieur à 5D (D = diamètre de la conduite)

La longueur du tronçon de la conduite après le point de mesure doit être supérieure à 4D

- Voir la figure ci-dessous:



- Dans la pratique, il est rare de rencontrer conditions optimales.
- Mais il faut garder à l'esprit que plus on s'en rapprochera, et plus le résultat sera fiable.
- Habituellement, les mesures sont effectuées dans le conduit vertical à la sortie du broyeur et dans le conduit en aval du ventilateur.
- D'autres points du circuit peuvent également être mesurés en cas de nécessité, comme la ventilation au niveau du séparateur (utile pour les séparateurs de 3ème génération).

... La suite dans le livre complet

Chapitre 19

Air faux dans les circuits de broyage

1. Introduction

- Les entrées indésirables d'air faux dans les cimenteries peuvent être un gros problème et doivent être prises très au sérieux.
- En fait, l'air faux entraîne les inconvénients suivants:
 - * Baisse de la production de l'installation
 - * Accroissement de la consommation d'énergie
 - * Chute de la température pour le séchage de la matière première
 - * Usure accentuée des ventilateurs
 - * Difficulté pour transporter la matière
- Il est donc important de connaître les points où l'air faux peut apparaître et de connaître son pourcentage afin de prendre les mesures appropriées.
- Pour cela, certaines mesures sont nécessaires sur le site.
- L'air faux est surtout présent dans les zones suivantes:
 - * Installation de broyage de cru
 - * Zone du four
 - * Installation de broyage de ciment
- Pour les circuits de broyage, les points d'entrée potentiels d'air faux sont:
 - * sortie broyeur
 - * points d'alimentation
 - * trous dans les conduits
 - * trappes d'ouverture d'entretien
 - * clapets, joints de dilatation
 - * connexions
 - * filtres
- Dans les chapitres ci-dessous, nous allons développer le problème de l'air faux dans:
 - * les circuits de broyage de cru et charbon avec broyeurs à boulets
 - * circuits de broyage de ciment

... La suite dans le livre complet

Chapitre 20

Bilan Matière de circuits de broyage

1. Introduction

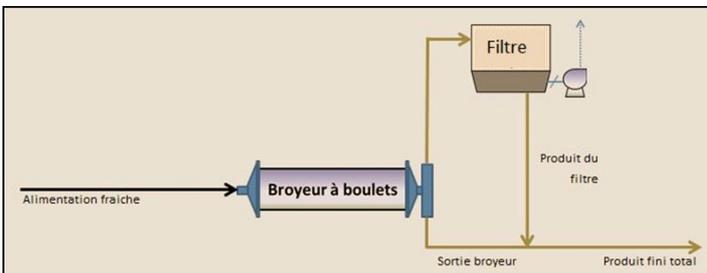
- A l'instar du bilan énergétique (ou thermique) d'une installation de broyage, le bilan de matière répond à une règle très simple: tout ce qui rentre dans le circuit en masse sort du circuit.
- Cela est illustré par le petit dessin ci-dessous:



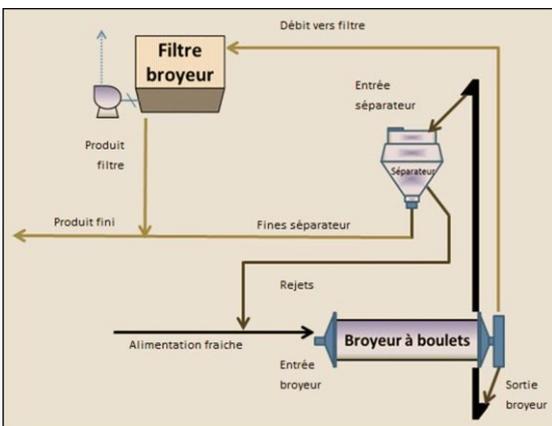
- Cette courte présentation introduit des calculateurs de bilans de matière qui ont été conçus pour 7 circuits de broyage différents.
- Les 7 circuits sont décrits ci-après.

2. Les 7 circuits de broyage

- Circuit ouvert:



- Circuit fermé (séparateur de 1ère génération, produit du filtre dans produit fini):



... La suite dans le livre complet

Chapitre 21

Injection d'eau

1. Introduction

- Les broyeurs à boulets génèrent une chaleur importante.
- Au fur et à mesure que la matière avance dans le broyeur, la température augmente.
- Tout le monde sait que la température ne peut pas dépasser un certain seuil évalué généralement à 105-110°C.

Au-delà de cette limite, on peut rencontrer les problèmes suivants:

- * chute de la fluidité de la matière
- * production de superfines particules
- * coating sur les boulets et blindages
- * bouchage des lumières de la cloison de sortie
- * déshydratation du gypse
- * prise éclair et fausse prise du ciment
- * problème de stockage du ciment dans les silos
- * formation de blocs dans les silos

- Tous ces problèmes ont pour conséquence:

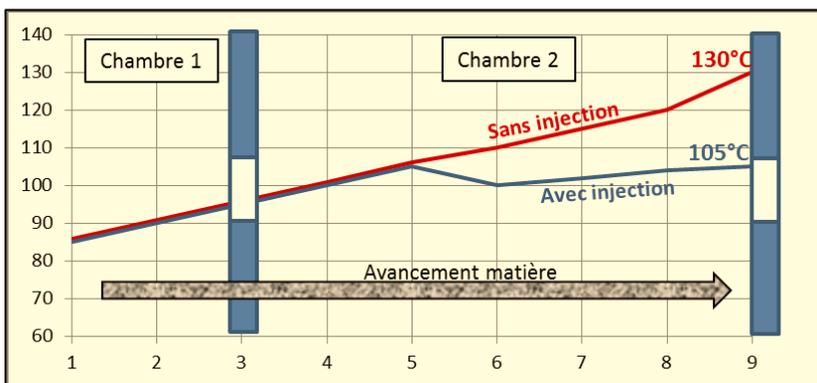
- * une chute drastique du rendement de l'installation de broyage
- * une diminution de la production
- * un surcoût des opérations d'entretien

- Pour éviter ces problèmes, le broyeur est ventilé.

- Il arrive cependant que la ventilation ne suffise pas et il faut alors recourir à un autre moyen:

L'injection d'eau

- Ci-dessous, illustration du phénomène d'augmentation de température et de l'effet engendré par l'injection d'eau:



2. Où injecter l'eau

- Normalement, on injecte l'eau dans la deuxième chambre du broyeur à ciment, là où la température est la plus élevée.
- Si la température du clinker est supérieure à 100 °C, il est conseillé d'injecter une partie en chambre 1.
- Dans ce cas de figure, il est généralement admis qu'un tiers de la quantité totale soit injecté en chambre 1 pour deux tiers en chambre 2.

... La suite dans le livre complet

Chapitre 22

Matière dans le broyeur

1. Introduction

- Il est toujours intéressant de connaître la quantité de matière se trouvant l'intérieur d'un broyeur à boulets à un instant t et le temps que cette même matière met pour traverser le broyeur.
- Concernant cette quantité de matière, il y a deux façons de voir les choses:
 - * à savoir, la quantité de matière dans le broyeur après un crash-stop
 - * ou de connaître cette quantité à un instant t lorsque le broyeur est en fonctionnement
- Maintenant, concernant le temps de séjour également appelé le temps de rétention, la meilleure solution est d'organiser un test.
- Le temps de résidence dans le broyeur (MRT) sera évoqué au chapitre suivant.

2. Quantité de matière dans le broyeur

2.1. Quantité lorsque le broyeur est arrêté :

- Le broyeur doit être arrêté en crash-stop!
- Il est recommandé d'aller à l'intérieur du broyeur et de vérifier le degré de remplissage et le niveau de matière pour tous les compartiments.
- Nous devons calculer les vides entre boulets afin de connaître cette quantité de matière.
- Lorsque les boulets sont de même diamètre, des vides correspondent toujours à 47,6% du volume total.
- Voir la démonstration sur le tableau ci-dessous:

Diamètre de boulets	Volume des boulets	Nombre de boulets par côté	Volume du cube = Volume total	Numéro de boulets	Volume de tous les boulets	Pourcentage de boulets sur le volume total	Pourcentage de vides
mm	mm ³		m ³		m ³	%	%
90	381 704	30	19,68	27000	10,31	52,4	47,6
80	268 083	30	13,82	27000	7,24	52,4	47,6
70	179 594	30	9,26	27000	4,85	52,4	47,6
60	113 097	30	5,83	27000	3,05	52,4	47,6
50	65 450	30	3,38	27000	1,77	52,4	47,6
40	33 510	30	1,73	27000	0,90	52,4	47,6
30	14 137	30	0,73	27000	0,38	52,4	47,6
25	8 181	30	0,42	27000	0,22	52,4	47,6
20	4 189	30	0,22	27000	0,11	52,4	47,6
17	2 572	30	0,13	27000	0,07	52,4	47,6
15	1 767	30	0,09	27000	0,05	52,4	47,6

- Quand il y a différents diamètres, le pourcentage de vides est inférieur.
- Il est calculé avec la formule suivante:

$$\% \text{Vides} = 1 - \frac{\rho_{\text{apparente}}}{SG}$$

... La suite dans le livre complet

Chapitre 23

Temps de rétention dans le broyeur

1. Introduction

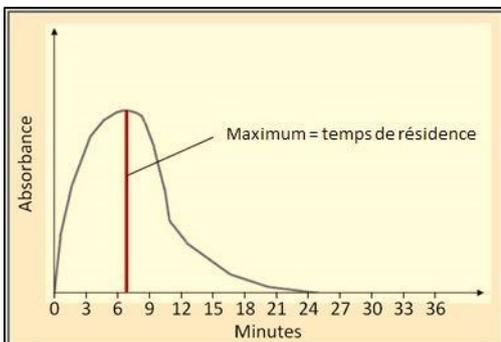
- Il est toujours intéressant de connaître combien de temps la matière met pour traverser le broyeur.
- On appelle cela le temps de résidence de la matière (MRT).
- Maintenant, pour le savoir, la meilleure solution est d'organiser un test.
- En ce qui concerne la quantité de matière à l'intérieur du broyeur, on peut la calculer avec les résultats obtenus par le MRT.

2. Temps de résidence dans le broyeur

- La meilleure façon de connaître le temps de séjour de la matière dans le broyeur est de réaliser un essai avec un traceur.
- Le traceur utilisé est appelé fluorescéine et est une poudre orange/rouge foncé.

2.1. Procédure du test:

- La procédure de test de temps de rétention est décrite ci-après.
- Marquer le clinker avec de la fluorescéine placée dans une solution d'eau et mettre le tout dans un sac en plastique solide.
- La quantité de fluorescéine à utiliser est d'environ 15g par 20 tonnes de matière fraîche + rejets du séparateur.
- Le traceur mélangé avec un peu d'eau chaude est introduit dans la poche contenant 5 kg de clinker.
- Prendre le clinker avec un certain pourcentage de fines.
- Avant de commencer le test, assurez-vous que l'installation de broyage travaille dans des conditions stables.
- Le sac contenant le clinker marqué est introduit à l'entrée du broyeur.
- Le chronomètre est alors enclenché.
- Un échantillon est prélevé à chaque minute à la sortie du broyeur (30 secondes pour les broyeurs courts ayant un rapport $L/D < 3$).
- La durée de l'essai dépend bien sûr de l'installation et de ses conditions d'exploitation, mais peut varier de quelques minutes à plus de 20 minutes.
- Les échantillons sont ensuite agités, laissés au repos pendant au moins 30 secondes et filtrés.
- Le liquide est ensuite analysé dans un spectrophotomètre.
- Enfin, un graphique est tracé, l'absorbance en fonction du temps, et le pic de minutes est utilisé comme temps de rétention.
- Exemple de graphique:



... La suite dans le livre complet

Chapitre 24

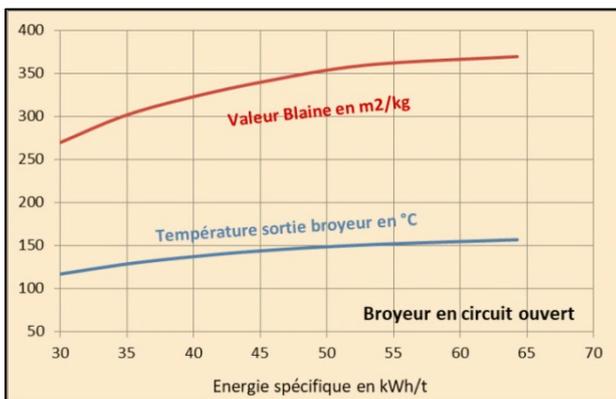
Adjuvants de mouture

1. Introduction

- Tout le monde sait que l'efficacité d'un broyeur à boulets est très faible.
- En général, le rendement est compris dans un intervalle de 3 à 5%.
- La grande majorité de l'énergie produite est convertie en chaleur.
- Dans la première partie du siècle dernier, pratiquement tous les broyeurs à ciment fonctionnaient en circuit ouvert.
- En raison de la demande, entre autres, de ciments de plus grande résistance, les fabricants devaient produire des ciments ayant une finesse plus élevée.
- De ce fait, ils ont commencé à rencontrer des problèmes de températures trop élevées dans les broyeurs avec les conséquences suivantes:
 - * Agglomération de particules sur les boulets et blindages connu sous le nom de coating
 - * Perte de rendement et augmentation drastique de la puissance spécifique (kWh/t)
 - * Difficulté pour produire un ciment à haut Blaine
- Comme exemple pratique, prenons les anciens broyeurs à ciment en Angleterre.
- Ces installations étaient équipées avec des broyeurs Vickers en circuit ouvert.
- Les broyeurs Vickers avaient un diamètre de 2,55 mètres et une longueur d'environ 12 mètres.
- Ils étaient donc très longs (L / D = 4,7).
- La vitesse de rotation approchait 77% de la vitesse critique.
- Ils étaient configurés en 3, 4, voire 5 compartiments.
- Ce n'était pas rare d'avoir des températures supérieures à 130-140 °C à la sortie du broyeur.
- Certaines installations produisaient même un ciment à 4000 Blaine pour une consommation de 70-80 kWh/t!
- Nous avons fait un bilan thermique d'un broyeur à ciment similaire avec finesse différente Blaine, sans injection d'eau et avec une ventilation correcte.
- Les résultats sont ci-dessous:

Puissance spécifique	Finesse Blaine (cm2/gr)	Température sortie broyeur (°C)
30	2700	132
35	3000	137
39	3200	141
45	3400	145
53	3600	151
64	3700	157

- Et le diagramme:



... La suite dans le livre complet

Chapitre 25

Composition des charges broyantes

1. Introduction

- Ce chapitre vise à introduire le calcul de la composition de la charge de boulets.
- En effet, la charge broyante est d'une grande importance pour le rendement du broyeur.
- Mais d'abord, il est important de souligner que la composition d'une charge d'un broyeur à ciment dépend de nombreux paramètres et une composition mal calculée peut affecter de manière significative les performances de l'installation.
- En outre, il est préférable de procéder à un contrôle complet avant de modifier une charge de boulets.
- Une explication complète d'une campagne d'échantillonnage à l'intérieur du broyeur est disponible dans un chapitre ultérieur.
- Il est également préférable de faire appel à des spécialistes pour calculer une charge broyante.

