

4/98

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE MINIER

PROJET DE FIN D'ETUDES

*PRESENTE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE MINE*

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة
BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

**ETUDE D'ORIENTATION SUR
LA PREPARATION MECANIQUE DU
CALCAIRE DE RAIS-HAMIDOU**

Encadré par :

Mr A. SAADA

Présenté par :

Mr DJEGHLOUD
Mohamed Yacine

Promotion : Septembre 1998

ENP — 10, Avenue Hacène Badi — EL HARRACH - Alger

SOMMAIRE



LEXIQUE	
INTRODUCTION	1
OBJECTIF DE L'ETUDE	1
GENERALITES	3

Chapitre I : GENERALITES ET THEORIE DE LA FRAGMENTATION

I	Définition de la fragmentation	5
II	Finalités de la fragmentation	5
III	Aspect physiques de la fragmentation	6
	1. Phénomènes de rupture	6
	2. Fragilisation	6
	3. Adjuvants de mouture	7
IV	Quantification des phénomènes de la fragmentation	7
	1. Lois énergétique	8
	• loi de Rittinger	8
	• loi de Kick	8
	• Loi de Bond	9
	2. Aptitude à la fragmentation	10
	3. Lois de distribution granulométrique	11

Chapitre II : STADE DE LA FRAGMENTATION

	Introduction	13
A	Concassage	13
I	Définition	13
II	Schémas de concassage	14
III	Choix d'un schéma de concassage	14
IV	Les appareils de concassage	15
	1. Concasseurs à mâchoires	15
	2. Concasseurs giratoires	16
	3. Concasseurs à cônes	17
	4. Concasseurs à cylindres	18
	5. Concasseurs à percussion	19
V	Choix des appareils	19
VI	Calcul des concasseurs	21
VII	Estimation de l'usure des blindages et des corps broyants	22

B Broyage		22
I Définition		22
II Classification des broyeurs		23
III Choix des appareils		23
IV Différents types de broyage		24
V Appareils de broyage		24
1. Broyeurs à barres		24
2. Broyeurs à boulets		25
3. Broyeurs à chute		25
VI Fonctionnement des broyeurs		26



Chapitre III : CRIBLAGE ET CLASSIFICATION PAR DIMENSION.

A Criblage		28
I Généralités sur le classement par dimension.		28
II Objet du criblage		29
III Généralités sur les cribles		29
IV Modes de criblage		30
V Surfaces criblantes		30
VI Choix des surfaces criblantes		30
VII Capacité du criblage		31
VIII Facteurs intervenant dans le criblage		31
IX Choix d'un type de crible		33
1. Criblage à sec		33
2. Criblage à l'eau		34
3. Criblage des produits humides		34
B Classification par dimension		34
I Définition		34
II Différents types de classificateurs		35
Appareillages		36

Chapitre IV : APERÇU GEOLOGIQUE

I Situation géographique		40
II Géologie		40
III Tectonique		44
IV Hydrogéologie		44
V Les réserves		44
VI La cimenterie: Aspect métallurgique		44

Chapitre V : IDENTIFICATION ET PREPARATION MECANIQUE DE L'ECHANTILLON

I	Echantillonnage	50
II	Analyse granulométrique	54
III	Détermination des paramètres physiques du minéral	54
	1. Mesure de la dureté	54
	2. Calcul de la porosité	54
	3. Calcul de la surface spécifique	55
	4. Calcul du taux d'humidité	55
IV	Etude minéralogique et pétrographique	55
V	Analyse chimique	56
VI	Etude de concassage	58
	1. Procédure opératoire	58
	2. Résultats des tests	59
	3. Conclusion	64
VII	Etude de broyage	64
	1. Broyage à voie sèche	65
	• Procédure opératoire	65
	• Résultats des tests	65
	• Conclusion	71
	2. Broyage à voie humide	71
	• Procédure opératoire	71
	• Résultats des tests	71
	• Conclusion	74

Conclusion générale	75
----------------------------	----

Annexes

Annexe Photos	77
Annexe – 1 –	78
Annexe – 2 –	80
Annexe – 3 –	82
Annexe – 4 –	85
Annexe – 5 –	90

Bibliographie

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

Mon père pour ses sacrifices et ses précieux conseils.

A ma mère pour sa tendresse et les longues années de sacrifices.

A mes grands-parents pour leurs conseils et leurs aides morales.

A mes sœurs : Assia et Souad et Fayrouz.

A mon très cher frère Sofiane.

A mes beaux frères Sofiane et Kader.

A tous ceux qui sont proches de mon cœur.

A la fin du terrorisme en Algérie.

Remerciements

Je présente mes plus profonds remerciements :

- A Mr. SAADA pour avoir suivi et dirigé ce travail, et pour ces précieux conseils qu'il m'a donnés.
- A Mr DJAADOUN pour son aide précieuse à la réalisation de mon projet.
- A l'ensemble du personnel travaillant à la carrière de Bouzaréah.
- A Tous les professeurs de l'école polytechnique qui ont contribué à ma formation.
- A tout ses travailleurs de L'ERCC Rais Hamidou pour leurs aides précieuses.

Je remercie également les membres de jury qui ont accepté de bien vouloir examiner mon travail.

Ainsi que mes amis, Sissine, Tarik, Yacine, Chafik et tout le groupe de Lotus Design pour leurs efforts déployés à la réalisation de mon mémoire ;

Ainsi que tous ceux qui ont aidé à la réalisation de ce travail.

Qu'ils soient tous assurés de mon immense gratitude.

**DJEGHLOUD Mohamed
Yacine**

INTRODUCTION

INTRODUCTION.

Les substances minérales extraites du sol présentent rarement à l'extraction les caractères techniques et économiques nécessaires, permettant de les traiter directement par la métallurgie. Par exemple, la plupart des minerais sortis de la mine ont une teneur en métal trop faible ; certains charbons contiennent trop de cendres, etc...

La préparation mécanique des minerais tend à obtenir, à l'aide de procédés physiques, chimiques ou physico-chimiques la séparation des minéraux de valeur d'une part et de rejets suffisamment appauvris d'autre part, dans le but de satisfaire aux exigences des procédés métallurgiques, sans détruire l'identité chimique des minéraux.

OBJETIF DE L'ETUDE :

Notre étude consiste à réaliser une étude d'orientation dans le domaine de la préparation mécanique du minerai de CALCAIRE de la carrière de RAIS – HAMIDOU (W. ALGER).

Les objectifs que nous nous sommes fixés sont les suivants :

- 1- Prendre connaissance de la documentation disponible ;
- 2- Caractériser la roche ;
- 3- Utiliser le matériel de fragmentation et de classification disponible au sein du laboratoire de valorisation de l'ENP ;
- 4- Etudier chaque type d'appareillage (concasseur, crible, broyeur) et les paramètres technologiques propres à chacun d'entre eux, afin de justifier le choix de tel ou tel type d'agrégat, répondant aux critères technico-économiques ;
- 5- Etablir une étude comparative de rendement et d'efficacité d'un broyage à sec et d'un broyage humide ;

- 6- Optimiser les paramètres technologiques (durée de broyage, rapport L/S, vitesse de rotation du tambour, charge broyante) ;
- 7- Etablir une étude comparative de schémas types classiques de concassage, broyage et classification avec d'une part celui provenant de la cimenterie de RAIS – HAMIDOU, et d'autre part, celui élaboré au sein du laboratoire de l'ENP.

En considérant les différents tests, résultats de laboratoire, et analyses réalisés sur ce minerai, tout ceci nous conduit à proposer un schéma technologique de préparation mécanique de ce matériau, en vue de satisfaire une demande en calcaire, avec un rendement en produit broyé de [-100mm] avoisinant les 85% du poids total du matériau .

GENERALITES

GENERALITES.

CALCAIRE :

Roche sédimentaire très courante composée d'au moins 50p.100 de calcite (CaCO_3), et souvent accompagnée de dolomite ($\text{Ca, Mg} (\text{CO}_3)_2$) et d'aragonite (CaCO_3). Lorsqu'elle est calcinée, cette roche produit de la chaux (oxyde de calcium, CaO).

Le calcaire est de faible dureté (3 sur l'échelle de Mohs). Par ailleurs, il présente une forte réaction, à froid, à l'acide dilué; cette réaction —un dégagement bouillonnant de CO_2 — est l'un des critères essentiels servant à sa détermination, qui permet notamment de le différencier de la dolomie, qui lui ressemble souvent.