2. Broyeur à ciment 2 chambres

2.1. Première chambre:

- Le premier compartiment (ou première chambre) est également connu comme chambre de concassage ou chambre de préparation.
- Il est équipé avec un blindage releveur afin d'augmenter la trajectoire ascendante des balles et favoriser la casse des morceaux de matière les plus gros.
- Le diamètre des boulets va de 90mm à 60mm avec quelques exceptions (100mm pour des matériaux plus durs).
- Les boulets inférieurs à 60mm ont une efficacité limitée et doivent être évités.
- Les boulets travaillent surtout par impact.

2.1.1. Facteurs influençant la composition de la charge:

- La granulométrie de l'alimentation fraîche:
 - C'est probablement le facteur le plus important
 - Il faut prendre en considération l'alimentation fraîche à l'entrée du broyeur
- La dureté du clinker:
 - Ne pas confondre avec l'aptitude au broyage du clinker.
 - Sur ce sujet, voir l'explication au chapitre broyabilité et dureté
 - Un bon test pour déterminer la dureté du clinker est le test de dureté Slegten bien connu.
- Le type de revêtement, car le blindage est généralement dessiné avec un effet de relevage, mais on peut définir trois types de situations:
 - Faible effet de relevage,
 - Effet de relevage normal
 - Effet de relevage agressif
- La consommation d'énergie spécifique de la chambre, la valeur étant normalement comprise entre 8 et 12 kWh/t.
- D'autres facteurs moins importants:
 - Le pourcentage de laitier dans l'alimentation
 - Le pourcentage d'additifs, comme le calcaire, dans l'alimentation
 - Le pourcentage d'humidité dans l'alimentation
 - Le type de clinker, s'il est gris, blanc ou encore fondu.

... La suite dans le livre complet

Chapitre 26

La dimension maximum du boulet

1. Introduction

- Dans ce petit chapitre, nous parlerons du calcul de la taille maximum des charges broyantes utilisées dans un broyeur à boulets.
- Trois formules sont décrites ici:
- * La formule de Bond
- * La formule de Rowland (Allis-Chalmers)
- * La formule d'Azzaroni
- Tout le monde connaît ces formules et les utilise fréquemment.
- Nous ne voulons pas discuter ici de la fiabilité de ces formules, chacun ayant sa propre opinion sur le sujet.
- Nous nous limitons donc à les décrire.

2. La formule de Fred.C.Bond

- La formule est la suivante:

$$D_b(\text{Bond}) = 25,4 \cdot \sqrt{\frac{P_f \cdot \frac{W_i}{1,102311}}{C \cdot V_{cr}}} \cdot \sqrt{\frac{S_{gs}}{\sqrt{\frac{D}{0,3048}}}}$$

Avec:

- D_b = la taille maximum du boulet en mm
- P_f = la dimension en μ de 80% de passants de l'alimentation
- $C = 200$ pour les broyeurs à boulets
- W_i = indice de travail en kWh/t
- V_{cr} = pourcentage de la vitesse critique (si 75% => 75)
- S_{gs} = densité de l'alimentation en t/m^3
- D = diamètre interne du broyeur en m

- On peut avoir le choix entre les boulets et les cylpebs
- En fonction du diamètre déterminé par le calcul, il faut choisir la taille commerciale proposée en adéquation avec le résultat.

3. La formule de Rowland (Allis-Chalmers)

- La formule est la suivante:

$$D_b(\text{Rowland}) = 25,4 \cdot \sqrt{\frac{P_f}{330} \cdot \left(\frac{S_{gs} \cdot \frac{W_i}{1,10229}}{V_{cr} \cdot \sqrt{3,281 \times D}} \right)^{0,33333}}$$

... La suite dans le livre complet

Chapitre 27

Échantillonnage de la charge de boulets

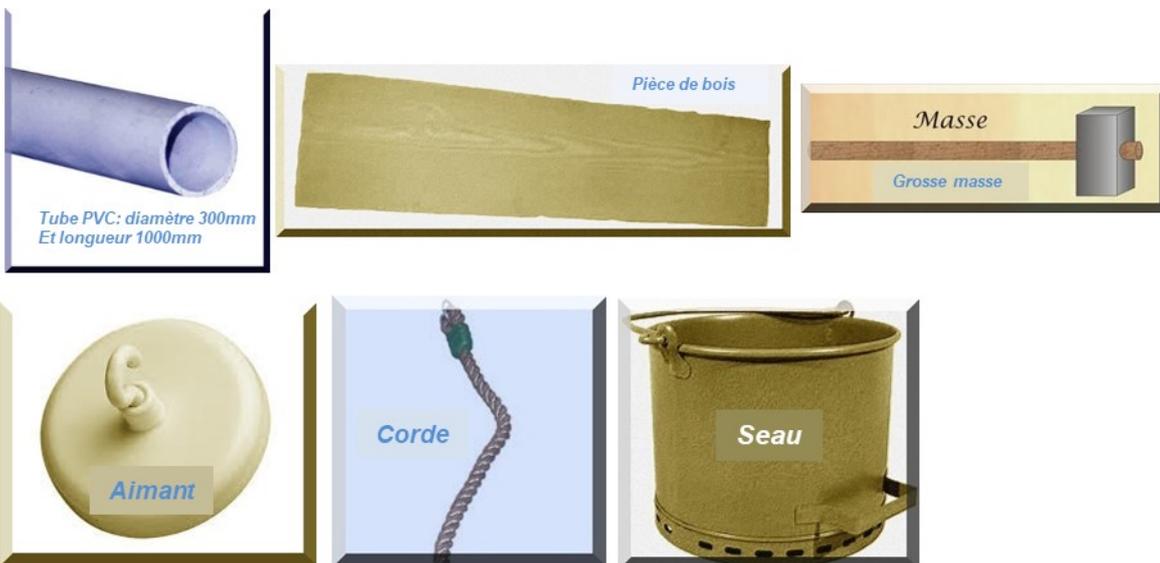
1. Introduction

- Il est toujours intéressant de connaître la gradation de charge de la balle à l'intérieur d'un broyeur à boulets.
- Les raisons peuvent être les suivantes:
 - * Voir la différence avec la charge de boulets théorique proposée par le fournisseur ou quelqu'un d'autre
 - * Réajuster la politique des ajouts
 - * Obtenir une bonne idée de l'usure des boulets
 - * Décider s'il est temps de changer complètement la charge de boulets
 - * Vérifier si le classement est bon dans la seconde chambre
- Des ingénieurs expérimentés ont généralement une bonne idée de la situation avec une simple visite du broyeur, mais argumenter avec les résultats d'un test est toujours mieux pour convaincre des gens.
- Le problème numéro un est la difficulté de la tâche.
- En fait, c'est un travail très dur et long.

2. Méthode utilisée dans l'industrie minière

- Rappelons-nous la méthode souvent utilisée dans le processus en voie humide:

2.1. Outils nécessaires:



- Un tube en PVC d'un diamètre de 300mm et d'une longueur de 1000 mm (ce tube doit être résistant et une épaisseur de 8 à 10 mm est nécessaire).
- Un morceau de bois est conseillé pour mettre entre le tube et le marteau en raison de l'impact.
- Un gros marteau (masse) pour frapper sur le tube dans la charge.
- Un aimant pour enlever les boulets de la charge de boulets.
- Une corde pour soulever l'aimant et les boulets aimantés.
- Un seau solide pour transporter les boulets vers le laboratoire.

... La suite dans le livre complet

Chapitre 28

Test de boulets marqués

1. Introduction

- Les tests de boulets marqués, abréviation MBT en anglais, sont effectuées tant pour le ciment que pour l'industrie minière.
- Il est unanimement admis qu'ils ont beaucoup plus d'importance dans le domaine des mines où l'usure est considérablement plus élevée.
- Le point de vue économique est plus critique, que ce soit pour les miniers ou les fournisseurs de boulets.
- Toutefois, ces tests sont aussi très utiles dans le domaine de ciment.
- Il est important de noter que certains producteurs (ciment et mines) font des réserves sur le bien-fondé de ces tests.

2. Objectifs du MBT

- Un fournisseur veut prouver que son produit est meilleur.
- Un producteur de ciment veut comparer les différents fournisseurs pour l'inclusion dans la liste des fournisseurs, par exemple.
- Un fournisseur de corps broyants et un producteur minier/ciment conviennent de réaliser ensemble une étude approfondie afin d'obtenir la meilleure qualité de boulet.

3. Boulets marqués

- Il est généralement admis que 200 boulets sont nécessaires et suffisants pour faire le test (200 boulets pour un alliage).
- Un trou est percé dans chaque boulet.
- Le trou a les dimensions suivantes: 5mm de diamètre et 15 mm de profondeur.
- Exemples de boulets marqués si différentes qualités sont testées:

Qualité 1



Un seul trou foré depuis la surface dans la direction du centre

Qualité 2



Deux trous percés à 180°

Qualité 3



Deux trous percés à 180° et troisième trou à 90° dans le même plan

Qualité 4



Quatre trous forés à 90° dans le même plan

Qualité 5



Quatre trous forés à 90° dans le même plan et 5ème trou au centre dans un plan perpendiculaire

... La suite dans le livre complet

Chapitre 29

Cyclones

1. Introduction

- Dans l'industrie de fabrication de ciment, les cyclones de grande taille sont fréquemment utilisés comme équipements principaux, et ce dans un nombre important de départements où il faut gérer un grand volume de gaz chargés de poussières.
- Le meilleur exemple étant les unités de préchauffage des fours rotatifs.
- Le cyclone est un dispositif mécanique simple, couramment utilisé dans les circuits de broyage pour enlever les particules relativement grossières des gaz.
- Les cyclones sont souvent utilisés comme pré-filtres ou carrément comme filtres pour éliminer plus de 80% des particules supérieures à 20 µm de diamètre.
- Les plus petites particules s'échappant des cyclones peuvent alors être collectées par des équipements de contrôle plus efficaces, comme les filtres à manches et électrofiltres.
- Les cyclones sont relativement peu coûteux, car ils n'ont pas de pièces mobiles et ils sont faciles à utiliser.
- Le type le plus commun de cyclone est connu comme le cyclone à flux inversé.

2. Avantages des cyclones

- Faible coût d'investissement
- Capacité à fonctionner à des températures et à des pressions élevées
- Faibles exigences de maintenance, car pas de pièces mobiles
- Chute de pression constante
- Peut séparer les particules solides et liquides, parfois les deux en même temps

3. Désavantages des cyclones

- Faible efficacité surtout pour les très petites particules
- Les coûts élevés d'exploitation en cas de forte chute de pression
- Les cyclones sont soumis à une usure prononcée ou à du colmatage si des matières abrasives sont traitées.

4. Principe d'opération

- La configuration en spirale de l'écoulement des gaz est créée par la manière dont le gaz est introduit.
- Il pénètre sur le côté de la paroi du corps du cyclone et tourne un certain nombre de fois en spirale vers le bas, appelé vortex externe.
- Les particules dans le gaz sont soumises à des forces centrifuges qui les déplacent radialement vers l'extérieur, contre le flux entrant de gaz et vers la surface intérieure du cyclone.
- Lorsque les gaz atteignent la partie inférieure du cyclone, ils changent de direction et s'élèvent vers le haut du centre du tube, également en effet de spirale.
- Cet effet de spirale est également appelé "vortex interne" et les particules fines sont transportées avec l'air et sortent du cyclone à travers le tube d'immersion.
- Les particules grossières se trouvant vers l'extérieur sont entraînées vers le bas par le tourbillon extérieur et sortent du cyclone.
- Il a été démontré que la force de gravité a peu d'effet sur le fonctionnement du cyclone.

... La suite dans le livre complet

Chapitre 30

Séparateurs statiques

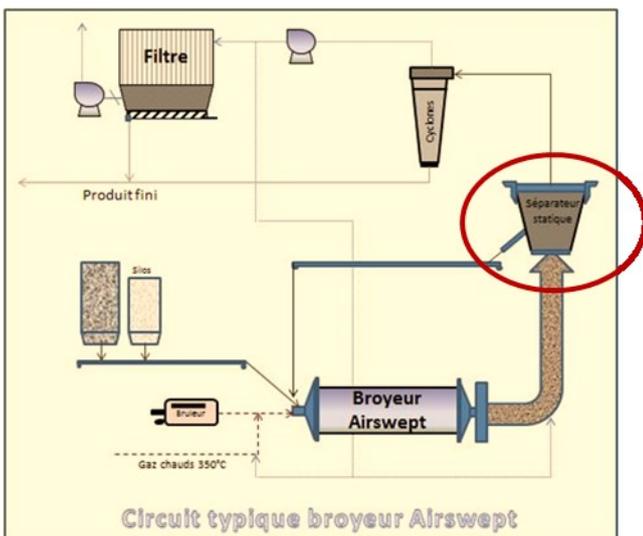
1. Introduction

- Les séparateurs sont largement utilisés dans l'industrie du ciment et plus particulièrement dans les circuits de broyage.
- Mais que sont les séparateurs?
- Fondamentalement, les séparateurs séparent les particules fines des particules grossières.
- Les particules fines sont généralement collectées comme produit fini alors que les particules grossières sont renvoyées pour un broyage ultérieur.
- L'astuce consiste à faire en sorte que le flux de particules grossières ne contienne pas de particules fines et, d'autre part, que le flux de particules fines ne contienne pas de particules grossières.
- Un séparateur efficace doit empêcher le surbroyage et comme conséquence un gaspillage d'énergie.
- Il existe principalement deux types de séparateurs, les séparateurs statiques et les séparateurs dynamiques.
- La grande différence est que les séparateurs statiques n'ont pas de pièces mobiles et peuvent être ajustés seulement avec des modifications mécaniques.
- Ce chapitre est consacré aux séparateurs statiques classiques et aux séparateurs V qui sont un autre type de statique.

2. Séparateurs statiques

2.1. Introduction:

- Le séparateur statique est comme le cyclone un dispositif mécanique simple couramment utilisé dans les circuits de broyage pour éliminer les particules relativement grossières se trouvant dans les flux gazeux.
- Les séparateurs statiques sont relativement peu coûteux, car ils n'ont pas de pièces mobiles et ils sont faciles à utiliser.
- Ils sont notamment utilisés dans les circuits de broyeurs à cru et à charbon.
- Voici un circuit avec un broyeur airswept utilisé pour le broyage du charbon:



... La suite dans le livre complet

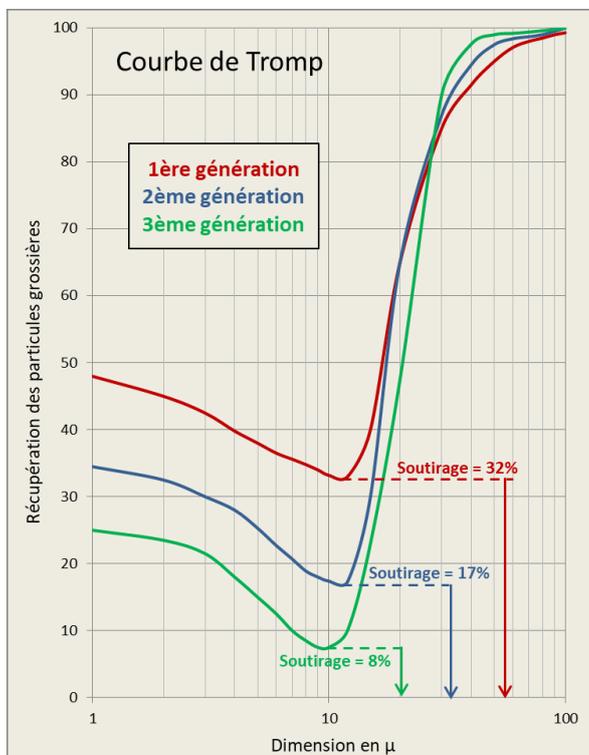
Chapitre 31

Introduction aux séparateurs dynamiques

- Après avoir introduit les cyclones et les séparateurs statiques, nous allons parler des séparateurs dynamiques, qui constituent la grande majorité dans les circuits de broyage de cimenterie.
- Les séparateurs dynamiques sont classés en trois générations, bien qu'un fournisseur mondialement connu ait récemment développé un séparateur qu'il classe comme quatrième génération.
- Dans les séparateurs de première génération, le flux d'air est généré par un ventilateur à l'intérieur du corps du séparateur.
- Dans la deuxième génération, le flux d'air est généré par un ventilateur externe et il y a des cyclones.
- Et enfin, la troisième génération a une cage tournante qui remplace les contre-palettes de la 1ère et 2ème génération.
- Comparaison des principales caractéristiques:

Catégorie	1ère génération	2ème génération	3ème génération	4ème génération
Nom	Turbo-séparateurs	Séparateurs à cyclones	Séparateurs à cage	Cyclone intégré
Second nom	Conventionnel	-	Haut rendement	Haut rendement
Dessin	Compact	Volumineux	Volumineux	Compact
Variétés	Aucune	Aucune	Nombreuses	-
Rendement	40-60%	60-80%	80-90%	Pas de données disponibles
Soutirage	20-70%	10-40%	0-30%	
Imperfection	0,35-0,75	0,2-0,5	0,15-0,4	
Blaine des refus	1100-2000	800-1200	550-1200	

- Comparaison des courbes de Tromp:



- La courbe de Tromp sera expliquée dans un chapitre ultérieur.

... La suite dans le livre complet

Chapitre 32

Séparateurs de première génération

1. Introduction

- Ils sont aussi appelés:
 - Séparateurs Turbo ou turboséparateurs
 - Séparateurs classiques ou conventionnels
- Le matériau qui doit être séparé est dispersé dans la zone où la séparation est créée par un plateau de distribution.
- Le débit d'air nécessaire à la séparation est produit par un ventilateur situé à l'intérieur du séparateur lui-même.
- L'alimentation en matière est réalisée mécaniquement à l'aide de convoyeurs continus appropriés (aéroglossières).
- Les séparateurs peuvent avoir un ou deux moteurs, réducteurs et arbres:
 - un pour le ventilateur principal
 - et le second pour le plateau de distribution et les contre-palettes
- Voici une liste non-exhaustive de séparateurs classiques:
 - Whirwind Air Classifier (Sturtevant)
 - Turbopol (ThyssenKrupp Industrial Solutions)
 - Schmidt
 - Heyd
 - Raymond
 - Escher Wyss
 - Hischmann
- Ces séparateurs sont utilisés autant pour les matières premières que pour le ciment.

2. Avantages des séparateurs dynamiques de 1ère génération

- Possibilité de réglages mécaniques.
- Possibilité de très grands débits.
- Flexibilité pour produire des produits de différentes qualités.
- Faible volume requis.
- Investissement limité.

3. Désavantages des séparateurs dynamiques de 1ère génération

- Mauvais rendement spécialement avec des charges circulantes élevées dû à:
 - une mauvaise répartition de la matière dans la section transversale
 - une mauvaise dispersion de la matière dans l'air de séparation
 - beaucoup de particules fines remises en circulation dans le courant d'air, augmentant la quantité entraînée avec les rejets
- Pas ou peu de possibilité de refroidissement ou de séchage de la matière.

4. Principe de fonctionnement

- Le ventilateur principal produit un flux d'air circulant à l'intérieur du séparateur.
- Les palettes du ventilateur aspirent l'air de l'intérieur du cône intérieur et le poussent vers le cône extérieur.
- La matière est généralement alimentée sur le dessus du séparateur.
- Dans certains cas, elle l'est latéralement.
- La matière d'alimentation tombe au-dessus du plateau de distribution.

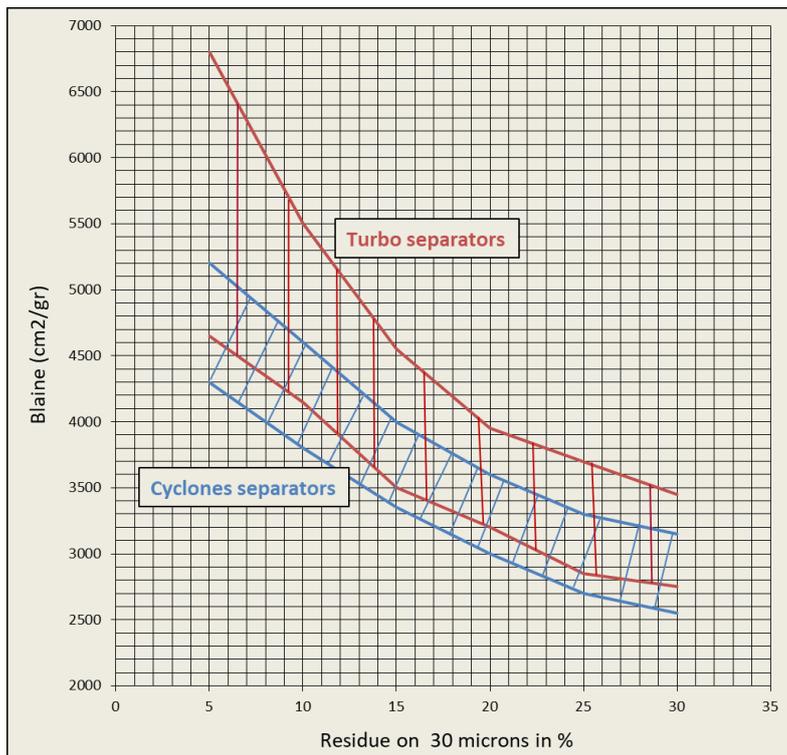
... La suite dans le livre complet

Chapitre 33

Séparateurs de deuxième génération

1. Introduction

- Ces séparateurs sont aussi appelés "séparateurs à cyclones".
- Comme pour la première génération, la matière à classer est dispersée dans la zone de séparation créée par un plateau de distribution.
- Le débit d'air nécessaire à la séparation est produit par un ventilateur externe.
- L'alimentation en matière est réalisée mécaniquement à l'aide de convoyeurs continus appropriés comme les aéroglissières.
- Les fines sont amenées vers des cyclones externes.
- Il y a une entrée d'air frais ainsi qu'une sortie d'air vers un filtre.
- Le ventilateur qui fait circuler l'air est d'une conception plus efficace et a une charge de poussière considérablement réduite.
- Ces séparateurs ont un meilleur rendement de séparation dû au ventilateur externe et aux cyclones.
- Comparaison entre les séparateurs à cyclones et les séparateurs classiques de 1ère génération.
- Le diagramme ci-dessous montre la surface spécifique (Blaine) produite afin d'atteindre un certain pourcentage de résidu sur 30 microns (de Duda Cement Data Book).
- Par exemple, pour obtenir 20% de refus sur 30 μm , un séparateur type turbo a besoin de produire un ciment à 3200-3900 Blaine et un séparateur à cyclones 3000-3600 Blaine.



- Voici une liste non-exhaustive de séparateurs à cyclones:
 - Wedag ZUB (KHD Humboldt Wedag)
 - Cyclopol (ThyssenKrupp Industrial Solutions)
 - SKET

... La suite dans le livre complet

Chapitre 34

Séparateurs de troisième génération

1. Introduction

- Ils sont aussi appelés:

- Séparateurs à cage
- Séparateurs à haut rendement.

- Ces séparateurs ont été développés par plusieurs grands constructeurs au début des années quatre-vingt.

- Mais le premier fut le séparateur O-Sepa qui a été développé à la fin des années 1970 par le bureau des innovations de la compagnie japonaise Onoda Cement Co.

- Comme la deuxième génération, le débit d'air nécessaire à la séparation est produit par un ventilateur externe.

- L'alimentation en matière est réalisée mécaniquement à l'aide de convoyeurs continus appropriés comme des aéroglières.

- Les fines sont véhiculées par l'air dans des cyclones externes ou directement vers un filtre à manches.

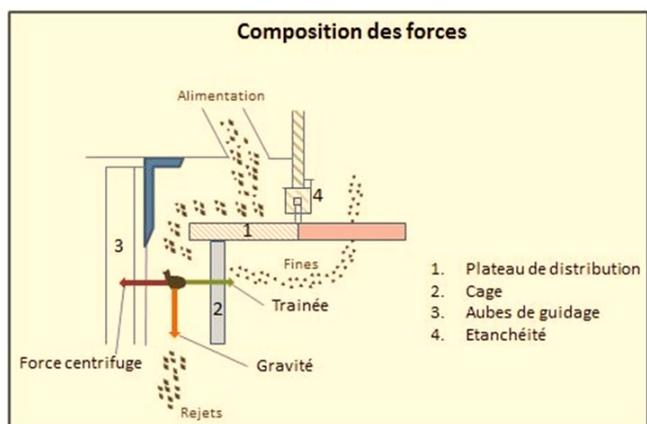
- Le dispositif principal de séparation est un rotor cylindrique.

- Le rotor est comme une cage composée de lames rapprochées.

- Ce rotor est actionné par un entraînement à vitesse variable.

- La vitesse du rotor détermine un tourbillon dans la zone de classification et par conséquent la coupe de séparation.

- La composition des forces agissant dans la zone de séparation est montrée à la figure ci-dessous



- Voici une liste non-exhaustive de séparateurs haut-rendement:

- O'Sepa (FLSmidth)
- Sepol (ThyssenKrupp Industrial Solutions)
- Sepal (FLSmidth)
- SD (Sturtevant)
- Sepmaster (KHD Humboldt Wedag)
- QDK et TGS (Christian Pfeiffer Maschinenfabrik GmbH)
- TSV (Fives FCB)
- O&K (Orenstein & Koppel AG)
- PRESEP VTP (PSP Engineering a.s.)
- CTC SERIES (CEMTEC)
- Cemag Cross Flow (CMP AG)
- ICS et ICV (Intercecm Engineering GmbH)
- XP4 (Magotteaux)
- Copies venues de Chine

... La suite dans le livre complet

Chapitre 35

Refroidissement du ciment dans le séparateur

1. Introduction

- Le ciment quittant le broyeur à boulets a typiquement une température supérieure à 100 °C.
- Et pour cette raison, le ciment a souvent besoin d'être refroidi pour éviter des problèmes ultérieurs dans la ligne de production.
- Un problème que le fabricant de ciment peut rencontrer est la formation de grumeaux dans les silos en raison de la libération de l'eau du gypse (déshydratation).
- Une autre raison pour refroidir le ciment est la procédure de mise en sacs et la manipulation des sacs à plus basse température.
- Le dispositif généralement utilisé est le refroidisseur à ciment qui présente un corps cylindrique et à l'intérieur des tubes avec une recirculation d'eau. Le ciment passe à travers le labyrinthe de tubes (du bas vers le haut) et est refroidi.
- Le refroidisseur de ciment peut diminuer la température du ciment jusqu'à 60°C et a une consommation spécifique de 1 à 1,3 kWh/t de ciment.
- Avant d'investir dans un refroidisseur, il est essentiel de contrôler si le séparateur n'est pas en mesure de remplir cette fonction de refroidissement.

2. Séparateur comme refroidisseur

- Les séparateurs peuvent avoir une bonne capacité de refroidissement ou non en fonction de leurs caractéristiques:

2.1. Séparateurs statiques et cyclones:

- Les séparateurs statiques ne sont pas en mesure de refroidir.
- Il en est de même pour les cyclones.

2.2. Séparateurs de première génération (turbos):

- Ces séparateurs sont conçus avec une circulation d'air interne. Le ventilateur principal est à l'intérieur.
- Dans ces conditions, l'effet de refroidissement est négligeable.
- Dans certains cas, un circuit secondaire d'air frais a été ajouté au séparateur existant, mais la capacité de refroidissement reste limitée.

2.3. Séparateurs de deuxième génération (cyclones):

- Ces séparateurs ont un ventilateur externe, mais la majorité de l'air est recyclé.
- Un circuit d'air frais secondaire est toujours installé, mais n'a pas été dimensionné pour refroidir efficacement le ciment.

2.4. Séparateurs de troisième génération (cage):

- Ce type de séparateur est bien adapté pour le refroidissement, car il y a de grosses quantités d'air qui passent à travers.
- En fait, les circuits de séparateurs varient de l'un à l'autre, mais il y a toujours la possibilité d'ajuster la température de l'air à l'entrée du séparateur.

... La suite dans le livre complet

Chapitre 36

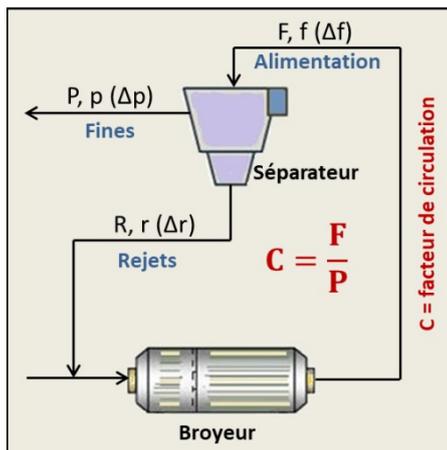
Courbe de Tromp

1. Introduction

- Afin de déterminer les performances d'un séparateur, on utilise en général la courbe dite courbe de Tromp, de séparation ou courbe de sélectivité.
- De cette courbe de Tromp sont générés différents paramètres permettant de comparer le séparateur avec d'autres séparateurs ou une autre génération.
- Nous développerons en détail la courbe Tromp plus loin dans la présentation.
- Un autre outil d'analyse est l'efficacité du séparateur.
- Contrairement à la courbe Tromp qui est basée sur l'analyse des rejets, l'efficacité est basée sur l'analyse des fines du séparateur.
- Pour établir une courbe de Tromp, une prise d'échantillons représentatifs dans le circuit doit être organisée.
- La prise d'échantillons a été décrite au chapitre 14.