La plupart des calcaires se sont formés en milieu marin, à partir de l'accumulation et de la consolidation des organismes animaux et végétaux: algues calcaires, éponges, mollusques, crustacés, brachiopodes, échinodermes, foraminifères, coraux, brachiopodes, etc. Dans nombre de calcaires, ces organismes fossiles se distinguent très aisément, d'où l'importance de ces roches en stratigraphie. [1; 2]

CLASSIFICATION

Il existe plusieurs classifications des calcaires. On peut les différencier selon leur mode de formation: on distingue alors les calcaires continentaux, lacustres, fluviaux, marins, récifaux, lagunaires.

On peut aussi les classer en fonction de leur structure et de leur texture: calcaires massifs, sans litage ni stratification apparents ; calcaires lités où l'on distingue des couches

d'épaisseur variable ; calcaires oolithiques composés de petites sphères en forme d'œufs (les oolithes) de structure concentrique; calcaires pisolithiques composés de sphères de diamètre supérieur à 2mm ; calcaires lithographiques à grain très fin se débitant en plaquettes!; calcaires saccharoïdes, etc.

Le marbre est une roche dérivée du calcaire qui a subi un métamorphisme. Les calcaires peuvent se mélanger avec d'autres roches et former des marnes (mélange de calcaire et d'argile) ou des dolomites.

LOCALISATION ET UTILISATIONS

Les calcaires sont des roches très répandues, formées au cours de toutes les ères géologiques. En France, ils constituent des massifs montagneux entiers, comme les Préalpes (Vercors, Chartreuse, etc.), et de grands bassins sédimentaires (Bassin parisien, Bassin aquitain), où ils apparaissent par exemple dans les falaises du pays de Caux, en Normandie.

Le calcaire trouve de nombreuses applications pratiques: fabrication de chaux et de ciment, emploi comme pierre de construction et comme roche ornementale. Les variétés les plus compactes, susceptibles d'être polies, sont parfois appelées « marbres » dans les métiers de la construction ; cette appellation est purement commerciale et ne doit pas être confondue avec l'acception pétrographique, qui entend par marbre une roche métamorphique d'origine calcaire.

CHAPITRE I
GENERALITES ET
THEORIES DE LA
FRAGMENTATION

GENERALITES ET THEORIES DE LA FRAGMENTATION

I - DEFINITION DE LA FRAGMENTATION :

On appelle fragmentation, l'ensemble des techniques ayant pour objet d'amener le tout-venant brut sortant de la mine ou de la carrière à la dimension voulue, pour en permettre l'utilisation industrielle en fonction d'un but bien défini.

L'objectif de la fragmentation est plus précisément de libérer les différents minéraux d'un tout-venant, en recherchant des granulométries serrées et en évitant, autant que possible, la production de surfines nuisibles aux opérations de concentration ultérieures à la fragmentation.

II - FINALITES DE LA FRAGMENTATION :

La fragmentation peut avoir des finalités diverses :

- Réduire les dimensions soit pour faciliter la manutention, le conditionnement ou l'utilisation, soit pour libérer les constituants avant une opération séparatrice ;
- Augmenter la réactivité vis à vis de processus dont la cinétique dépend de la finesse (augmentation de la surface de contact des grains minéralisés);
- Homogénéiser ;
- Faciliter la séparation de la gangue et autres impuretés du ou des minéraux utiles.

III - ASPECTS PHYSIQUES DE LA FRAGMENTATION :

III – 1 Phénomène de rupture :

La fragmentation des solides résulte de l'action d'un champ de contraintes engendré par des forces de contact (compression, cisaillement, torsion, flexion, attrition, plus rarement traction).

Ce champ varie donc avec l'intensité et la distribution des forces, avec la nature, la forme et les discontinuités structurales du solide. Il varie aussi avec la dynamique des déformations.

La répartition des contraintes induit le réseau des fissures dont la densité et l'orientation conditionnent la dimension et la forme des fragments et, par conséquent, la finesse.[3]

III – 2 Fragilisation :

Un matériau est dit fragile, quand il se rompt avant de dépasser sa limite élastique. On appelle communément fragilité le comportement mécanique d'un solide qui se rompt sans déformation préalable importante, et la fragilisation résulte donc de toute amplification de cette propriété. Dans la pratique, il existe divers modes de fragilisation, le plus souvent fondés sur un accroissement de la fissuration préexistante de solides ou d'agrégats minéraux.

La *fragilisation mécanique* est en général implicite et résulte de la fissuration induite par les opérations d'abattage, de débitage ou de concassage.

La *fragilisation thermique* peut se faire :

- par choc(s) thermique(s) en exploitant la dilatation différentielle des composants, suivis parfois d'une trempe rapide, éventuellement dans un réactif chimique (cas de l'exfoliation de la muscovite) ;
- par destruction thermique, au moins partielle, d'un composant (libération des phosphates naturellement indurés, par déstabilisation de la gangue carbonatée) ;

- par traitement à très basse température (broyage dit cryogénique jusqu'à 77°) de matières comme les métaux ductiles ou les polymères organiques, dont le comportement à la température ambiante est plastique.

La *fragilisation électrique* repose sur la formation de plasmas induite dans les matériaux humides par des impulsions à haute tension, jusqu'à 200 kV. Un procédé fondé sur ce principe a été utilisé comme préalable à la détermination des kaolinites.

La *fragilisation par champ électromagnétique* fait appel à l'élévation locale de la température due aux micro-ondes ou à des hautes fréquences, qui engendre une vaporisation ou crée des microplasmas. Elle concerne les matériaux hétérogènes, où les constantes diélectriques sont fortement contrastées.

La *fragilisation chimique* consiste à faire réagir partiellement le matériau avec un fluide pour améliorer sa broyabilité ; certains copeaux métalliques sont, par exemple, traités à chaud en atmosphère d'azote, de sorte que la formation d'oxynitrides limite leur flexibilité.

III – 3 Adjuvants de mouture :

Les conditions de broyage peuvent être améliorées en ajoutant, en faibles quantités, certaine substance mi-fragmentation, sous forme solide, liquide ou vapeur. Il est ainsi possible de réduire la durée ou augmenter la capacité de broyage, de diminuer l'usure, de prévenir le colmatage et d'obtenir des produits fins plus facilement manipulables.

IV - QUANTIFICATION DES PHENOMENES DE LA FRAGMENTATION :

Les tentatives de quantification ont fait l'objet de multiples travaux théoriques recouvrant aussi bien les aspects énergétiques et granulométriques, que ceux des transformations ayant lieu dans les appareils de fragmentation.

IV – 1 Lois énergétiques :**IV – 1 – 1 Loi de Rittinger :**

« Von Rittinger » (1867) postule que l'énergie consommée « E » est directement proportionnelle à la quantité de surface nouvellement créée[3a]. Il écrit alors la relation :

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

avec :

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

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

$$E' = \frac{E}{V} = K_v (S_2/V - S_1/V)$$

avec :

$$E' = K_v (\sqrt[3]{D_2} - \sqrt[3]{D_1})$$

D_1 et D_2 : dimensions initiale et finale des particules,

V : volume du matériau.

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

IV – 1 – 2 Loi de Kick :

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

$$dE = -K_k dV$$

$$dE' = -K_k dV / V = K'_k dD / D$$

et on l'obtient alors après intégration,

$$E' = K'_k \ln(D_1 / D_2) = K'_k \ln R$$

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

IV - 1 - 3 Loi de Bond :

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

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

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

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

- Commentaires :

Tous les travaux menés pour déterminer l'énergie nécessaire à la réduction des dimensions des matériaux n'ont pu à ce jour aboutir à une formulation mathématique satisfaisante, établissant une relation fidèle entre l'énergie consommée et la dimension des particules dans tous les domaines de la fragmentation, du concassage au broyage ultrafin.

Toutefois, les nombreux essais de fragmentation effectués sur différents matériaux indiquent que la loi de « Rittinger » est compatible avec une fragmentation fine à ultrafin ; que la loi de « Kick » s'applique bien dans le cas d'une fragmentation grossière ; et que la loi de « Bond » couvre les domaines du broyage grossier à fin. Cette dernière loi est d'ailleurs utilisée pour le dimensionnement des broyeurs.

Les autres lois sont généralement d'un maniement difficile et se heurtent particulièrement à la complexité des calculs et/ou des essais pour la détermination de certains paramètres (constante de proportionnalité, valeur de l'exposant n , etc...).

Quelle que soit la loi adoptée, il apparaît que, pour le broyage fin à ultrafin, la consommation énergétique augmente de façon non toujours linéaire avec la finesse des particules.

IV – 2 Aptitude à la fragmentation :

Sur le plan de la pratique, on a essayé de caractériser, à priori, l'aptitude ou la résistance des matériaux à se laisser fragmenter à partir des propriétés, telles que la dureté, la compacité, la résistance à la compression, à la flexion et au choc, etc.

Cette aptitude est quantifiée par des paramètres comme l'indice de friabilité de « Hardgrove », l'indice énergétique de « Bond », l'indice d'aptitude à l'agglomération de « Papadakis », l'indice d'abrasion, qui sont déterminés à partir d'échantillons moyens prélevés sur les matériaux à fragmenter et qui ont pour objectif d'orienter le choix et les caractéristiques de l'appareil de fragmentation.

L'*indice de « Hardgrove »* caractérise la friabilité des matériaux et concerne donc les matières friables telles que le charbon, les phosphates, etc. Le test est mené dans un broyeur vertical à billes, à piste fixe, l'indice de friabilité s'exprimant en fonction de la masse du passant à une maille de 200 mesh, obtenue à l'issue d'un protocole d'essai rigoureux.

L'*indice de « Bond »* est défini comme étant l'énergie consommée pour réduire un matériau de dimension initiale théoriquement infinie à un produit final, dont 80% en masse passe au travers d'un tamis pourvu de mailles carrées de 100 μm de côté. Deux protocoles d'essais, l'un en broyeur à boulets et l'autre en broyeur à barres, ont été développés par « Bond ».

L'*indice de « Papadakis »* est défini comme étant le coefficient d'aptitude à l'agglomération, qui représente la fraction de surface perdue suite à l'agglomération des

particules, mesurée selon un protocole d'essais basé sur la variation de la surface spécifique en fonction de la durée de broyage.

L'*indice d'abrasion* caractérise l'usure des pièces en contact avec la matière à fragmenter, et, par conséquent la durée de vie de ces pièces, il est déterminé par l'usure d'un matériau de référence en présence d'un échantillon de matière à fragmenter.

IV – 3 Lois de distribution granulométrique :

Un matériau morcelé peut être considéré comme un ensemble de grains de dimensions diverses. Il est donc important de pouvoir caractériser la distribution granulométrique de ces grains avant et après fragmentation. Pour ce faire, différentes lois ont été développées à partir de résultats expérimentaux.

Gaudin (1926) propose la relation :

$$Y = (X/D)^m$$

avec D dimension du plus gros grain,

Y taux massique cumulé du passant au tamis d'ouverture de maille X,

m constante

Cette relation est la forme générale d'une loi géométrique établie précédemment par « Stadtler » (1910) et « Martin » et « Turner ». En représentation logarithmique, on obtient une droite de pente, m, pour des valeurs de Y comprises entre 0 et 80%. Au-delà de 80%, la linéarité n'est plus vérifiée.

Toutes les lois de distribution granulométrique ne sont que d'un usage limité et il est difficile, a priori, de prévoir quelle relation s'ajuste le mieux à la distribution granulométrique d'un produit fragmenté.

En pratique, la détermination de la distribution granulométrique se fait par un classement dimensionnel à travers une série de tamis d'ouverture de maille décroissantes. Si la série est constituée de n tamis, elle donne lieu à $(n+1)$ tranches granulométriques, limitées chacune par les dimensions des ouvertures de maille de deux tamis successifs .

- Il existe plusieurs séries de tamis, dont les plus utilisées sont :
- les tamis normalisés français de l'AFNOR (Association Française de Normalisation),
- les tamis normalisés allemands DIN (Deutsches Institut für Normung)
- les tamis « Tyler » numérotés en mesh,
- les tamis BS (British Standard)

La représentation graphique de la distribution granulométrique s'obtient alors en portant le taux massique des passants cumulés, ou des refus cumulés, en ordonnée et les ouvertures des mailles des tamis en abscisse.

CHAPITRE II
STADE DE LA
FRAGMENTATION

STADE DE LA FRAGMENTATION :

INTRODUCTION :

La fragmentation comprend deux stades :

- A. **Concassage** : il réduit les gros blocs pouvant atteindre le mètre cube jusqu'à la dimension du centimètre.
- B. **Broyage** : il fragmente à la finesse finale désirée les produits provenant du concassage.

A - CONCASSAGE .

I - DEFINITION :

Le concassage est un processus de réduction du dimensionnement de blocs de minéraux, à l'aide de forces extérieures ; le tout-venant doit être de dimension supérieure à 5 mm, le processus de concassage est caractérisé par le degré de concassage R.

Le degré de concassage est le rapport des dimensions du minerai avant et après concassage, on le détermine par la formule suivante :

$$R = \frac{D_{\max}}{d_{\max}}$$

D_{\max} : dimension de la particule la plus grande avant le concassage.

d_{\max} : dimension de la particule la plus grande après concassage.

Où bien :

$$R = \frac{D_{m0}}{d_{m0}}$$

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

D_{80} : dimension des ouvertures carrées du tamis, à travers lesquels passent 80% des produits non concassés.

d_{80} : dimension des ouvertures carrées du tamis, à travers lesquels passent 80% des produits concassés.

II - SCHEMAS DE CONCASSAGE :

Il existe 2 cycles de concassage [4]:

- Cycle ouvert : Les matériaux passent une seule fois dans le concasseur, ce qui donnera un produit concassé, irrégulier selon la grosseur des grains.
- Cycle fermé : Les matériaux passent plus de deux fois, c'est à dire que le produit concassé est soumis à une classification directe.

III - CHOIX D'UN SCHEMA DE CONCASSAGE :

Les opérations de concassage et de criblage forment les stades de concassage, tandis que l'ensemble des stades de concassage représente le schéma de concassage [5].

Les stades de concassage présentent 4 variantes : **(annexe 4)**

A- opérations de précriblage, de concassage et de criblage de contrôle.

- B- opérations de précriblage et de concassage.
- C- opérations de concassage et de criblage de contrôle
- D- opérations de concassage.

Dans le cas où le circuit comporte un seul étage, on peut avoir l'une des 4 variantes ci-dessus .

Dans le cas d'un circuit à 2 étages, on peut avoir l'une des 16 variantes suivantes :

AA	BA	CA	DA
AB	BB	CB	DB
AC	BC	CC	DC
AD	BD	CD	DD

Pour (n) étages dans un circuit, le nombre de variantes sera de :

$$N = 4^n$$

Par conséquent, le choix d'une variante optimale peut s'avérer ardu à priori, si nous ne connaissons pas le nombre d'étages et les opérations de criblages préalable et ce contrôle.

IV - LES APPAREILS DE CONCASSAGE : [3b ; 6 ; 7 ; 8]

IV – 1 Concasseurs à mâchoires (opérant par pression) :

- Description :

Les blocs sont écrasés entre deux mâchoires :

- l'une fixe
- l'autre mobile, animée de mouvement de va et vient, formant entre elles un angle bien défini compris entre 20° et 23°, appelé angle de prise ou angle de concassage.

Les mâchoires sont rectangulaires, interchangeables, en acier spécial au manganèse.

On distingue deux types de concasseurs à mâchoires :

- *Concasseur à mâchoires à simple bielle : (fig.1)*

Caractérisé par un faible débit et produisant une assez grande production de fines. Pour ces raisons, il est utilisé généralement au niveau du concassage secondaire, son rapport de réduction peut atteindre la valeur de 10.

- *Concasseur à mâchoires à double bielle : (fig.2)*

Il est utilisé dans le concassage primaire (débitage) ; il est capable d'admettre de très gros blocs, d'assurer de grosses productions et de fragmenter des morceaux très durs et abrasifs, son rapport de réduction est compris entre 4 et 8.

- Champs d'application des concasseurs à mâchoires :

Ils sont utilisés pour les matériaux mi-durs à extra-durs, abrasifs et secs ou légèrement humides non collants.

Exemple : matériaux de carrière, minerais divers, carbures, ... etc.

IV – 2 Concasseurs giratoires (opérant par pression) :

- Description :

Les matières sont réduites par écrasement entre une paroi circulaire fixe (concave) et un cône axial tronconique (noix), monté sur un arbre vertical, mû à sa base par un excentrique (fig.). Le rapport de réduction de ces appareils varie de 10 à 12.

On distingue deux type de concasseurs giratoires :

- Concasseur giratoire primaire (fig.4) : il concurrence souvent le concasseur à mâchoires.
- Concasseur giratoire secondaire (fig.5) : il concasse plus fin.

- Champs d'application des concasseurs giratoires :

Ils sont utilisés pour les matériaux mi-durs à extra-durs, secs ou légèrement humides, non collants.

Remarque :

Avec un minerai argileux, fibreux, ou glissant, le concasseur giratoire s'engorge plus facilement que le concasseur à mâchoires.

IV – 3 Concasseurs à cônes :*1 - Concasseurs à cône type tête standard : (opère par pression)*

Le principe est analogue à celui des concasseurs giratoires, cependant ils sont conçus avec des chambres de travail fortement évasées vers le bas, de façon à conserver une capacité suffisante d'évacuation lors de réglages fins.