2. Retour sur la théorie

- Voici le schéma de base pour introduire la courbe de Tromp:



- En référence au schéma ci-dessus, nous avons:

- F = débit de l'alimentation du séparateur en tonnes/heure
- R = débit des rejets du séparateur en tonnes/heure
- P = débit des fines de séparation en tonnes/heure

- Ainsi que:

- f = le passant à un certain tamis de l'alimentation du séparateur en %
- r = le passant à un certain tamis des rejets du séparateur en %
- p = le passant à un certain tamis des fines du séparateur en %

- Ces pourcentages de passants sont généralement cumulés et sont exprimés en %
- Attention, dans certains cas, cela peut aussi être spécifié en unité de masse (en grammes ou en kilogrammes)

... La suite dans le livre complet

Chapitre 37

Correction Lagrange des résultats d'analyse

1. Introduction

- La prise d'échantillons dans un circuit de broyage est très utile pour plusieurs motifs:
 - Connaître les finesses dans différents points du circuit
 - Etablir une balance de masse du circuit complet
 - Etudier le comportement du séparateur
- Enfin, des prises d'échantillons périodiques dans un circuit de broyeur à boulets sont indispensables pour aider à résoudre les problèmes existants ou pour améliorer les performances de l'installation.
- On sait que le circuit de broyage doit être dans un état stable au moins 2-3 heures avant le début de la campagne d'échantillonnage pour espérer récolter des échantillons représentatifs.
- Malgré ces dispositions, des événements aléatoires peuvent toujours survenir pendant la campagne d'échantillonnage:
 - changement brusque de granulométrie matière fraîche
 - clapets fonctionnant mal
 - manque de matière au point de prélèvement
 - phénomène de pompage dans une aéroglissière
 - erreurs humaines
- De plus, certains circuits de broyage n'ont pas été conçus avec des points de prélèvements bien définis et il est souvent nécessaire de procéder sans trop de visibilité.
- La conséquence de ces imprévus est que les résultats d'analyse peuvent être complètement altérés.
- Il est donc difficile d'analyser la situation.
- Par exemple, le calcul de la courbe de Tromp du séparateur donne une mauvaise corrélation ($< 0,98$).
- Dans ce cas, il existe des méthodes pour reconstituer les échantillons.
- La méthode utilisée ici s'appelle "Correction de Lagrange".
- Bien sûr, la méthode a ses limites et si la corrélation est inférieure à 0,96, il est préférable d'organiser une nouvelle prise d'échantillons.

2. Explication de la méthode

Échantillons du séparateur:

- Alimentation
- Fines
- Rejets

Données de départ:

- Passants cumulés sur chaque tamis de l'alimentation en %
- Passants cumulés sur chaque tamis des fines en %
- Passants cumulés sur chaque tamis des rejets en %

Premier calcul:

- Passants partiels entre chaque intervalle de l'alimentation en %: f_p
- Passants partiels entre chaque intervalle des fines en %: p_p
- Passants partiels entre chaque intervalle des rejets en %: r_p

... La suite dans le livre complet

Chapitre 38

Interprétation de la courbe de Tromp

1. Introduction

- Pour déterminer les performances d'un séparateur, on utilise généralement la courbe Tromp dite courbe de séparation ou courbe de sélectivité.
- C'est probablement le meilleur outil pour évaluer l'efficacité du séparateur.
- Bien sûr, l'étude est réalisée après une prise d'échantillons autour du séparateur et l'analyse des échantillons par diffraction laser.
- Rappelons qu'à partir de la courbe de Tromp, on définit le facteur d'imperfection.
- Ce facteur est calculé à partir de la formule suivante:

$$I = \frac{D75 - D25}{2 \cdot D50}$$

Avec:

I = facteur d'imperfection

D75 = la dimension en μm ayant 75% de probabilité d'aller dans les rejets du séparateur

D25 = la dimension en μm ayant 25% de probabilité d'aller dans les rejets du séparateur

D50 = la dimension en μm ayant 50% de probabilité d'aller dans les rejets du séparateur (•)

(•) D50 est aussi le diamètre de coupure du séparateur

- Plus I est élevé et moins le séparateur est efficace.
- Si le I est très bas, le séparateur est très bon.
- Le séparateur idéal aurait donc un facteur d'imperfection égal à 0, mais ce n'est pas possible.
- L'imperfection se situe dans une plage de 0,1 à plus de 1 pour les séparateurs exécrables...
- Conclusion, il faut donc déterminer D75, D50 et D25 et c'est là que les choses peuvent se compliquer.
- Les choses peuvent se corser pour plusieurs raisons:
 - Les résultats de l'analyse Laser ne donnent pas une bonne corrélation
 - Le by-pass du séparateur est très élevé et on n'a pas de valeur pour D25
 - On n'a pas de valeur pour D75
- Dans tous ces cas-là, il faut extrapoler.
- Par exemple, on peut travailler avec les courbes de tendance dans le calculateur Excel.
- C'est ce que nous allons voir au chapitre suivant.

2. Exemples de courbes de tendance

- Les types de courbes de tendance du calculateur Excel sont au nombre de 6:
 - Exponentielle
 - Linéaire
 - Logarithmique
 - Polynomiale
 - Puissance
 - Moyenne mobile
- Seule la courbe de tendance polynomiale peut être appliquée dans ce cas.
- Il existe des tendances polynomiales du 2ème, 3ème, 4ème, 5ème et 6ème degré.
- Normalement, on choisirait le degré avec la meilleure corrélation.

... La suite dans le livre complet

Chapitre 39

Norme européenne pour les ciments (EN 197 - 1)

1. Introduction

- Tous les documents suivants ont été consultés pour écrire cette présentation:

- EN-197-1_en.pdf
- mortar-cementitious.pdf
- Specifying-constituent-materials-for-concrete-to-bs-en-206_1.pdf
- fiche_conseil_nouvelle_norme_NF_EN_1971_2012.pdf
- CT-G56.pdf
- normes_160904_cle0f133d.pdf
- Leccion4.TiposCEMENTOS.pdf
- INSTRUC_RECEP_CEMENTOS_consolidada.pdf
- Cimento Portland e Adicoes.pdf
- 8_I CEMENTI COMUNI E LA NORMA UNI-EN 197-1_1.pdf

- Ces documents sont facilement téléchargeables sur Internet en copiant les titres ci-dessus.

- La norme EN 197-1 est la première norme adoptée dans le cadre défini par la directive européenne “Produits de construction” qui a fixé les règles permettant la mise sur le marché des produits de construction.

- Cette norme européenne des ciments courants est un texte unique, une base commune pour tous les membres de l’Union européenne.

- Des pays européens ont appelé cette norme EN 197-1 avec leur désignation nationale.

- Quelques exemples ci-dessous:

France	NF EN 197-1 : 2012
Belgique	NBN EN 197-1
Grande-Bretagne	BS EN 197-1
Italie	UNI EN 197-1
Allemagne	DIN EN 197-1
Espagne	UNE-EN 197-1:2011
Portugal	NP EN 197-1:2012
Suisse	SN EN 197-1:2011

- La norme européenne EN 197 - 1 décrit les ciments courants, ainsi que leur composition, leurs spécifications et leurs critères de conformité.

2. Types de ciment et composition

- La norme a réparti les ciments en cinq types:

CEM I	Ciment Portland
CEM II	Ciment Portland composé
CEM III	Ciment de haut fourneau
CEM IV	Ciment pouzzolanique
CEM V	Ciment composé

- Le clinker qui est (presque toujours) le composant principal est défini selon trois lettres.

... La suite dans le livre complet

Chapitre 40

Composants des ciments

1. Introduction

- Cette présentation détaille l'influence des différents composants du ciment sur le processus de broyage.
- On n'abordera donc pas de façon approfondie la fabrication, la chimie ou la minéralogie du ciment et de ses dérivés.
- Il existe un nombre impressionnant de publications, études et autres mémoires qui expliquent en long et en large ces sujets, et généralement très bien rédigés par des experts.
- En fin de présentation, un tableau récapitulatif reprend les avantages et inconvénients des différents composants que l'on peut rencontrer pour obtenir un ciment, et ce d'un point de vue technologie de broyage.
- Les composants qui seront abordés sont:
 - clinker
 - gypse
 - calcaire
 - filler de calcaire
 - pouzzolane
 - laitier
 - cendres volantes
 - poussières de four
- Les conséquences pour les circuits de broyage qui seront abordées sont:
 - consommation spécifique
 - broyeur deux chambres ou mono chambre
 - longueur de 1ère chambre
 - type de blindage de 1ère chambre
 - charge de boulets de 1ère chambre
 - niveau de matière
 - type de blindage de 2ème chambre
 - charge de boulets de 2ème chambre
 - séchage
 - température
 - ventilation
 - comportement séparateur
 - localisation alimentation
 - finesse produit fini
 - répartition granulométrique produit fini

... La suite dans le livre complet

Chapitre 41

Formules de paramètres pour la fabrication du ciment

1. Introduction

- Cette courte présentation afin d'introduire les paramètres typiques du ciment utilisés dans l'industrie cimentière.
- Pratiquement, la proportion des principaux constituants du clinker est calculée sous la forme de ratios, de modules ou d'indices chimiques.
- Ces modules sont le résultat de nombreuses études sur les mécanismes de formation et de réaction du clinker du type Portland.
- Ces modules sont également connus comme des formules de contrôle de qualité.

2. Liste des formules

2.1. Module hydraulique (HM):

- Aussi connu sous le nom de module hydraulique de Michaelis.
- La formule est:

$$\text{Module hydraulique (HM)} = \frac{C_aO}{S_iO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

- HM est généralement compris entre 1,7 et 2,3.

2.2. Module silicique (SR):

- Aussi connu sous le nom de module silicique de Kühl.
- La formule est:

$$\text{Module silicique (SR)} = \frac{S_iO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

- Une valeur élevée correspond à un taux important de silice.
- Une valeur faible nuit à la bonne marche du four.
- SR est généralement compris entre 1,5 et 5.

2.3. Module aluminoferrique (A/F):

- Aussi connu sous le nom de module aluminoferrique de Kühl.
- La formule est:

$$\text{Module aluminoferrique} \left(\frac{A}{F} \text{ or AR} \right) = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

- AR est généralement compris entre 1,5 et 2,5.

... La suite dans le livre complet

Chapitre 42

Broyabilité et tests de broyabilité

1. Introduction

- Ce chapitre est destiné à présenter les principaux tests de broyabilité existant dans l'industrie du ciment.
- Il est évident que ces tests sont largement utilisés, et ce, pour plusieurs raisons.
- Le dimensionnement de nouvelles installations et l'amélioration d'installations existantes exigent de connaître la matière à broyer le mieux possible.
- Un grand nombre de tests de broyabilité ont été élaborés par des ingénieurs spécialisés en broyage, des bureaux de recherche, des universités, des producteurs de ciment ou des fournisseurs d'équipements.
- Certains de ces tests seront développés plus loin.
- Mais avant tout, il est nécessaire de définir la broyabilité d'un matériau comme le clinker.

2. Définition de la broyabilité

- Des dictionnaires sur le Web proposent la définition suivante: "La relative facilité avec laquelle un matériau peut être broyé".
- Une autre définition peut être: "La broyabilité est la mesure de la consommation d'énergie spécifique nécessaire pour réduire une certaine masse de matière d'une taille initiale donnée jusqu'à une taille définie".
- Quelle que soit la définition, une chose est certaine, l'aptitude au broyage d'un matériau dépend de beaucoup de facteurs.
- Par exemple, l'aptitude au broyage du clinker est fonction de sa composition chimique et des conditions de combustion et de refroidissement.
- Tout le monde sait que l'alite (C_3S) est broyé beaucoup plus facilement que la bélite (C_2S).
- Ensuite, un clinker avec un haut taux de saturation en chaux aura une meilleure broyabilité.

3. Tests de broyabilité

- Trois tests très connus sont développés ci-après:
 - Test de Bond
 - Test Hardgrove
 - Test Zeisel

3.1. Test de broyabilité de Bond:

- Le test développé par Fred C. Bond en 1952 et revu en 1961 est largement utilisé dans le monde entier.

3.1.1. Equipement nécessaire:

- Broyeur de laboratoire avec un diamètre de 305 mm (12 ") et une longueur de 305 mm (12"), avec des coins arrondis et un revêtement intérieur lisse.
- Vitesse de rotation du broyeur: 70 tours par minute.
- Charge de boulets:
 - 43 boulets de 36,83 mm
 - 67 boulets de 29,72 mm
 - 10 boulets de 25,4 mm
 - 71 boulets de 19,05 mm
 - 94 boulets de 15,94 mm

... La suite dans le livre complet

Chapitre 43

Dureté et tests de dureté

1. Définition de la dureté

- La définition habituelle vue sur le Web est: "La dureté est la propriété d'un matériau qui lui permet de résister à la déformation plastique, généralement par pénétration".
- Voici une autre définition: "C'est la résistance d'un matériau à la déformation, l'indentation, ou la pénétration par des moyens tels que l'abrasion, le forage, l'impact, le grattage ou l'usure".
- De toute façon, la notion de dureté est différente de celle de broyabilité.
- Un matériau peut être très dur et avoir une bonne broyabilité.
- Au contraire, un matériau peut être très doux et avoir une mauvaise broyabilité.
- Les tests suivants sont présentés dans ce chapitre:
 - Echelle de Mohs pour la dureté des minéraux
 - Tests de dureté par pénétration intensive
 - Test JK chute d'un poids
 - Test de dureté Slegten

2. Echelle de Mohs pour la dureté des minéraux

- Cette échelle a été créée en 1812 par le géologue et minéralogiste allemand Friedrich Mohs.
- L'échelle de Mohs est utilisée pour déterminer la dureté relative des minéraux à partir de dix minéraux bien connus de dureté variable.
- Cette échelle, qui est non linéaire, est graduée de 1 à 10.
- Le 1 étant la plus faible dureté et le 10 la plus haute dureté.
- Le principe de cette échelle est basé sur le fait qu'un minéral peut rayer un autre si sa dureté est plus élevée.
- Échelle de dureté de Mohs:

Minéral	Dureté
Talc	1
Gypse	2
Calcite	3
Fluorine	4
Apatite	5
Orthose	6
Quartz	7
Topaze	8
Corindon	9
Diamant	10



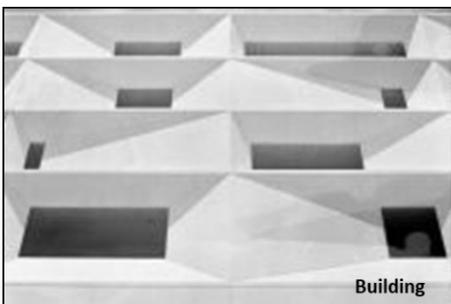
... La suite dans le livre complet

Chapitre 44

Ciment blanc

1. Introduction

- Le ciment blanc est une variété de ciment Portland fabriqué à partir de matières premières soigneusement sélectionnées, de sorte qu'elles ne contiennent pratiquement pas de fer, manganèse, chrome, ou autres matériaux qui peuvent altérer la blancheur.
- Le ciment blanc est considéré comme un produit de luxe.
- Il est utilisé principalement pour des raisons esthétiques en raison de sa blancheur.
- Les applications peuvent être:
 - Ouvrages architecturaux
 - Terrasses
 - Sculptures
 - Revêtement extérieur
 - Éléments de concret
- Quelques photos de l'application:



... La suite dans le livre complet

Chapitre 45

Représentation de la distribution granulométrique

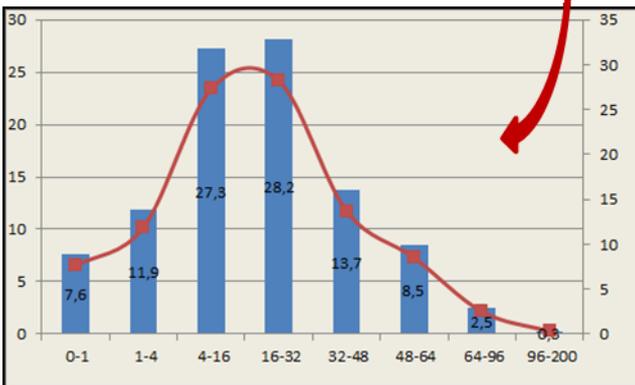
1. Introduction

- L'analyse des échantillons de matériaux dans l'industrie du ciment, soit par tamisage à sec ou humide, ou par diffraction laser est largement étendue.
- Les résultats de ces analyses doivent ensuite être étudiés et interprétés par l'Ingénieur de Procédés.
- On peut tracer un graphique pour les résultats partiels, à savoir les pourcentages partiels de passants (ou résidus) et la dimension des particules.
- Ou, on peut tracer une courbe avec les passants (ou résidus) cumulés dans le but d'analyser la distribution granulométrique de l'échantillon et sa qualité.