En outre ces machines fonctionnent avec une course importante à la base du cône, facilitant les grandes productions.

Ils sont généralement utilisés dans le concassage secondaire des minerais durs et abrasifs.

- Dimensions maximales des produits à l'entrée du concasseur : 62.5 cm.
- Dimensions maximales des produits à la sortie des concasseurs comprises entre 10 et 2 cm.
- Rapport de réduction compris entre 6 et 8.

2- Concasseur à cône tête courte :

Ils sont de même construction que le type standard, mais avec un profil de chambre de travail moins évasé et une gamme de réglage très fine.

Ils sont généralement utilisés dans le concassage tertiaire des minerais durs et abrasifs.

- Dimensions maximales des produits à l'entrée du concasseur : 25cm.
- Dimensions maximales des produits à la sortie du concasseur comprises entre 2.5 et 0.3 cm.
- Rapport de réduction compris entre 4 et 6.

IV – 4 Concasseur à cylindres :

Ils sont employés au concassage intermédiaire et fin des différents minerais et roches.

Les concasseurs à cylindres, qu'ils soient dentés, lisses ou cannelés, ont une structure commune et ne diffèrent que par la forme géométrique de leurs surfaces de travail.

1- Concasseurs à cylindres lisses : (fig.6)

Le concassage de produits est obtenu par pression continue entre 2 cylindres à axes parallèles tournant en sens inverse .

Il est destiné pour le concassage des produits durs et abrasifs, de même pour les minerais fragiles (blende, chalcopirite, ... etc.).

La dimension d'alimentation courante est 25 mm.

Ils concassent plus fin que les concasseurs à mâchoires ou que les giratoires (jusqu'à 1 mm) (pratiquement : 5 ou 10 mm). Ils produisent peu de fines, s'ils sont alimentés normalement.

Les concasseurs à cylindres lisses ont un rapport maximum de réduction plus faible que les autres concasseurs (il dépasse rarement 4).

2- Concasseur à cylindres cannelés :

Le concassage est obtenu entre 2 cylindres dotés de cannelures plus ou moins profondes. Ils conviennent surtout pour des opérations de 2^{ème} réduction sur des matériaux modérément abrasifs (demi-durs ou friables, même s'ils sont humides ou collant).

3- Concasseur à cylindres dentés :

Ils opèrent à la fois par écrasement entre les noyaux cylindres, garnis de dents de forme et de dimensions diverses, par incision et arrachement aux moyens des dites dents. Ils conviennent surtout pour les matériaux friables ou mi-durs, même humides et collants.

IV – 5 Concasseurs à percussion (opérant par choc) :

Dans la chambre de concassage, la roche est heurtée plusieurs fois par des masses tournantes, fixées à un arbre à rotations rapide.

Ils ont un très grand rapport de réduction (20 à 40), concassant jusqu'à 10 mm, mais présentent le gros inconvénient, celui d'être très sensibles à l'abrasivité. ils produisent des morceaux plus cubiques que les concasseurs à pression. La proportion de fines est plus forte avec les concasseurs à percussion qu'avec ceux à pression.

On distingue deux types de concasseurs à percussion, suivant que les masses tournantes soient rigides ou articulées sur l'arbre.

1- Concasseurs à percuteur rigide : (fig.7)

Ces appareils ne produisent pas un produit de granulométrie régulière ; ils sont applicables, pour les produits : tendres, non abrasifs, secs ou humides, légèrement collants.

2- Concasseurs à marteaux articulés : (fig.8)

Ces appareils s'adaptent aux produits tendres non abrasifs, secs ou humides, moyennement collants (charbon, calcaire, minéral renfermant moins de 10% de silice).

V - LE CHOIX DES APPAREILS :

Pour le choix d'un appareil de concassage, on prend en considération les critères suivants [3e]

- la finesse, la dureté et l'humidité du produit ;
- la production horaire ;
- la pollution du produit ;
- l'usure et la maintenance de l'équipement ;

- les fonctions requises (fragmentation seule, fragmentation et classification, fragmentation et séchage, etc.) ;
- les contrôles ;
- les coûts d'investissement ;
- Les coûts d'exploitation (consommation énergétique, consommable, main-d'œuvre, etc.).

Il n'en demeure pas moins que, de façon pratique et notamment dans le domaine des matières minérales, les contraintes dimensionnelles des produits entrants et sortants restent le critère principal du choix des appareils de fragmentation.

On peut définir un appareil de concassage à partir de 5 paramètres principaux :

- la capacité d'admission qui fixe les dimensions des plus gros blocs admissibles,
- le rapport optimal de réduction,
- la distribution granulométrique des produits à la sortie,
- le coefficient de forme moyen des fragments obtenus, c'est à dire le pourcentage de fragments en forme d'écailles ou d'esquilles,
- le coût de la maintenance.

Pour des *produits durs et abrasifs* tels que les roches, on choisit des appareils agissant par compression lente, on utilise à cet effet :

- pour le préconcassage et le concassage primaire, des concasseurs à mâchoires ou des concasseurs giratoires ;
- pour le concassage secondaire, des concasseurs à mâchoires ou de préférence des concasseurs giratoires ou à cône tête standard ;
- pour le concassage tertiaire, des concasseurs à cylindres lisses ou cannelés ou, de préférence, des concasseurs giratoires à disque ou des concasseurs à cône tête courte ;
- pour le concassage quaternaire, qui se confond souvent dans la littérature avec le broyage grossier, des hydrocônes, des concasseurs giratoires à disque (type *Gyradisc*), des concasseurs à cylindres pour des produits fins ou des broyeurs à barres.

Pour des *produits moyennement abrasifs* tels que les roches tendres ou des produits divers, durs ou semi-durs, peu ou pas abrasifs, on fait appel à deux types de concasseurs :

- les concasseurs à cylindres dentés ou à cylindre unique et mâchoire courbe (type Pennsylvania) qui peuvent accepter des roches humides et des matériaux collants ;
- les concasseurs à percussion à battoirs ou à marteaux, malgré leur peu de résistance à l'usure et leurs frais d'entretien élevés.

Pour les *produits mous, élastiques, fibreux ou collants*, on utilise des concasseurs à pointes ou à pic, à cylindres dentés, des brise-mottes à couteaux, des trommels concasseurs, des déchiqueteurs à lames pour matières thermoplastiques, des coupeuses d'argiles, des appareils spéciaux pour tournures d'acier et des appareils cryogéniques.

VI - CALCUL DES CONCASSEURS :

Dans l'industrie des mines et carrières, il est nécessaire, pour réduire en dimension le tout-venant, de mettre en œuvre une cascade d'appareils. Il est bien connu que, pour un même débit de matière, la taille des appareils et leurs besoins énergétiques varient avec la nature de la roche, le volume à traiter, la dureté du matériau et les dimensions des produits. Quelques principes généraux doivent être soulignés :

- il est prudent de choisir, pour un concasseur, un rapport de réduction toujours inférieur à celui que donne le constructeur, afin d'assurer une plus grande efficacité de l'ensemble des appareils.
- pour une installation donnée, il existe un nombre optimal d'étapes successives de réduction qui, compte tenu des caractéristiques du matériau, visent à optimiser l'ensemble.
- si l'on surcharge un appareil, on n'augmente pas forcément la production, mais on diminue la durée de vie de ses composants. En effet, la suralimentation d'un appareil provoque un tassement de la matière à l'intérieur de la chambre de fragmentation, qui a pour conséquence de soumettre la matière à des contraintes isotropes augmentant ainsi sa résistance à la rupture.
- Si l'ouverture de décharge a un réglage trop étroit, on augmente l'usure ; si, à

l'inverse, le réglage est trop large, on gaspille de l'énergie.

VII - ESTIMATION DE L'USURE DES BLINDAGES ET DES CORPS BROYANTS :

L'extrapolation à l'échelle industrielle des tests d'abrasion, déterminés au laboratoire, est difficile. La meilleure estimation de la consommation des corps broyants et des blindages découle de l'expérience à partir d'installations industrielles similaires. Toutefois, la

$$U = k(A_i - p)^n$$

combinaison des données industrielles et des résultats obtenus par les tests de détermination de l'indice d'abrasion A_i permet d'estimer l'usure U (en kg/kWh) dans le cas d'un broyage à voie humide :

avec :

- p : constante égale à 0.020 pour les barres, et, à 0.015 pour les boulets et les blindages,
- k : facteur égal à 0.175 pour les barres, le blindage des broyeurs à barres et les boulets, et, à 0.013 pour le blindage des broyeurs à boulets,
- n : constante égale à 0.2 pour les barres, à 1/3 pour les boulets et à 0.3 pour les blindages.

B - BROUAGE.