2. Résultats partiels

- Des graphiques en forme d'histogrammes ou courbes sont souvent tracés.
- L'axe X est la plage (intervalle) entre deux tamis.
- L'axe Y est le passant partiel en % ou le résidu partiel en %.
- Voir l'exemple ci-dessous:

Tamis en μ	Passants cumulés en %	Intervalle	Passants partiels en %
1	7,6	0-1	7,6
4	19,5	1-4	11,9
16	46,8	4-16	27,3
32	75	16-32	28,2
48	88,7	32-48	13,7
64	97,2	48-64	8,5
96	99,7	64-96	2,5
200	100	96-200	0,3



3. Résultats cumulés

- Ceci est la partie la plus intéressante de la présentation.
- Les graphiques sont toujours des courbes.
- L'axe X est la dimension des particules.

... La suite dans le livre complet

Chapitre 46

Surface spécifique Blaine

1. Introduction

- La finesse du ciment est exprimée soit en termes de distribution granulométrique (PSD) avec des résidus (ou passants) sur le tamis de référence ou par sa surface spécifique Blaine.
- Dans cette présentation, nous allons développer la méthode Blaine qui est la plus largement utilisée dans le monde du ciment.
- Comme on le sait, le ciment contient des grains (particules) de grosseurs et de formes très différentes.
- Le diamètre peut varier entre moins de 1 μ jusqu'à environ 100 μ .
- Parmi ces particules, ce sont les plus petites qui offrent la plus grande surface par rapport au volume.
- Ce sont donc ces petites particules qui, lors du gâchage, présentent les plus nombreux contacts avec l'eau et participent le plus activement aux phénomènes de prise et de durcissement.
- On peut aussi affirmer que la surface totale des particules de ciment est inversement proportionnelle à leur diamètre.
- Si l'on pose les deux conditions suivantes:
 - Toutes les particules ont le même diamètre
 - Toutes les particules sont des sphères
- On a le tableau ci-après:

Caractéristiques des particules								
Diamètre			Surface	Volume	Densité	Poids	Nombre	Blaine
mm	cm	microns	cm ²	cm ³	g/cm ³	g	pour 1 g	cm ² /g
0,1	0,01	100	0,000314159	5,23599E-07	3,15	0,000001649336	606305	190
0,01	0,001	10	3,14159E-06	5,23599E-10	3,15	0,000000001649	606304545	1905
0,005	0,0005	5	7,85398E-07	6,54498E-11	3,15	0,000000000206	4850436361	3810
0,001	0,0001	1	3,14159E-08	5,23599E-13	3,15	0,000000000002	606304545112	19048

- Le tableau suivant donne donc le diamètre pour des valeurs Blaine usuelles, toujours avec les 2 hypothèses ci-dessus:

Blaine	Diamètre
cm ² /g	microns
3000	6,3
3500	5,4
4000	4,8
4500	4,2
5000	3,8

- Comme nous l'avons vu dans les tableaux précédents, le Blaine est une mesure de surface par poids.
- L'unité la plus utilisée est le cm²/g.

2. Valeurs usuelles de Blaine dans le broyeur à ciment

- Nous allons maintenant passer en revue les valeurs Blaine que l'on rencontre normalement dans un circuit de broyage.

... La suite dans le livre complet

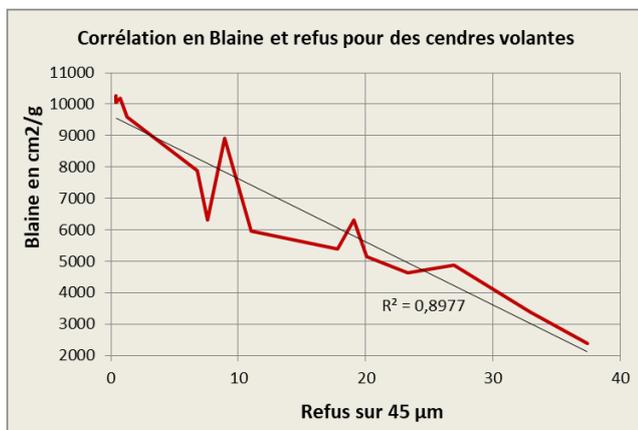
Chapitre 47

Correspondance entre Blaine et résidus

1. Introduction

- Cette petite présentation va détailler la relation entre la finesse Blaine et le résidu sur un tamis donné d'un ciment Portland.
- D'autres matières comme le cru (farine de four) ou les cendres volantes seront mentionnées en exemple.
- A la question de savoir s'il y a une relation directe entre le Blaine et le résidu, la réponse est OUI.
- Lorsque le Blaine augmente, le résidu sur un tamis donné diminue.
- Au contraire, si le Blaine diminue, le résidu sur un tamis donné augmente.
- Et il y a les exceptions qui confirment la règle.
- Voici un exemple de bonne relation entre le Blaine et le résidu pour des cendres volantes:

Refus sur 45µ	Blaine en cm2/g
0,4	10260
0,4	10040
0,7	10190
1,3	9590
6,8	7880
7,6	6320
8,9	8910
11	5970
17,8	5380
19,1	6320
20,1	5150
23,3	4620
26,9	4880
32,9	3380
37,4	2370



- On voit que la corrélation (R²) est pratiquement égale à 0,9.
- Ce qui est exceptionnel pour ce genre d'essais.

2. Blaine

- Petit rappel sur la finesse Blaine.
- La finesse du ciment est mesurée en tant que surface spécifique.
- On l'appelle la surface spécifique Blaine.
- La surface spécifique est exprimée par l'aire totale de la surface en centimètres carrés de toutes les particules de ciment se trouvant dans un gramme de ciment.
- Les unités utilisées sont généralement: cm²/g et aussi m²/Kg

... La suite dans le livre complet

Chapitre 48

Formules de variation de débit

1. Introduction

- Différentes formules ont été développées pour calculer le débit prévu d'un broyeur à ciment ou à cru lorsque la finesse Blaine ou le résidu de référence est augmenté ou diminué.
- Ces formules peuvent être considérées comme relativement fiables pour des changements raisonnables de finesse.
- Au contraire, si la nouvelle finesse Blaine ou le nouveau résidu de référence est très différent, les tests de laboratoire seront nécessaires pour obtenir une réponse plus proche de la réalité.
- Voici ci-dessous, certaines formules utilisées dans l'industrie du ciment pour prédire la production en fonction d'une modification de finesse Blaine ou résidu.
- Cette liste n'est pas exhaustive.

2. Production en fonction du Blaine

2.1. Première formule:

$$P_2 = \frac{P_1}{e^{\frac{(B_2 - B_1) \times 0,49}{1000}}}$$

2.2. Deuxième formule:

- C'est la première formule sous une autre forme.

$$P_2 = \frac{P_1}{10^{\left(\frac{B_2 - B_1}{1000}\right) \times 0,213}}$$

2.3. Troisième formule:

$$P_2 = P_1 \times \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{1,3}$$

- Cette formule est bien acceptée pour des valeurs Blaine comprises entre 2700 et 3200 cm²/g.

2.4. Quatrième formule:

$$P_2 = P_1 \times \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{1,6}$$

- Cette formule est bien acceptée pour des valeurs Blaine supérieures à 3200 cm²/g.
- Une remarque importante pour les troisième et quatrième formules, elles sont également utilisées pour définir la nouvelle production d'un séparateur classique ou un séparateur à haute efficacité:
 - Exposant 1,3 pour séparateur haute efficacité
 - Exposant 1,6 pour séparateur conventionnel

... La suite dans le livre complet

Chapitre 49

Broyage du calcaire

1. Le calcaire

- Voici quelques petits rappels.
- Qu'est-ce que le calcaire?
- Carbonate de calcium - CaCO_3
- Le calcaire peut être:
 - riche: 90-100 de CaCO_3
 - pauvre
- Autres éléments: SiO_2 (quartz), Al_2O_3 , Fe_2O_3 ...
- Importance de la teneur en SiO_2 (silice libre) pour:
 - usure - choix des alliages (boulets et blindages)
 - dureté - composition de la charge broyante

2. Différentes applications de la poudre de calcaire

- Les principales applications sont:
 - Pour l'industrie chimique, les cosmétiques, l'industrie pharmaceutique, l'agriculture...
=> broyage fin (moins de 1% de résidu sur 90μ)
 - Pour l'industrie cimentière (pour produire le clinker)
=> broyage grossier (10-20% de résidu sur 90μ)

3. Différents types de broyage

- Les 2 types de broyage sont:
 - voie humide
 - voie sèche

3.1. Voie humide:

- Les avantages sont:
 - basse consommation énergétique
 - simplicité d'installation
- En circuit ouvert:
 - le produit fini est le produit à la sortie du broyeur
 - Adopter un L/D de 3,5 - 4 pour obtenir un meilleur temps de rétention dans le broyeur
- En circuit fermé:
 - avec des hydrocyclones

3.1. Voie sèche:

- Généralement adoptée dans le monde entier.
- A partir de maintenant, nous parlerons seulement des circuits en voie sèche.

... La suite dans le livre complet

Chapitre 50

Technologie de broyage du charbon

1. Introduction

- Les combustibles nobles sont le charbon, le mazout et le gaz naturel.
- En raison de l'augmentation des prix du pétrole au cours des dernières décennies, l'utilisation du charbon comme source d'énergie primaire dans l'industrie du ciment a augmenté dans de grandes proportions.
- Pour des raisons de sécurité, du charbon grossier est toujours fourni sur place.
- Ensuite, une installation de broyage/séchage est nécessaire pour convertir le charbon en combustible utile.
- Avant de choisir et de dimensionner le circuit de broyage du charbon, nous devons prendre en considération les facteurs suivants:
 - La qualité du charbon
 - Sources d'air chaud pour le séchage du charbon
 - Nombre de points de consommation de carburant
 - Type de four et espace disponible, en particulier lors de l'installation d'un nouvel atelier près d'un four existant
 - Systèmes de sécurité industrielle
- En ce qui concerne les machines et le système, un choix doit être fait entre:
 - Le broyeur à boulets ou le broyeur vertical
 - Le système d'alimentation direct ou indirect
 - Le fonctionnement du système dans un environnement inerte ou non-inerte
 - Le filtre à manches ou l'électrofiltre pour le dépoussiérage
- Ces points seront analysés dans les chapitres suivants.

2. Types de charbons

2.1. Introduction:

- Le charbon est une roche facilement combustible contenant plus de 50 pour cent en poids de matériau carboné formé du compactage et de l'induration de végétaux diversement altérés et similaires à la tourbe.
- Voir la classification du charbon ci-après.

2.2. Classification du charbon:

- Le charbon peut être classé en quatre catégories:
 - la tourbe
 - le lignite
 - les bitumineux
 - l'anhracite

... La suite dans le livre complet

Chapitre 51

Capacités de séchage

1. Introduction

- Le séchage est une opération importante dans les cimenteries.
- La matière brute provenant de la carrière contient souvent un certain pourcentage d'humidité qui doit être éliminé afin d'éviter d'éventuels problèmes dans le transport et la manipulation, et la génération de vapeurs qui peuvent obstruer les équipements auxiliaires.
- Tout cela sans parler des problèmes pour broyer cette matière en voie sèche.
- Les problèmes d'humidité existent aussi pour les broyeurs à ciment, mais rarement, dans le cas d'un composant comme le calcaire ou pouzzolane.
- Il est généralement admis qu'à partir de 1% d'humidité, chaque augmentation de 1% entraîne la chute du rendement de broyage de l'ordre de 10%.

2. Types de méthodes de séchage

- Il existe deux types de méthodes de séchage:
 - dans un équipement spécialement conçu pour cet usage
 - ou directement dans le broyeur
- Dans ce dernier cas, le système sera alors appelé broyeur/sécheur.

2.1. Equipements externes:

- Les plus fameux sont les sécheurs rotatifs.
- Les sécheurs rotatifs sont utilisés pour sécher des matières humides ou des poudres.
- Le charbon étant un matériau typique pour cette application.
- Le sécheur rotatif se compose d'un tambour rotatif avec des releveurs qui soulèvent la matière pendant la rotation du tambour de séchage.
- Ensuite, la matière tombe dans le courant d'air chaud circulant à travers le tambour.
- La vitesse du tambour est normalement comprise entre 2 et 6 tours par minute et son inclinaison est de 3 à 6 degrés.
- Certains sécheurs rotatifs ont l'entrée des gaz chauds à la sortie de la matière.

... La suite dans le livre complet

Chapitre 52

Systemes de pré-broyage

1. Introduction

- Les systèmes de pré-broyage sont apparus dans les années 80.
- Les premières machines installées ont été les presses à rouleaux.
- Très vite, ces systèmes ont connu un grand succès malgré les problèmes initiaux d'usure des rouleaux.
- Cinq ans après son apparition, on comptait déjà pas moins de 300 de ces presses dans le monde entier.
- Le succès de la presse à rouleaux est dû entre autre:
 - aux coûts d'investissement relativement bas pour un flowsheet simplifié
 - aux économies d'énergie significatives qui peuvent être réalisées avec cette technologie
- On sait que le rendement énergétique du broyeur à boulets est désespérément bas, entre 3 et 5%.
- Même en l'optimisant au maximum, l'augmentation de production restera toujours limitée.
- Les systèmes de pré-broyage apportent donc une solution plus que satisfaisante lorsqu'il faut augmenter radicalement la production d'installations de broyage existantes.
- Lors de cette étude, deux types de machines seront analysés:
 - La presse à rouleaux
 - Le concasseur à axe vertical
- En gros, les gains réalisés avec ces deux machines sont les suivants:

Machine	Sigle	Fournisseurs principaux	Gain de production	Gain énergétique
			en %	en %
			t/h	kWh/t
Concasseur à axe vertical	VSI	Barmac	15-30	5-20
		Canica		
		MagImpact		
Presse à rouleaux	HPGR	Polysius	20-100	10-40
		KHD		
		FLSmidth		

2. Concasseur à axe vertical

2.1. Introduction:

- Le concasseur à axe vertical a d'abord été développé pour les carrières.
- C'est, en effet, une machine très performante pour donner une bonne granulométrie et une forme adéquate aux granulats utilisés dans la construction civile.
- De plus, comme le concasseur est très compact, des solutions avec des systèmes mobiles sur roue peuvent être proposées.
- Plus tard, le concasseur à axe vertical s'est révélé être une alternative prometteuse aux presses à rouleaux qui se démenaient toujours avec des problèmes graves d'usure précoce et de casse des rouleaux.
- Mais, le clinker est un matériau très abrasif et les parties internes du concasseur (éjecteurs) ont également connu des problèmes d'usure prématurée.
- En outre, et contrairement à la presse à rouleaux, l'augmentation de production reste toujours limitée.
- Conclusion, l'utilisation de cette solution en cimenterie, et particulièrement pour le pré-broyage du clinker, est toujours restée sporadique.

... La suite dans le livre complet

Chapitre 53

Systemes de contrôles des broyeurs

1. Introduction

Dans le passé, lorsque les broyeurs à ciment étaient en circuit ouvert, la conduite de l'installation s'opérait pratiquement toujours de façon manuelle, sans aucun système de contrôle ou asservissement quelconque.

- En circuit ouvert, la tâche de l'opérateur en salle de contrôle se réduisait au strict minimum, c'est-à-dire augmenter ou diminuer le débit en fonction de la finesse du produit fini.

- En réalité, c'est un peu plus compliqué que cela, mais il n'y avait pas de besoin impérieux de développer des instruments de contrôle comme c'est le cas aujourd'hui.

- En effet, les circuits de broyage en circuit fermé sont devenus de plus en plus complexes avec l'adjonction de séparateurs hauts-rendements et de systèmes de pré-broyage.

- Les grandeurs mesurées sont nombreuses et la conduite en salle de contrôle est devenue fastidieuse.

- Il n'est donc pas rare de voir des opérateurs mettre leur broyeur en sous-régime de façon à éviter tout problème.

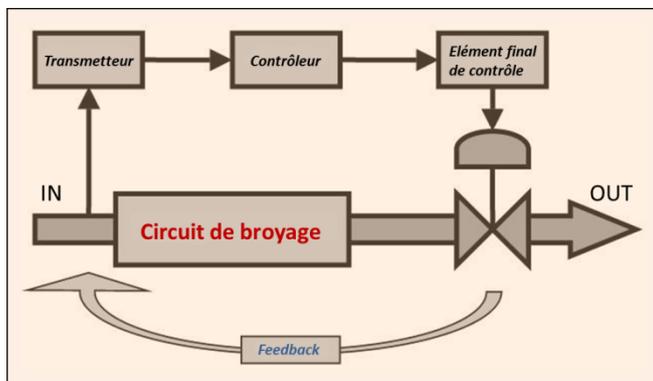
- C'est une réaction humaine et tout le monde le ferait!

- Des systèmes de contrôle de plus en plus sophistiqués ont donc été développés pour permettre:

- de réaliser des opérations trop complexes ou délicates ne pouvant être confiées à l'homme
- de se substituer à l'opérateur pour des tâches répétitives
- d'accroître la précision du système
- d'améliorer la stabilité du circuit de broyage
- de garantir la qualité du produit fini
- d'atteindre et garder un débit optimum de l'installation

- Et en fin de compte, augmenter la production du broyeur et diminuer sa consommation spécifique.

- Le schéma suivant montre un exemple de contrôle parmi tant d'autres:



- Les avantages de l'automatisation d'un circuit de broyage sont donc les suivants:

- **La sécurité:** Maintenir le débit à l'intérieur d'une plage qui assure la sécurité du système.
- **La stabilité:** Maintenir le débit à une valeur constante, et ce, malgré les perturbations qui peuvent affecter le procédé.
- **L'optimisation:** Maintenir le débit à une valeur supérieure à celle qu'elle aurait été sans automatisation.
- **La qualité:** Amener précisément le débit à la valeur désirée de façon à assurer la qualité du produit final.
- **La répétitivité:** Permettre d'effectuer des tâches répétitives à intervalles réguliers.
- **La reproductibilité:** Effectuer une séquence d'opérations sans requérir à l'intervention humaine.

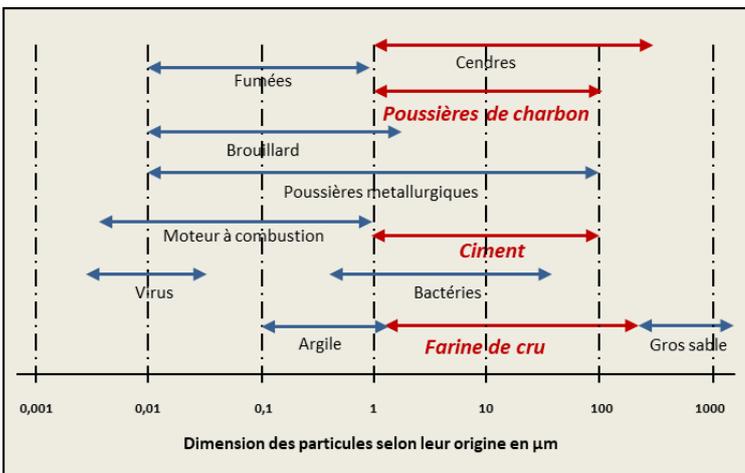
... La suite dans le livre complet

Chapitre 54

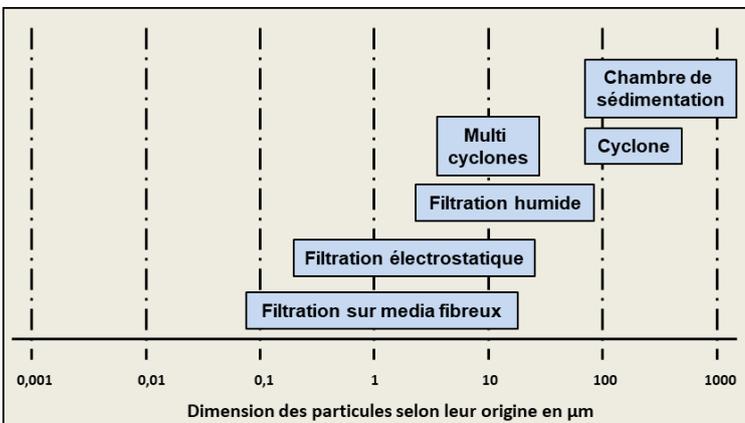
Filtres dans les circuits de broyage

1. Introduction

- Nous ne reviendrons pas sur l'importance de la filtration en milieu industriel et notamment en cimenterie.
- La filtration, que nous appellerons aussi dépeussierage, poursuit plusieurs objectifs dans les installations de broyage de cimenteries:
 - Maintenir les équipements propres pour éviter des problèmes mécaniques (colmatage, blocage...) et de process
 - Récupérer des matières qui sont soit ajoutées au produit fini, soit retournent dans le circuit de broyage
 - Renvoyer à l'atmosphère un air propre et qui répond aux normes gouvernementales de chaque pays
- Le tableau ci-dessous donne une idée de la grandeur des particules à récupérer suivant le type d'application:



- Il existe plusieurs types de filtration:
 - Filtration par gravité: chambre de sédimentation
 - Filtration mécanique: gravité, inertie, force centrifuge (cyclone)
 - Filtration humide (scrubber): captage des particules dans une phase liquide
 - Filtration sur media fibreux (filtres à manches)
 - Filtration électrostatique: champ électrique (électrofiltre)
- Le tableau ci-après donne une idée du champ d'application de ces différents types de filtration:



... La suite dans le livre complet

Chapitre 55

Ventilateurs dans le broyage du ciment

1. Introduction

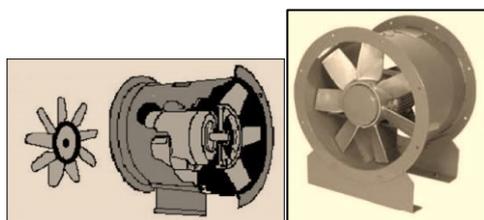
- Les ventilateurs sont largement utilisés dans des applications industrielles telles que l'industrie du ciment comme la ventilation, la manutention, les chaudières, la réfrigération, la collecte des poussières, les applications de refroidissement et autres.
- Les ventilateurs sont donc très fréquents dans le broyage du ciment.
- Ils sont utilisés aux fins suivantes:
 - Permettre des capacités de séchage pour les broyeurs à cru
 - Transporter la farine crue de broyeurs type air swept
 - Systèmes de dépoussiérage pour les auxiliaires avec la présence de filtres
 - Dépoussiérage des broyeurs à ciment avec un filtre
 - Dépoussiérage et transport du ciment à partir du séparateur vers un filtre
 - Permettre la bonne quantité de recirculation d'air dans un circuit de séparation de 3ème génération
- La liste ci-dessus n'est pas exhaustive.
- Dans les chapitres suivants, nous allons discuter plus profondément de ces ventilateurs.
- Mais avant cela, nous devons définir ce qui est un ventilateur.

2. Définition

- Les ventilateurs sont des machines rotatives capables de déplacer une masse d'air donnée, créant une certaine pression, suffisante pour supporter la chute de pression qui se produit à travers les conduits de circulation.
- Les ventilateurs tombent sous la classification générale des turbomachines, comme les pompes.
- Les ventilateurs sont similaires à bien des égards à des pompes.
- Les deux sont des turbomachines qui transfèrent l'énergie à un fluide en écoulement.
- Il est facile de faire la distinction entre les ventilateurs et les pompes, les pompes manipulent des fluides, les ventilateurs manipulent les gaz et principalement l'air.
- Les ventilateurs sont composés de:
 - Élément tournant
 - Support
 - Moteur
- L'élément tournant est la partie principale du ventilateur et peut être une hélice ou une turbine.

3. Classification des ventilateurs

- Il existe essentiellement deux types de ventilateurs différents.
- Les ventilateurs axiaux:



... La suite dans le livre complet

Chapitre 56

Tamis vibrants inclinés

1. Introduction

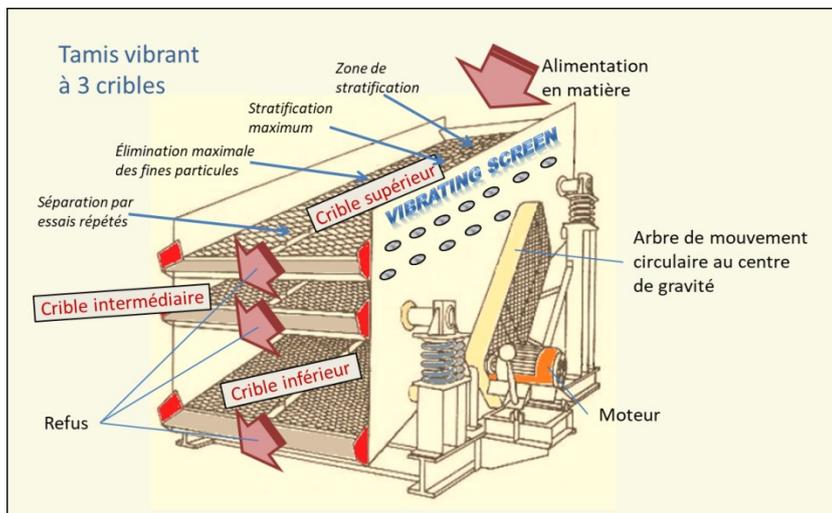
- Le criblage ou tamisage est défini comme le procédé mécanique qui accomplit une division de particules au travers d'un tamis.
- Il existe plusieurs types de procédés et donc d'appareils pouvant réaliser cette opération.
- Dans cette présentation, nous nous limiterons à parler d'un seul type d'appareil: le tamis vibrant.
- Le tamis vibrant est très répandu en milieu minier, en carrière, mais également dans l'industrie cimentière.
- On le retrouve très souvent dans les circuits primaire, secondaire et tertiaire des installations de concassage.
- Plus récemment, le tamis vibrant était proposé dans les circuits de pré-concassage pour augmenter la production des broyeurs à cru et à ciment.
- C'est plutôt pour ce genre d'application qu'est destiné ce document.

2. Données générales

- L'inclinaison varie de 15° à 25° (typiquement 20°).
- La vitesse de rotation typique de l'arbre est de 650 à 1100 t/min (fréquence de vibration).
- Le diamètre du mouvement circulaire se situe entre 3,2mm (1/8") et 16mm (5/8").
- La force d'accélération du tamis se situe entre 3,5 G et 4,5 G.
- La vitesse d'avancement est entre 1200 m/h (75 fpm) et 2400 m/h (125 fpm).
- Le rendement se situe entre 80% et 95%.

3. Principe de fonctionnement

- Le principe de fonctionnement est illustré dans la figure ci-dessous:



- La matière est alimentée par la partie supérieure du tamis.
- L'alimentation doit être optimisée pour se répandre sur toute la largeur.
- L'illustration ci-après montre une mauvaise alimentation, puisqu'une bonne partie du tamis est vide.

... La suite dans le livre complet

Chapitre 57

Transporteurs à bande

1. Introduction

- Les transporteurs à bande sont les dispositifs les plus courants pour le transport principalement horizontal.
- Ils sont constitués par une bande sans fin qui passe sur une série de rouleaux qui font office soit de support, soit de guide pour la matière transportée.
- On distingue différents types de bandes:
 - Bandes de toile et caoutchouc
 - Bandes de fibres naturelles et synthétiques
 - Bandes d'acier
 - Bandes de treillis métallique
- A la partie inférieure, la bande est toujours plane, tandis qu'à la partie supérieure, elle est soit plane soit concave.
- La disposition plane est réalisée par des rouleaux horizontaux, tandis que la disposition concave, quand c'est le cas, est réalisée avec des rouleaux opportunément inclinés.
- L'alimentation de la bande transporteuse est réalisée au moyen de trémies appropriées à une extrémité de la partie supérieure de la bande.
- La décharge est quant à elle disposée à l'autre extrémité, habituellement du côté de la poulie d'entraînement.
- Avec ce type de convoyeur, on peut facilement transporter des centaines de tonnes de matière à l'heure (voire des milliers) sur des kilomètres de distance, surtout en ce qui concerne la matière venant de la carrière.
- Seuls, les gros camions de chantier peuvent concurrencer le transporteur à bande.
- Généralement, les bandes sont horizontales, mais on peut aussi les prévoir inclinées si besoin.
- Dans ce cas, l'angle d'inclinaison doit être inférieur au coefficient de friction entre le matériau et la bande pour éviter un glissement de la matière sur la bande.
- La largeur de la bande est souvent entre 0,3 et 2,4 m.
- La vitesse de la bande peut varier de 0,25 à 3 m/s selon la largeur de bande et le type de matière.
- Voici une vue d'un transporteur à bande:



- Dans le cas d'une installation de broyage de cimenterie, l'alimentation du broyeur (ou du système de pré-broyage) est très souvent réalisée par un transporteur à bande, soit horizontal, soit incliné.

2. Avantages du transporteur à bande

- Une large gamme de matériaux peut être traitée alors qu'ils posent problème dans d'autres moyens de transport.
- Le convoyeur à bande peut être utilisé pour un matériau abrasif, humide, sec, collant ou plein d'impuretés.
- Une plus grande capacité peut être traitée à un coût nettement inférieur par tonne-kilomètre.
- Des bandes transporteuses ayant une capacité de 11000 t/h et plus peuvent être installées pour correspondre à une exploitation minière de plus grande capacité.
- A ce titre, des bandes jusqu'à 2500 mm de large sont utilisées dans l'industrie minière.