I - DEFINITION :

Le broyage est l'opération qui permet la réduction de la matière de l'état granuleux à l'état de poudre de finesse déterminée, au moyen de divers appareils travaillant par effet de chocs, d'écrasement ou d'usure. [8]

De nombreuses industries utilisent les techniques du broyage pour des buts divers. En cimenterie, il s'agit seulement de développer la surface de la matière, pour faciliter les réactions physico-chimiques.

II - CLASSIFICATION DES BROYEURS :

Suivant les forces qu'ils mettent en jeu, les broyeurs peuvent être classés en plusieurs catégories :

- a - Les broyeurs agissant par *écrasement lent* tels que : les broyeurs à meule, les broyeurs pendulaires (broyeurs Raymond, Griffin), les broyeurs à galets (broyeurs Loesche), les broyeurs à billes.
- b - Les broyeurs agissant par *écrasement par chocs*, tels que : bocard (pilons) ou broyeurs à cascade.
- c - Les broyeurs agissant par *percussion* tels que les broyeurs à marteaux.
- d - Les broyeurs agissant par *écrasement rapide avec effet de cisaillement* tels que les broyeurs à chute (broyeurs à barres et broyeurs à boulets).

III - CHOIX DES APPAREILS :

Dans l'étude préliminaire d'un broyage, on tiendra compte de la nature de la matière à broyer, c'est à dire :

- de son aptitude au broyage,
- de son caractère abrasif,
- de son humidité et de son caractère plus ou moins collant,
- de la pollution du produit.

En possession de ces renseignements, on s'orientera vers un type de broyeur déterminé.

Dans les ateliers de préparation des minerais, on utilise couramment les broyeurs à chute, travaillant en voie sèche ou humide, car ce sont les seuls qui permettent de broyer fin les matériaux durs et abrasifs à un prix de revient acceptable.

L'opération de broyage est caractérisée en pratique par divers éléments, tels que :

- la dimension des produits à l'entrée,
- le rapport de réduction,
- la granulométrie et la forme des produits broyés,
- le tonnage traité,
- l'énergie consommée.

IV - DIFFERENTS TYPES DE BROYAGE :

- * broyage à sec (moins de 2% d'eau dans le produit)
- * broyage semi-humide (2 à 25% d'eau dans le produit)
- * broyage en phase liquide ou broyage à voie humide (25 à 300% d'eau dans le produit). [3c]

V - APPAREILS DE BROYAGE :

Dans la préparation des minerais, le choix se limite la plupart du temps aux broyeurs à barres et aux broyeurs à boulets car [8] :

- ils sont robustes et simples ;
- leur surveillance et entretien sont faciles ;
- ils peuvent broyer fin les roches dures et abrasives à un prix de revient acceptable ;
- ils peuvent travailler en voie sèche et en voie humide.

V – 1 Broyeur à barres : (fig.9)

Le broyeur à barres est composé d'un corps cylindrique (tambour), tournant autour de son axe horizontal, et contenant des barres en acier. Il est généralement utilisé dans le broyage grossier avant les broyeurs à boulets et dans les installations de tonnage ≥ 25 à 30 t/h.

Les dimensions des morceaux au niveau de l'alimentation peuvent atteindre 15 à 40 mm. Les produits de broyage ont une finesse comprise entre 1 et 2 mm ; leur degré de réduction est de 20 à 25 en circuit ouvert, et de 40 à 50 en circuit fermé avec un classificateur.

La charge en barres : 35 à 45% du volume intérieur du broyeur ; le diamètre des barres varie de 40 à 100 mm ; la consommation d'acier est de 0.1 à 1 Kg/tonne du minerai traité. En broyage à sec, il admet un certain taux d'humidité.

Remarque :

Dans les broyeur à barres, il n'y a pas de surbroyage, parce que les particules grosses se trouvant entre les barres préservent les particules plus petites de surbroyage ; donc il n'y a aucun intérêt à faire travailler les broyeurs à barres en cycle fermé avec un classificateur.

V – 2 Broyeur à boulets : (fig.10)

Le broyeur à boulets est composé d'un corps cylindrique, tournant autour de son axe horizontal, et contenant des boulets généralement sphériques en acier au carbone, en acier au manganèse, ... etc.

- Il est utilisé pour le broyage fin et très fin jusqu'à 10 μ ; la dimension maximale des produits à l'entrée est de 25mm;
- Le rapport de réduction varie entre :40 et 100;
- La charge en boulets : 40 à 50% du volume intérieur de broyeur;
- Le diamètre de boulets : 25 à 150 mm;
- La consommation des boulets : 0.6 à 2.5 Kg/t de minerai traité;
- En broyage à sec : il exige un minerai ne contenant pas plus de 1 à 2% d'humidité.

Remarque :

Pour éviter le surbroyage des grains de finesse suffisante, afin d'augmenter le rendement énergétique, le broyeur à boulets est presque associé à un classificateur.

V – 3 Broyeur à chute :(fig.11)

Les broyeurs à chute peuvent fonctionner suivant deux régimes distincts, en admettant la théorie suivante :

- a- si la vitesse de rotation est relativement lente, les corps broyants glissent le long de la paroi du broyeur, roulant les uns sur les autres, en prenant une forme d'équilibre dynamique, tout en suivant des trajectoires approximativement circulaires et concentriques autour d'une zone plus ou moins stationnaire, appelée « zone morte » où le broyage s'opère par attrition en faisant intervenir surtout des forces de cisaillement. C'est « *la marche en cascade* ». (fig. b11)
- b- si la vitesse de rotation est plus rapide, les corps broyants suivent une trajectoire comportant une partie en chute libre, où ils possèdent une énergie cinétique élevée ; le broyage s'opère par chocs, ce qui permet d'assurer un broyage fin des matériaux durs et abrasifs. C'est « *la marche en cataracte* » (fig. a11) fréquemment utilisée dans la préparation des minerais.

VI - FONCTIONNEMENT DES BROyeurs :

Le broyage s'obtient par le choc des boulets sur les grains à leur arrivée au fond (zone d'impact), et par l'écrasement entre boulets pendant leur remontée (zone d'abrasion).

On appelle vitesse critique η_c d'un broyeur, la vitesse à partir de laquelle un petit boulet reste constamment plaqué à la paroi par la force centrifuge [7; 8]:

$$\eta_c = \frac{42.3}{\sqrt{D}} \text{ tr / min}$$

avec :

D : diamètre du tambour en mètre.

La vitesse admissible est égale à :

- (0.6 ÷ 0.7) η_c pour les broyeurs à barres.

- (0.75 ÷ 0.9) η_c pour les broyeurs à boulets.

$$mg \cos\alpha \leq m\omega^2 r$$

ou si :

$$\omega^2 \geq (g \cos\alpha)/r$$

Lorsque le broyeur tourne à une vitesse telle que le petit boulet est centrifugé, on dit qu'il tourne à la *vitesse critique*, base de la détermination de la vitesse de rotation des broyeurs.

Pour cette vitesse on a :

$$\alpha = 0 \text{ donc } \cos\alpha = 1$$

et par conséquent :

$$w = \frac{\pi * N}{30} = \sqrt{\frac{g}{r}}$$

La valeur de la vitesse critique est donnée par la formule :

$$\eta_c = \frac{30 * \sqrt{g}}{\pi} * \frac{1}{\sqrt{r}} = \frac{29,9}{\sqrt{r}}$$

(r en mètre)

CHAPITRE III
CRIBLAGE ET
CLASSIFICATION PAR
DIMENSIONS DES GRAINS

CRIBLAGE ET CLASSIFICATION PAR DIMENSION

A - CRIBLAGE.

I - GENERALITES SUR LE CLASSEMENT PAR DIMENSIONS :

Le classement des produits par dimensions intervient dans de nombreux stades de la préparation mécanique des minerais[8]:

- Au concassage

Il s'agit de soustraire à l'action des concasseurs les morceaux qui sont de dimensions plus petites que celle de la décharge des concasseurs .

- Au broyage

Le classement par dimensions est utilisé à deux fins générales :

- a) soustraire les produits suffisamment fins à l'action des broyeurs, de façon à augmenter la capacité de ceux-ci.
- b) former un circuit fermé avec le broyeur, et limiter le calibre maximum du produit final.

- Dans certains procédés de concentration :

Qui exigent des calibres de grains bien définis.

- Au laboratoire :

Comme nous l'avons vu, il faut effectuer des opérations de contrôles granulométriques, indispensables à l'étude de la fragmentation et de la concentration.

Le classement industriel des grains par dimensions peut se faire de deux manières distinctes :

1. par voie directe :

Pour des séparations jusqu'à 1 mm, par passage des grains à travers des ouvertures de dimensions et de formes déterminées (grilles cribles), c'est le *criblage (classification directe)*.