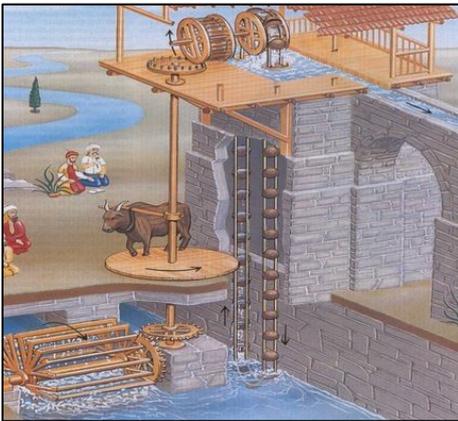
... La suite dans le livre complet

Chapitre 58

Élévateurs à godets

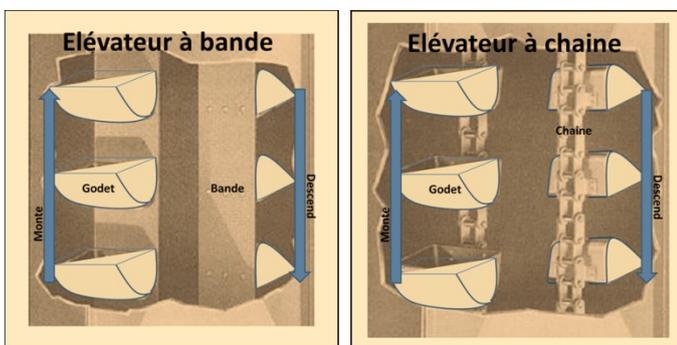
1. Introduction

- Les élévateurs à godets sont des équipements spécialement adaptés au transport vertical de matières de tout type (granuleux et pulvérulents).
- Ils sont beaucoup utilisés en cimenterie et particulièrement pour:
 - le transport de matière de la sortie d'un système de pré-broyage jusqu'à l'entrée d'un séparateur quand il existe
 - le transport du ciment de la sortie du broyeur jusqu'au séparateur
 - le transport du ciment fini jusqu'à l'entrée du silo de stockage
- L'élévateur à godets peut élever la matière de quelques mètres jusqu'à plus de 150 mètres et sa capacité peut atteindre plus de mille tonnes à l'heure.
- Il est sans aucun doute le moyen de manutention vertical le moins coûteux en énergie et le plus efficace, avec un entretien relativement limité.
- Les élévateurs à godets ont été développés depuis très longtemps.
- Voici une photo d'un élévateur à godets dans l'antiquité:



2. Types d'élévateurs à godets

- Les godets sont fixés soit sur des chaînes, soit sur une bande (voir illustrations ci-dessous).



- Dans cette présentation, nous développerons principalement les systèmes à bande largement utilisés en milieu cimentier.
- On distingue généralement 3 types suivant le mode de décharge.
- Ces trois types sont décrits ci-après.

... La suite dans le livre complet

Chapitre 59

Aérogliissières

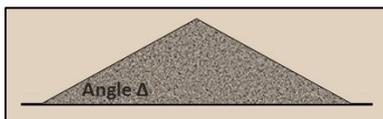
1. Introduction

- Les aérogliissières sont un moyen de transport bien adapté aux matériaux en poudre.
- On les trouve dans tous les secteurs d'une cimenterie et particulièrement dans les installations de broyage, surtout autour du séparateur.
- C'est un moyen de transport fiable, relativement économique et a un potentiel de développement certain.
- Ci-dessous, une photo d'une aérogliissière:



2. Historique du système

- Le système de transport par air fluidisé est une solution aux problèmes rencontrés avec les systèmes de transport par gravité.
- En effet, lorsque l'on voulait faire écouler de la matière d'un point A à un point B, on faisait face à l'angle de talus naturel de la matière (angle of repose en anglais).
- L'angle de talus naturel est l'angle obtenu lorsque la matière est en état d'équilibre permanent.
- C'est-à-dire, lorsque la matière prend naturellement une pente constante par rapport au plan horizontal.
- On parle alors de pente de talus naturelle, souvent notée angle Δ .
- Voir la figure ci-dessous:



- Angle de talus naturel pour certaines matières:

Matière	Angle de talus naturel
Ciment Portland	30°-44°
Ciment aéré	10°-20°
Clinker	25°
Fly ash	42°
Anthracite < 3mm	20°
Calcaire < 3mm	33°

- Pour résoudre le problème d'écoulement, il fallait donc dessiner des convoyeurs avec une pente supérieure à celle de l'angle de talus naturel de la matière, ce qui compliquait l'implantation.
- C'est pour ce motif qu'ont été inventés les systèmes par fluidisation de matière.
- Comme on le voit dans le tableau ci-dessus, l'angle de talus naturel du ciment a grandement diminué lorsqu'il est aéré!

... La suite dans le livre complet

Chapitre 60

Convoyeurs à vis

1. Introduction

- Également appelée vis sans fin, ou vis d'Archimède, le convoyeur à vis est un système de transport de matières en poudre particulièrement adapté pour traiter, à faible vitesse angulaire, des débits élevés.
- La vis sans fin est un des plus anciens types de transporteurs industriels et peut tout simplement être illustrée par un...tire-bouchon!



- Elle se compose d'une hélicoïde qui, en tournant sur son propre axe, exerce une composante de poussée axiale sur le matériau contenu dans le tuyau transporteur en U.
- Les avantages du transporteur à vis sans fin sont:
 - Possibilité de débits élevés
 - Capacité d'accepter des produits à des températures élevées
 - Également adapté pour les transports inclinés et verticaux
 - Chargement et déchargement en n'importe quel point de la vis
- Dans une installation de broyage de cimenterie, on retrouve souvent ce type de convoyeurs à la décharge des filtres à manches.
- Ci-dessous, une illustration d'une vis sans fin:



... La suite dans le livre complet

Chapitre 61

Solutions pour Augmenter le Rendement d'une Installation de Broyage

1. Introduction

- Tout le monde sait que l'industrie du ciment est une grande consommatrice d'énergie.
- La production mondiale de ciment était d'environ 4 milliards de tonnes en 2015.
- Si l'on prend une moyenne de 110 kWh pour produire 1 tonne de ciment, cela signifie une consommation d'électricité d'environ 440 milliards de kWh.
- Considérant que les départements de broyage sont responsables de 65% de la consommation totale (23% farine crue et 42% de ciment), il est alors nécessaire d'optimiser ces installations!
- Le parc mondial est divisé en quatre types de machines de broyage:
 - Broyeurs à boulets
 - Presses à rouleaux
 - Broyeurs verticaux
 - Broyeurs horizontaux
- Nous pouvons le voir sur le tableau ci-dessous l'efficacité de broyage estimée pour chaque type:

Type de machines de broyage	Rendement de broyage
Broyeur à boulets	5%
Presse à rouleaux	15%
Broyeur vertical	10%
Broyeur horizontal	15%

- Le rendement de broyage de ces machines est très faible et la plus grande partie de l'énergie fournie par la puissance absorbée de ces équipements est perdue en chaleur, vibration, usure par frottement ou bruit acoustique.
- Le tube broyeur est le moins efficace, mais est toujours l'équipement le plus répandu dans le monde en dépit de l'émergence de dispositifs plus efficaces comme le broyeur vertical.
- Et il est aussi communément admis qu'il existe encore un fort potentiel d'améliorations possibles concernant les broyeurs à boulets.
- Nous allons maintenant passer en revue toutes les solutions pour améliorer un circuit de broyeur à boulets.
- Voici la liste:
 - Augmenter le degré de remplissage
 - Blindage releveur adéquat en chambre 1
 - Cloison intermédiaire réglable
 - Blindage classant en deuxième chambre
 - Charge broyante adaptée
 - Passage de circuit ouvert en circuit fermé
 - Séparateur à haute efficacité
 - Système de concassage avant broyeur
 - Système de Pré-broyage
 - Contrôle automatisé
 - Maintenance prédictive
 - Adjuvants de mouture

... La suite dans le livre complet

Chapitre 62

Dimensionnement d'une installation de broyage

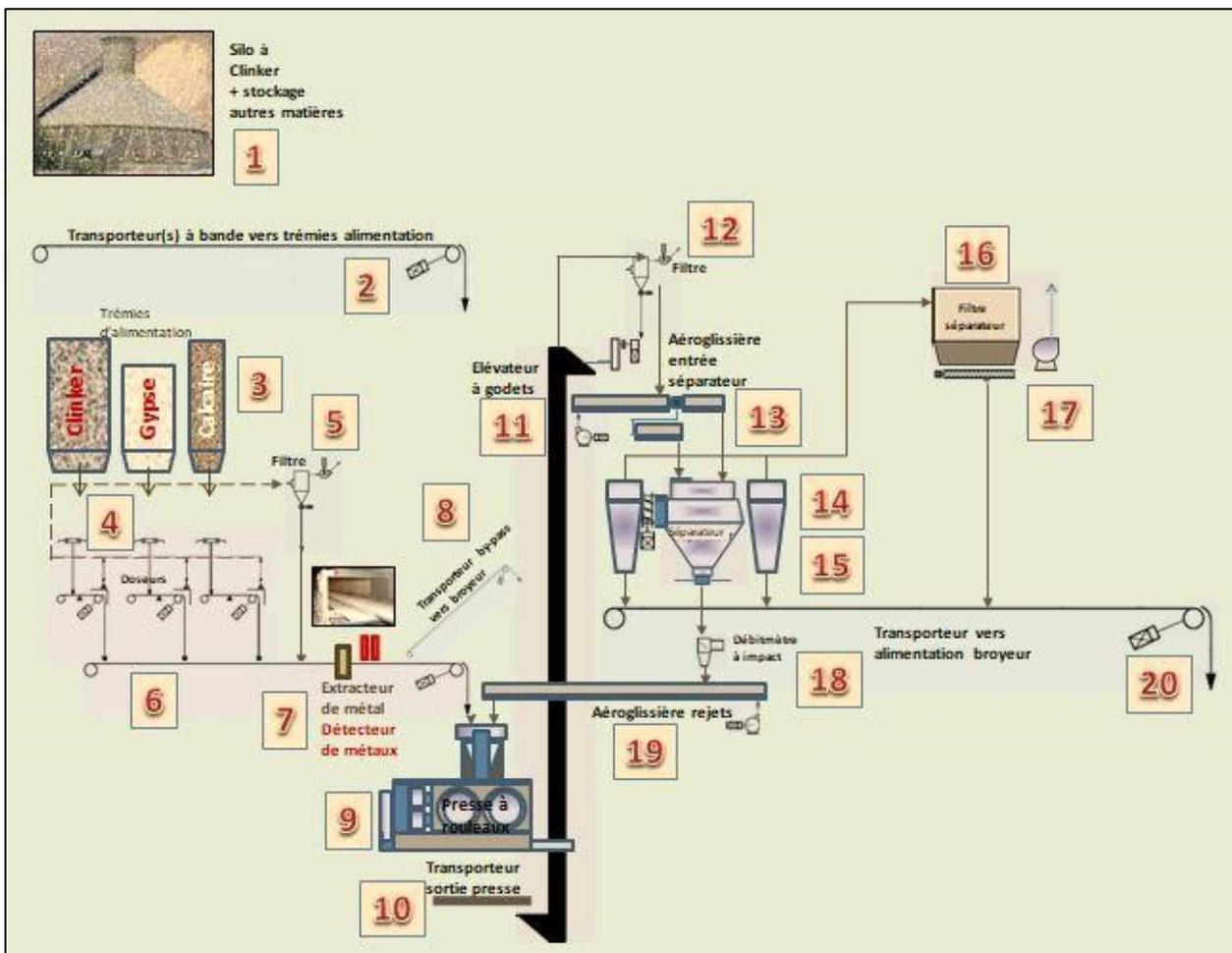
1. Introduction

- Ce chapitre introduit la notion de dimensionnement d'équipements d'un circuit de broyage ciment.
- Le but n'est pas de substituer un bureau d'ingénierie ou tout autre fournisseur de matériel et d'usines clé en main, mais de donner une idée initiale de la dimension du broyeur et de ses auxiliaires.

2. Liste non-exhaustive des équipements à dimensionner

2.1. Flowsheets de l'installation:

- Il s'agit d'un circuit équipé d'un système de pré-broyage semi-fini.
- Le flowsheet est divisé en 2 parties.
- Le premier flowsheet représente le système de pré-broyage:



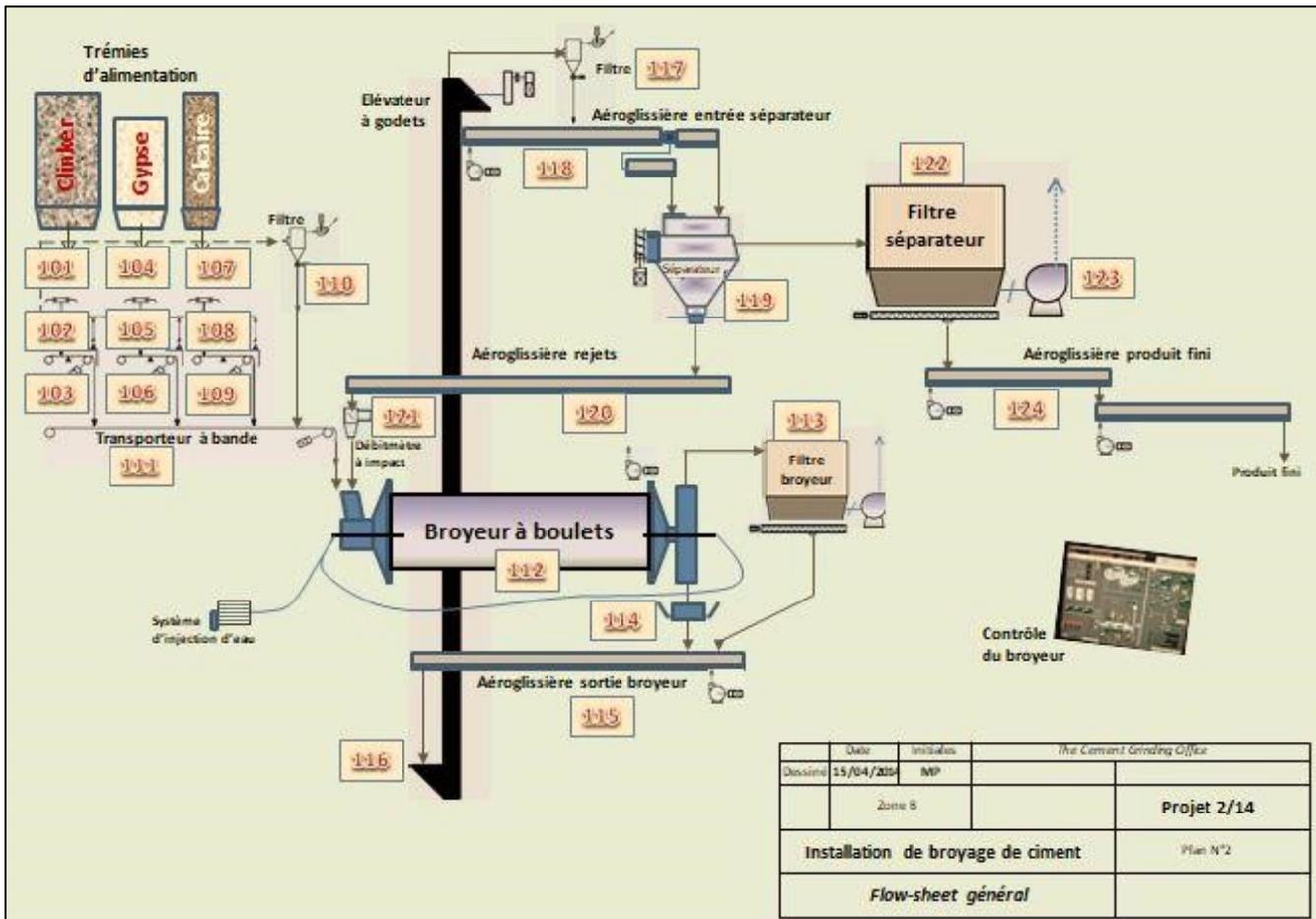
... La suite dans le livre complet

Chapitre 63

Liste des coûts circuits de broyage

1. Introduction

- Cette courte présentation afin d'introduire la liste des coûts pour un circuit de broyage de ciment.
- Cette liste donne une idée approximative et initiale du coût d'un circuit de broyage de ciment.
- Normalement, une liste détaillée est un document très long.
- Pour aller de l'avant, une étude plus détaillée est nécessaire avec les fournisseurs.
- La liste est basée sur le schéma de principe suivant:



... La suite dans le livre complet

Chapitre 64

Notions financières sur l'amélioration des équipements

1. Introduction

- Dans le milieu des affaires, le calcul de la rentabilité d'un investissement est de mesurer, par période, le taux de rendement sur l'argent investi dans un ensemble économique afin de décider si oui ou non, on procède à l'investissement.
- Comme une mesure de performance, il est utilisé pour évaluer le rendement d'un investissement ou pour comparer son efficacité à d'autres types de placements.
- En termes purement économiques, c'est une façon de considérer les bénéfices par rapport au capital investi.
- Trois indicateurs sont utilisés pour déterminer la rentabilité d'un investissement:
 - Payback
 - RSI (retour sur investissement)
 - TRI (taux de rentabilité interne)

2. Payback

2.1. Définition:

- La période de payback est le temps prévu pour récupérer la sortie de trésorerie d'un investissement initial par l'entrée de flux de trésorerie générés par l'investissement.
- C'est l'une des plus simples techniques d'estimation d'investissement.
- La formule pour calculer la période de récupération d'un projet dépend du fait de savoir si le cash-flow généré par période est régulier ou irrégulier.
- Dans le cas où il serait régulier, la formule pour calculer la période de récupération est:

$$\text{Période de payback} = \frac{\text{Investissement}}{\text{Flux de trésorerie par période}}$$

- Lorsque les entrées de trésorerie sont inégales, nous devons calculer les flux de trésorerie nette cumulée pour chaque période, puis utiliser la formule suivante pour la période de récupération:

$$\text{Période de payback} = A + \frac{B}{C}$$

Où:

A est la dernière période avec un flux de trésorerie négatif cumulé

B est la valeur absolue de flux de trésorerie cumulés à la fin de la période A

C est le flux de trésorerie total au cours de la période après A

2.1. Exemple de flux de trésorerie régulier:

- Une cimenterie envisage d'entreprendre un projet nécessitant un investissement initial de 10,5 millions d'euros.
- Le projet devrait générer 3,8 millions d'euros par an pendant 8 ans.
- Calculer la période de récupération du projet.

... La suite dans le livre complet

Chapitre 65

Exemple d'étude 1

1. Résumé de l'étude

1.1. Problèmes rencontrés au niveau du broyeur et du circuit:

Configuration du broyeur

- Le premier problème que nous avons identifié est la configuration du broyeur.
- En fait, le broyeur produit deux types de ciment (Portland et GGBS) qui nécessitent des configurations différentes.
- Pour produire du ciment Portland, le broyeur doit être configuré comme suit:

Chambre de séchage	non
Chambres de broyage	2
Puissance Ch.1	10-12 kWh/t
Boulets Ch.1	90-60mm
Boulets Ch.2	60-17mm

- Au contraire, pour produire du ciment avec laitier, le broyeur doit être configuré comme suit:

Chambre de séchage	oui
Chambre de broyage	1
Puissance Ch.1	non
Boulets Ch.1	non
Boulets Ch.2	60-17mm

- Cela signifie que la présente configuration est un compromis et qu'il sera difficile d'optimiser ce broyeur pour le ciment CEM II en tenant compte du fait que CEM II représente 43% de la production totale et GGBS 37%, c'est-à-dire pratiquement le même pourcentage.

Broyeur sous-chargé

- Les deux chambres ont un degré de remplissage beaucoup trop bas.
- Le problème pour la chambre 1 est plus critique du fait que cette situation peut induire une usure importante et aussi un risque accru de casse de boulets et de plaques de blindage.
- Le broyeur a également de la puissance disponible, donc il n'y a aucun problème pour le charger plus.

Séparateur

- L'efficacité du séparateur n'est pas bonne.
- Des raisons mécaniques peuvent être à l'origine des mauvaises performances de ce séparateur.

1.2. Recommandations:

- Ajouter des boulets dans les deux chambres
- Régler la cloison intermédiaire
- Étudier le problème du séparateur avec le fournisseur
- Effectuer quelques tests de ventilation
- Avoir une bonne idée de la broyabilité du clinker
- NB: Voir le détail de ces recommandations à la fin du rapport

... La suite dans le livre complet

Chapitre 66

Exemple d'étude 2

Résumé de l'étude:

1. Problèmes rencontrés au niveau du broyeur et du circuit:

- L'entrée du broyeur est bouchée par de la matière et ne permet pas une bonne ventilation.
- La charge de la première chambre est trop fine.
- Le degré de remplissage de la première chambre est trop faible.
- Trop de matière à l'intérieur du broyeur (facteur de circulation élevé, sur-remplissage, puissance absorbée du broyeur diminuant) et des conditions de fonctionnement instables la plupart du temps.
- Deuxième chambre avec beaucoup de petits boulets.
- Une mauvaise aptitude à l'écoulement du ciment .
- Classement de la charge broyante perturbé.
- Tendance à accumulation de particules non broyées dans la seconde chambre.
- Usure importante des corps broyants.
- Les lumières des grilles de la cloison de sortie sont complètement bouchées par des morceaux métalliques et des particules de clinker.
- Les performances du séparateur ne sont pas des meilleures.
- Le produit du filtre du broyeur, qui est grossier, est envoyé dans le produit fini.
- La lecture des oreilles électroniques dans la salle de contrôle est sujette à caution.

2. Recommandations:

- Ajouter des boulets en chambre 1.
- Videz la deuxième chambre.
- Mettre une nouvelle charge de boulets en chambre 2.
- Contrôle périodique du taux d'usure des corps broyants.
- Nettoyage périodique des lumières des deux cloisons.
- Enlever la matière obstruant l'entrée du broyeur.
- Vérifier les oreilles électroniques et les recalibrer.
- Renvoyer le produit du filtre à l'élévateur.
- Voir la possibilité de remplir plus les deux chambres (jusqu'à 31-32%) afin d'augmenter la puissance absorbée et la production de l'installation.
- A l'avenir, d'autres solutions peuvent être recommandées pour augmenter la production du broyeur:
 - Utilisation de l'aide au broyage
 - Installation d'un système de pré-broyage

1. Objectif de la visite

- Le client nous a demandé d'effectuer l'audit de la station de broyage.
- En fait, le client fait face à deux problèmes:
 - production trop faible
 - résidus trop élevés sur 45 et 90µm
- Pour cette raison, un audit complet de l'installation a été réalisé pendant quatre jours du 9 au 12 août de cette année.
- Il a été décidé de réaliser cet audit pour le ciment de type 1, celui que le client souhaite améliorer.
- Selon nos informations, la capacité nominale de cette installation est de 130 t/h pour un ciment de 3000 ± 100 Blaine.

... La suite dans le livre complet

Chapitre 67

Exemple d'étude 3

Résumé:

1. Problèmes rencontrés:

- Niveau de remplissage de la première chambre faible.
- Tendance au coating sur les plaques de blindage et les grilles de cloison.
- Lumières des grilles des cloisons obstruées par des morceaux de boulets cassés.
- Accumulation de ciment à l'intérieur du séparateur.
- Configuration de l'entrée broyeur inadaptée pour une bonne ventilation.
- Séparateur sans aucun rendement.

2. Recommandations:

- Maintenir le bon degré de remplissage dans les deux chambres.
- Nettoyage périodique des lumières de cloisons.
- Si le problème des boulets déformée et cassés persiste, remplacez la charge de boulets si nécessaire.
- Modifier l'entrée du broyeur.
- Permettre l'entrée de plus d'air au séparateur en ouvrant deux entrées d'air.
- Voir possibilité de nouveau séparateur si la modification ci-dessus ne donne rien.
- Sécher le laitier à l'extérieur du broyeur.
- Effectuez un test de broyabilité du laitier pour un objectif de 10% de résidus sur 32 μ .
- Prévoir la modification du broyeur en monochambre afin d'être en accord avec la production de ciment GGBS.

Contenu

1. But de la visite
2. Programme de la visite
3. Données de production avant crash-stop
4. Données moyennes
5. Mesures sur site
6. Visite du broyeur
 - 6.1. Première chambre
 - 6.2. Deuxième chambre
7. Visite du séparateur
8. Commentaires
 - 8.1. Commentaires généraux
 - 8.2. Commentaires sur la première chambre
 - 8.3. Commentaires sur la deuxième chambre
 - 8.4. Résultats de la granulométrie de l'alimentation
 - 8.5 Résultats du test axial
 - 8.6. Commentaires de l'analyse granulométrique
 - 8.7. Analyse du séparateur
 - 8.8. Commentaires sur le bilan thermique du broyeur
 - 8.9. Commentaire sur la charge théorique de boulets
 - 8.10. Commentaires sur les résultats de l'échantillonnage de boulets
 - 8.11. Analyse de la ventilation du broyeur
9. Commentaires sur la perte de production

... La suite dans le livre complet

Chapitre 68

Exemple d'optimisation de circuit de broyage

1. Introduction

- La cimenterie est située dans le nord du Pakistan près de la frontière afghane, à 100 km de Peshawar.
- Un beau jour, le client nous a contactés pour obtenir un devis pour l'optimisation de ses installations de broyage de cru et de ciment.
- L'objectif de la société était d'augmenter la production de la ligne roumaine existante de 1000 t/jour à 1800 t/jour de clinker.
- Ce chapitre examine les facteurs liés à la section de broyage du cru.

2. Situation avant la modification

- Le broyeur à cru est un mono chambre balayé par l'air sans compartiment de séchage, où la matière quittant le broyeur est tirée à travers un séparateur statique.
- Les rejets sont renvoyés à l'entrée du broyeur et les fines passent à travers quatre cyclones où la séparation entre le gaz et le produit fini est réalisée.
- Les gaz passent au ventilateur du broyeur principal où une partie est recyclée à la sortie du broyeur, afin d'aider le transport pneumatique de la matière, et le reste va à l'électroprécipitateur du four.
- Les principales données techniques du circuit avant modification sont données dans le tableau suivant:

Broyeur		Circuit		Données de production	
Diamètre	3,8 m	Séparateur statique	φ5,5 m	Débit moyen	95 t/h
Longueur	7,68 m (L/D=2)	Cyclones	4	<u>Composition</u>	
Vitesse de rotation	17,4 t/min (80% Vcrt)	Ventilateur principal	220000 m ³ /h	Calcaire	95%
Puissance installée	1600 kW		80°C	Argile	3%
Degré de remplissage du broyeur	25%		650 mmH ₂ O	Latérite	2%
<u>Charge broyante</u>			630 kW	Humidité moyenne	2,5%
φ90mm	6,5 t		1000 t/min	Humidité maximum	6%
φ80mm	11 t			Finesse du produit fini	21-24% R90μ
φ70mm	7,5 t			Puissance absorbée broyeur	1400 kW
φ60mm	18 t			Puissance spécifique broyeur	14,74 kWh/t
φ50mm	17 t			Température des gaz entrée broy.	140°C
φ40mm	19 t				
φ30mm	12 t				
Total	91 t				

3. Problèmes avant la modification

- Le circuit du broyeur fut vérifié avant de faire une proposition.
- Les problèmes typiques suivants furent trouvés:
 - Température inadéquate des gaz de séchage, en particulier dans le cas d'une teneur en humidité plus élevée, les gaz étaient à 140°C au lieu des 300-350°C normalement utilisés
 - Granulométrie du calcaire trop grossière avec 12% de résidus sur 50mm au lieu de 5% R30mm
 - Importante accumulation de matière non broyée dans le broyeur lui-même, dans le premier mètre et dans la dernière partie de la chambre de broyage

4. Solution proposée

- Nous avons tenu plusieurs réunions avec la direction de l'usine afin d'établir des objectifs et des préférences.
- Une modification drastique de l'installation existante, en remplaçant le séparateur statique par un séparateur dynamique de troisième génération alimenté par un élévateur à godets, fut choisie.

... La suite dans le livre complet

Chapitre 69

Test sur le broyage en cimenterie

1. Quel est le rendement moyen d'un broyeur à boulets?
 - A Plus de 10%
 - B Plus ou moins 30%
 - C Seulement 3-5%

2. Quelle est la température habituelle provenant du four à l'entrée du broyeur à cru?
 - A 600 ° C
 - B 350 ° C
 - C 150 ° C

3. En quoi consiste le dispositif de séparation du séparateur de troisième génération?
 - A Un plateau de distribution et ailettes
 - B Une cage (rotor de sélection)
 - C Un anneau de séparation

4. Quelle est l'énergie spécifique d'un broyeur qui absorbe 2700 kW et produit 90 t/h de ciment?
 - A 30 kWh/t
 - B 24,3 kWh/t
 - C 3 kWh/t

5. Quelle est l'énergie spécifique habituelle d'un broyeur en circuit ouvert produisant un ciment OPC (clinker + gypse) à 3000 Blaine?
 - A 35 kWh/t
 - B 45 kWh/t
 - C 25 kWh/t

6. Pour quel type d'analyse est utilisée la courbe Tromp?
 - A La finesse du ciment
 - B La granulométrie du clinker
 - C L'efficacité du séparateur

7. Quel est le rapport longueur/diamètre habituel pour un broyeur en circuit ouvert?
 - A 3,5
 - B 2,5
 - C 4,5

8. Quelle est la signification de broyeur birotator?
 - A Broyeur avec rotation dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens antihoraire
 - B Broyeur avec 2 moteurs
 - C Broyeur à décharge centrale

9. Quelle est la signification du nombre 325?
 - A Ciment avec une résistance de 32,5 N/mm² à 7 jours
 - B Ciment avec une résistance de 32,5 N/mm² à 28 jours
 - C Ciment à 3250 Blaine

... La suite dans le livre complet

Chapitre 70

Tableaux récapitulatifs des broyeurs à boulets en cimenterie

- Le premier tableau reprend 5 types de broyeurs:

- * Mono chambre
- * Air swept
- * Double-rotateur
- * Deux chambres
- * Trois chambres

- Les caractéristiques suivantes sont définies:

- * Schéma
- * Chambre de séchage
- * Nombre chambres de broyage
- * Type d'attaque (moteur)
- * Matière à broyer
- * Granulométrie matière
- * Type de circuit
- * Type de séparateur
- * Charge broyante (en mm)
- * Dimensions boulets pour cru (calcaire)
- * Dimensions boulets pour laitier
- * Dimensions boulets pour charbon
- * Dimensions boulets pour ciment
- * Niveau de remplissage
- * Ratio Longueur/Diamètre
- * Ratio longueurs de chambre
- * Cloison de transfert et lumières
- * Cloison intermédiaire 1 - 2 et lumières
- * Cloison intermédiaire 2 - 3 et lumières
- * Cloison de sortie et lumières
- * Vitesse de rotation
- * Blindages
- * Humidité maximum
- * Gaz chauds
- * Injection d'eau
- * Ventilation
- * Air faux
- * Température sortie broyeur
- * Adjuvant de mouture
- * Finesse typique sortie broyeur

- Le tableau se trouve à la page suivante.

... La suite dans le livre complet