2. par voie indirecte :

Pour des séparations inférieures à 1 mm. Ce mode de classement, basé sur la vitesse de sédimentation des grains dans un fluide (liquide ou gaz) sera étudié ultérieurement : il s'agit de la *classification indirecte*.

II - OBJET DU CRIBLAGE :

Le criblage a pour but de séparer les produits ayant une granulométrie requise, des produits qui doivent être concassés. C'est donc une opération normalement associée au concassage. Le criblage est important, car il augmente la capacité relative des concasseurs et permet d'obtenir des produits mieux calibrés.

Toute opération de criblage est caractérisée par l'obtention de deux produits :

- le « *refus* » ou ensemble des grains de dimensions supérieures à la maille d'ouverture du crible.
- le « *passé* » ou ensemble des grains qui passent à travers les ouvertures du crible.

III - GENERALITES SUR LES CRIBLES :

Un crible est un appareil qui a la forme d'un couloir dont le fond est constitué par une surface criblante au travers de laquelle passent les grains à cribler .

Un crible doit non seulement permettre le passage des grains au travers des perforations de la surface criblante, mais aussi évacuer les refus. Il faut donc que le crible ait une inclinaison suffisante pour que les grains du refus glissent en bas de la surface criblante par gravité (cribles fixes). Le plus souvent, on facilite cette double opération en animant les cribles d'un mouvement de propulsion d'une amplitude déterminée (cribles vibrants).

IV - MODES DE CRIBLAGE :

Généralement, on distingue deux modes de criblage dans les ateliers de concassage et de broyage [9]:

- a) Criblage préalable : employé avant le concassage, pour la séparation des fines et ne pas charger le concasseur en produits finis, « employé s'il y a plus de 15% de fines ».
- b) Criblage de contrôle : employé pour la séparation des matériaux concassés des morceaux de minerai plus grands que l'ouverture de sortie (déchargement) du concasseur.

V - SURFACES CRIBLANTES :

Il existe trois sortes de surfaces criblantes :

- les grilles à barreaux ;
- les tôles perforées ;
- les toiles tissées.

On utilise l'une ou l'autre suivant la quantité de séparation recherchée et suivant les caractères du minerai à cribler (dimensions, abrasivité, granulométrie, forme... etc.).

VI - CHOIX DES SURFACES CRIBLANTES :(fig.12.13)

Le choix de telle ou telle surface de criblage dépend des dimensions de produits à cribler, de leur forme, fragilité et abrasivité, ainsi que de la précision de séparation. Les critères d'utilisation sont généralement les suivants :

Grilles à barreaux :**- Criblage grossier (+ 100 mm) :**

Dans ce cas, ce sont les grilles inclinées de 20° à 45° , constituées de barreaux parallèles disposés suivant la pente. La section transversale peut être trapézoïdale, carrée ou circulaire .

- Criblage très fin (- de 2 mm) :

Pour les dimensions comprises entre 2 mm et 1,5 mm, on peut utiliser des grilles dites « grilles à fissures » : ce sont des grilles de barreaux très rapprochées.

Tôles perforées :

Les tôles perforées sont utilisées pour le criblage gros et moyen (80 à 3 mm). Les perforations ont diverses formes (mailles carrées, allongées, circulaires) (voir fig. 15).

Toiles tissées :

Elles sont utilisées pour les criblages moyens et fins de 100 à 1 mm. Le plus souvent les mailles sont carrées, mais elles peuvent être rectangulaires pour éviter le colmatage.

VII - CAPACITE DU CRIBLAGE :

Pour obtenir des résultats satisfaisants, la capacité permissible maximum de criblage doit être proportionnelle à la maille de criblage. La capacité des cribles diminue très rapidement avec la maille.

Les paramètres qui interviennent sur la capacité de criblage sont :

- La dimension relative des grains par rapport à la maille de criblage.
- L'humidité des produits.
- L'angle d'attaque des grains.

VIII - FACTEURS INTERVENANT DANS LE CRIBLAGE :

Sur un crible industriel, le matériau se déplace sous forme d'une couche d'une certaine

épaisseur.

Il y a beaucoup de facteurs qui interviennent dans le passage des grains au tamis ; les plus importants sont :

La dimension relative d'un grain :

Examinons les conditions du passage au tamis d'un grain sphérique de diamètre d , à travers une maille carrée de dimension l .

- si $0 < d < 0.75$, les grains sont appelés « légers », et ils passent librement au tamis.
- si $0.75 < d < 1$, les grains sont appelés « difficiles » pour leur passage au tamis ; il est nécessaire d'avoir un long laps de temps.
- si $1 < d < 1.75$, les grains sont appelés « embarrassants » et ils ne passent pas à travers le tamis, et en même temps, ils empêchent le passage des grains « légers » et « difficiles ».

Vitesse du mouvement des grains sur une surface criblante :

Les grandes vitesses influent défavorablement sur l'efficacité du criblage.

Il existe donc une vitesse optimale V_{op} , telle que :

$$V_{op} = (L - \sqrt{d/2}) * \sqrt{g/d} \text{ (mm / s)}$$

avec :

L : dimension de la maille du tamis (mm).

d : diamètre d'un grain (mm).

g : accélération de la pesanteur = 9810 mm /sec².

En pratique : $0.5 < V_{op} < 0.75$ m/s.

Très souvent, la vitesse du mouvement du matériau sur la surface criblante est réglée par le changement de l'angle d'inclinaison d'une surface criblante.

Angle d'inclinaison d'une surface criblante :

Le diamètre du grain passant librement au tamis est donné par cette formule :

$$d = L * \cos \alpha - h * \sin \alpha$$

avec :

h : épaisseur de surface criblante.

α : angle d'inclinaison.

l : longueur de la maille.

Humidité d'un produit :

- Il est quasiment impossible de cribler un produit humide par suite du colmatage des ouvertures.
- Le criblage à sec et d'un produit bien arrosé n'offre pas de difficulté.
- L'humidité est particulièrement nocive dans le cas des minerais argileux et collants (l'efficacité et la capacité diminuent) ; dans ce cas, pour remédier au colmatage, il faut procéder à des criblages entièrement arrosés, ou bien on utilise des cribles, dont les toiles sont chauffées électriquement (température maintenue entre 30°C et 40°C).

IX - CHOIX D'UN TYPE DE CRIBLE :

Le choix est guidé par la nature du travail et dans une certaine mesure par la diminution des emplacements disponibles (spécialement la hauteur), ainsi que de la répartition dans l'espace des produits classés [3f].

IX – 1 Criblage à sec :

- Pour les opérations portant sur du gros tout-venant (précriblage, calibrage, etc.) :

On a le choix entre grille fixe (pour une opération sommaire), grilles mécaniques et cribles vibrants ultra puissants.

- Pour les opérations portant sur le criblage proprement dit :

Le choix des cribles vibrants et des cribles à résonance.

- l'emploi des cribles inclinés, plus étendu que ceux des cribles horizontaux (leur construction mécanique est simple et la gamme de séparation : 1 à 250 mm au lieu de 1 à 80 ou 100mm).

- Les cribles horizontaux sont employés, dans le cas où des impératifs d'installation limitent la hauteur disponible.

- Pour le criblage fin (tamisage) :

Le choix entre tamis plans à mouvement giratoire et tamis vibrants électriques ou électromagnétiques.

IX – 2 Criblage à l'eau :

On utilise les mêmes appareils dans le criblage à sec, mais avec l'adjonction de rampes d'arrosage.

L'arrosage permet l'entraînement plus rapide des fins à travers les ouvertures des cribles, et contribue aussi à améliorer le rendement de l'opération ; un bon arrosage permet le délayage des impuretés de nature argileuse ou limoneuse.

L'action de l'arrosage sur le rendement de cribles varie fortement avec l'ouverture de la maille ; on distingue :

- pour les mailles comprises entre 1.6 et 6 mm / la capacité de passage serait multipliée par 3, et le rendement est maximal.
- pour les mailles comprises entre 8 et 20 mm / le débit serait multiplié par 1.25.
- au dessus de 30 mm : l'arrosage est sans influence notable.

IX - 3 Criblage des produits humides :

Notons que le criblage fin des produits humides se heurte à des grandes difficultés, d'une part à cause de la grande viscosité de la masse, et d'autre part à cause du colmatage plus ou moins rapide des ouvertures de la surface criblante .

B - CLASSIFICATION PAR DIMENSION :

On traite ce sujet par une simple énumération [6; 8].

I - DEFINITION:

La classification des grains suivant leurs dimensions est un procédé de classement basé sur la vitesse de déplacement des grains dans un fluide sous l'action de la pesanteur ou de la force centrifuge. La classification se faisant par équivalence, la forme des grains et leur masse spécifique interviennent dans le classement.

Les opérations de classement par dimensions sont effectuées avec des appareils désignés sous le nom général de *classificateurs*.

La classification intervient dans diverses phases de la préparation des minerais et plus particulièrement dans les sections de broyage.

Les classificateurs ont pour but de séparer les grains suffisamment fins pour être concentrés, des grains trop gros qui doivent être rebroyés. Ces derniers ne doivent pas retourner au broyeur avec une trop grande quantité d'eau si le broyage se pratique par voie humide.

En opérant de la sorte, on atteint un double but :

- a) on évite un surbroyage inutile des particules ayant atteint la finesse voulue,
- b) l'efficacité des broyeurs et leur rendement se trouvent largement améliorés.

Dans la plupart des cas, on utilise des classificateurs pratiquant une seule coupure, donc donnant deux produits :

- une *surverse (overflow)* constituée par les grains fins,
- une *sousverse (underflow)* composée des gros grains.

II - DIFFERENTS TYPES DE CLASSIFICATEURS :

On peut les classer (suivant le fluide utilisé et les forces mise en jeu), de la manière suivante :

- a- Classificateurs hydrauliques utilisant la pesanteur :

(hydroséparateurs, caisses pointues, classificateurs mécaniques, cônes). Ils effectuent des coupures comprises entre 1 et 2 mm .

b- Classificateurs hydrauliques, utilisant la force centrifuge :

(hydrocyclone, centrifugeuse). Ils effectuent des coupures de quelques microns.

c- Classificateurs pneumatiques : (cyclones, séparateurs centrifuges, dépoussiéreurs).

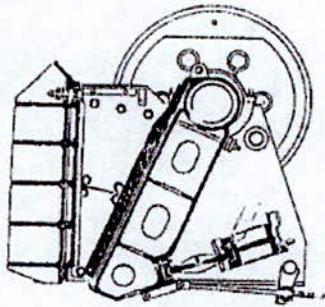


Fig. 1 : C.à machoires à simple bielle

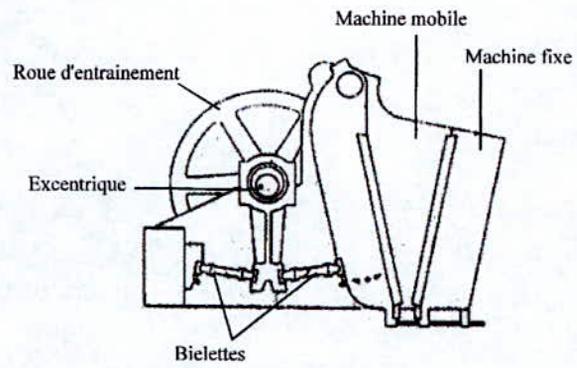


Fig. 2: C.à machoires à double bielle

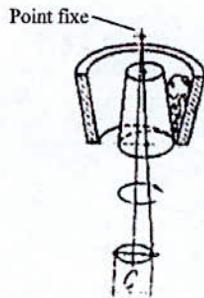


Fig. 3: Concasseur giratoire
- Principe -

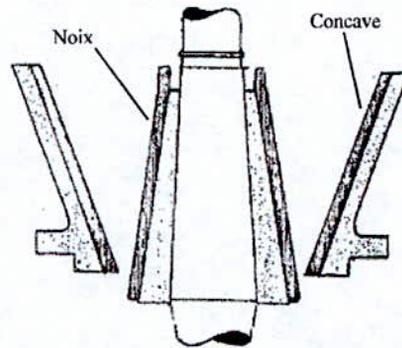


Fig. 4: Concasseur giratoire primaire

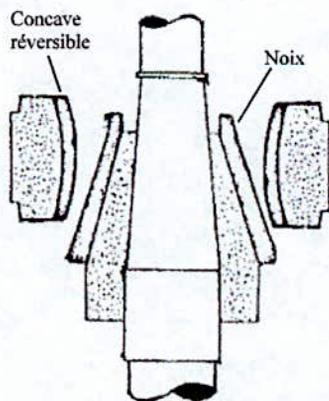


Fig. 5: Concasseur giratoire secondaire

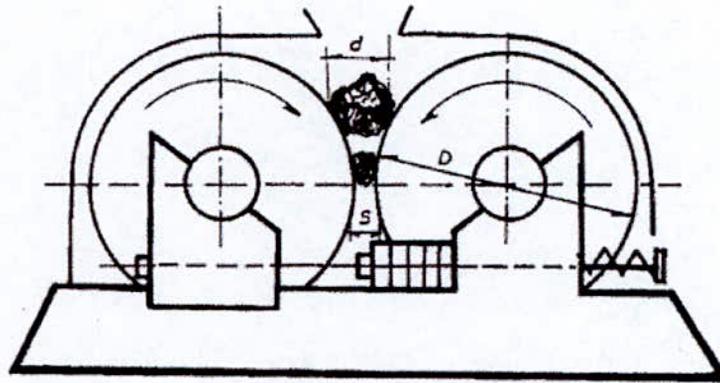


Fig. 6: Concasseur à cylindres lisses

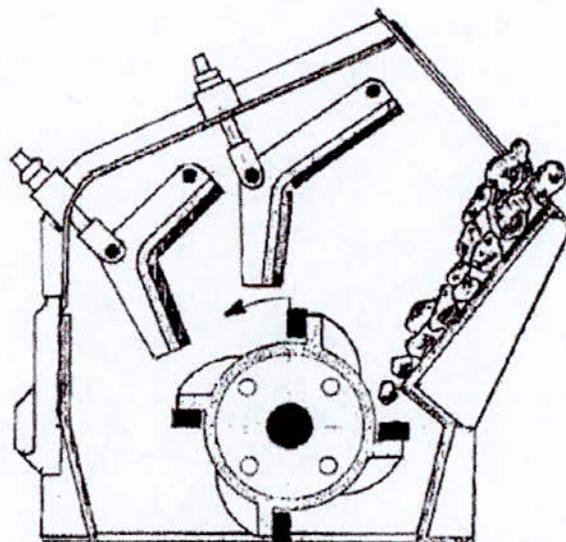


Fig. 7: Concasseur à Percuteurs rigides

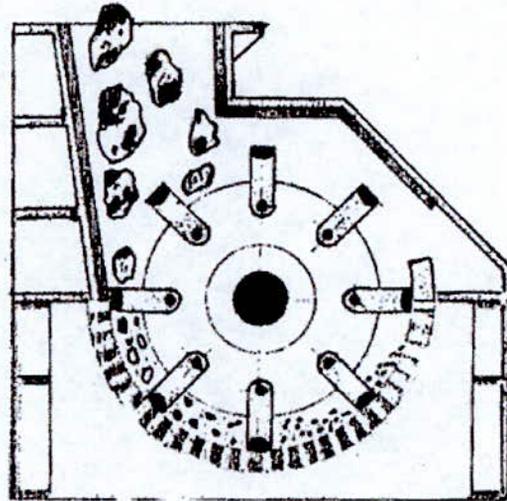


Fig. 8: Concasseur à marteau

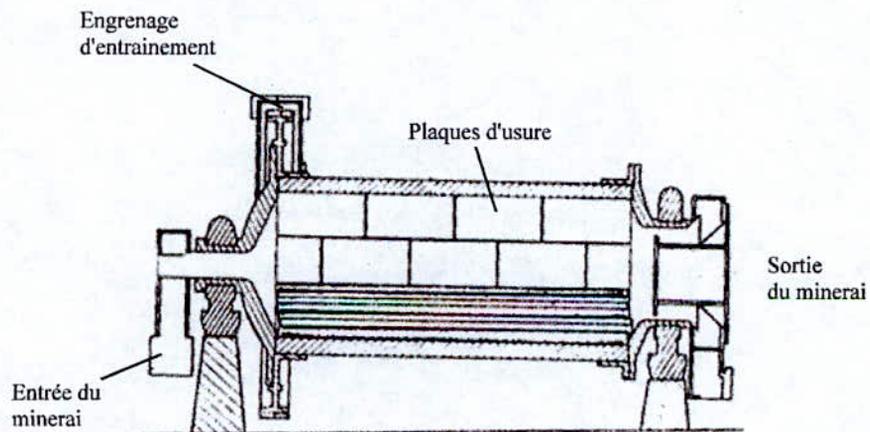


Fig. 9: Broyeur à barres

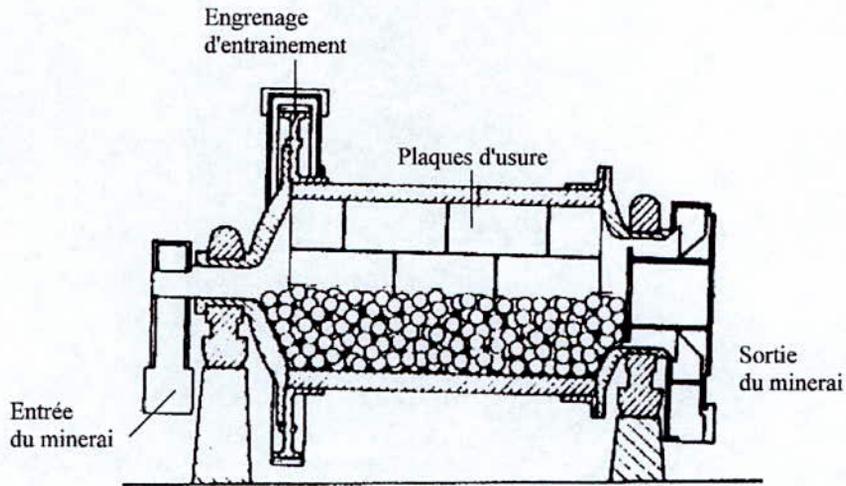
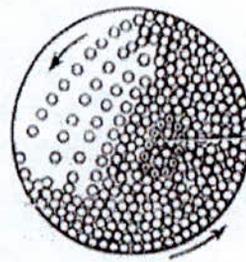
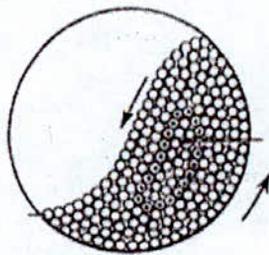


Fig. 10 : Broyeur à boulets



a. en cataracte



b. en cascade

Fig. 11:

Régime de fonctionnement des
broyeurs.

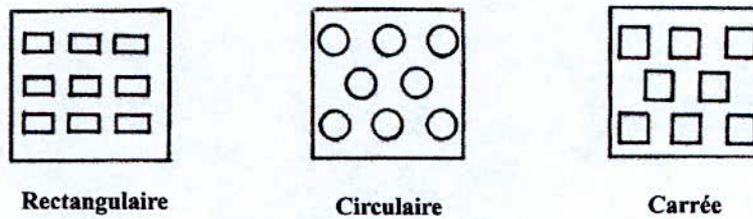


Fig. 12: Pérforations dans des tôles de forme

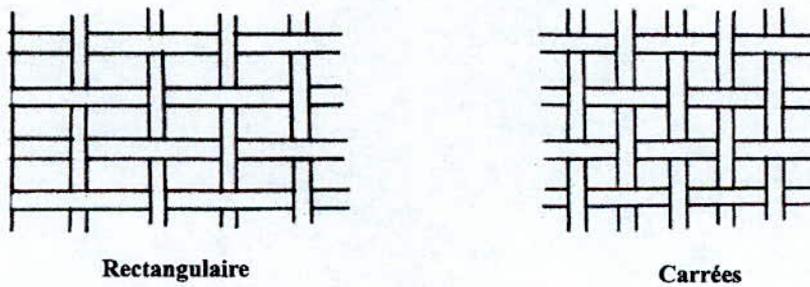


Fig. 13: Toiles métalliques tissés à mailles

CHAPITRE IV
APERCU GEOLOGIQUE

APERÇU GEOLOGIQUE

I - SITUATION GEOGRAPHIQUE :

La carrière de Bouzaréah est située dans la banlieue Ouest de la ville d'Alger ,à 2 km au nord de Bouzaréah. La carrière a une altitude moyenne de 280 m. Elle est desservie par deux routes :

- La première au versant Nord, d'un accès très difficile en raison de la forte pente et de son étroitesse.
- La deuxième au versant Sud est d'un accès plus aisé, elle est d'ailleurs la seule praticable par camions.

II – GEOLOGIE :

Le gisement de Bouzaréah est composé de roches métacalcaires et métaschistes du paléozoïque .

La combinaison des différents résultats acquis par les sondages et analyses de carottes d'une part, et les observations du terrain d'autre part, permettent de reconnaître sept couches de terrain situées de bas en haut : (fig.14)

1 - Schistes inférieurs ou chlorischiste :

Ils sont la base de la série de terrain, s'étendant sur toute la superficie et même bien au delà de la carrière , dans toutes les directions .

Du point de vue minéral ces schistes sont formés de quartz et de feldspaths et de

qui remplacent le mica . Ces chlorites sont elles mêmes un mélange, à proportions variables de :

- Daphite : $\text{FeAl}(\text{OH})_4 \text{AlSiO}_5$
- Amésite : $\text{Mg}_2\text{Al}(\text{OH})_4 \text{AlSiO}_5$ et d'antigorite $\text{Mg}_3(\text{OH})_4\text{SiO}_5$

Le pendage de la couche est de 10 à 30° SSE dans le secteur Nord et centre la partie de la carrière, actuellement en exploitation, et , de l'ordre de 45 à 60° sur un contour qui suit grossièrement la limite Est, SW de la concession, le tout formant et formant un dôme .

2 - Calschistes inférieurs :

Ils forment une couche d'environ 5 à 10 m de puissance, recouvrant entièrement les schistes inférieurs, et constituant une zone de transition entre ces schistes et le banc calcaire qui vient au-dessus d'eux .

3 - Calschistes supérieurs :

Ils sont constitués par un mélange de chlorite et de calcite, mélange tel, que la teneur en chaux serait faible pour un calcaire et forte pour un schiste .

4 - Gros banc calcaire :

Il forme une couche très puissante et vient immédiatement au-dessus du niveau de calcschiste .

- Sa puissance est supérieure à 100 m .
- Son pendage est de l'ordre de 60° .

Ce banc est constitué presque exclusivement par de la calcite, dont le pourcentage croît avec la hauteur jusqu'au $\frac{3}{4}$ environ, pour ensuite décroître légèrement .

Il est parfois traversé par des passages de schistes, de gneiss et d'argile noire, dont la puissance est de l'ordre de quelques décimètres. l'intérêt industriel de ce niveau est primordial, car il constitue seul le niveau dans des conditions de prix de revient très

intéressants du fait de sa puissance. C'est ce niveau qui fait l'objet de l'exploitation actuelle.

5 - Calschistes moyens :

Ils viennent immédiatement au-dessus du gros banc calcaire le recouvrant ainsi par toute son étendue ; la puissance de ce niveau est de l'ordre de la dizaine de mètres. Ils constituent, eux aussi, une zone de transition entre le gros banc calcaire et le niveau de schiste et gneiss .

6 - Schistes moyens :

Ils se sont formés au-dessus des calschistes, et ont subi les mêmes plissements que tous les terrains qu'ils recouvrent . La puissance de ce niveau est de l'ordre de quelques dizaines de mètres (30 à 40) .

Ce banc de schistes est à différents niveaux injectés de calcite pure .

7 - Calcaire supérieur :

La différence entre ce banc de calcaire supérieur et le gros banc réside dans le seul fait, que la puissance du premier cité représente trois fois celle du calcaire supérieur, sa puissance est d'environ 30 à 40 m .

8 - Schistes supérieurs :

Ils servent de couverture à tout l'ensemble des terrains que nous venons d'énumérer . La puissance est ici fonction du relief et celle des schistes inférieurs ; on y rencontre à certains endroits des veinules de calcite et de quartz .

III - Tectonique :

D'une façon générale on peut distinguer deux familles de faille :

- La première famille, de direction ENE-WSW, représentée par trois failles parallèles entre elles. La première passe à une dizaine de mètres à l'Est du sondage de reconnaissance n°16 ($x = 528968$, $y = 388932$, $z = 280$ m); la seconde passe par le sondage n° 3 ; la troisième passe à une dizaine de mètres environ du sondage n° 7 et à 80m du sondage n°1, délimitant en surface le contact calcaire inférieur – schiste inférieur.
- La deuxième famille, de direction SSE-NNW est aussi représentée par trois failles parallèles entre elles. La première passe parallèlement à la droite joignant les sondages 7 et 3, et à une cinquantaine de mètres à l'Est de cette droite, délimitant le contact calcaire inférieur. La deuxième passe à une cinquantaine de mètres à l'Est du sondage n°11. La troisième est située à environ 250 m au SW de la précédente. Le pendage de la première famille est d'environ 60°, il est orienté vers le NNW, celui de la seconde est du même ordre de grandeur mais il est dirigé suivant la direction NE.

IV - Hydrogéologie :

Un examen hydrogéologique du site a montré que le banc calcaire est une roche magasin d'une nappe aquifère relativement importante, reposant sur un substratum schisteux qui lui est imperméable. Cette nappe d'eau est située au niveau 230 m, ce qui permet d'exploiter jusqu'à 235 m avec pompage de l'eau.

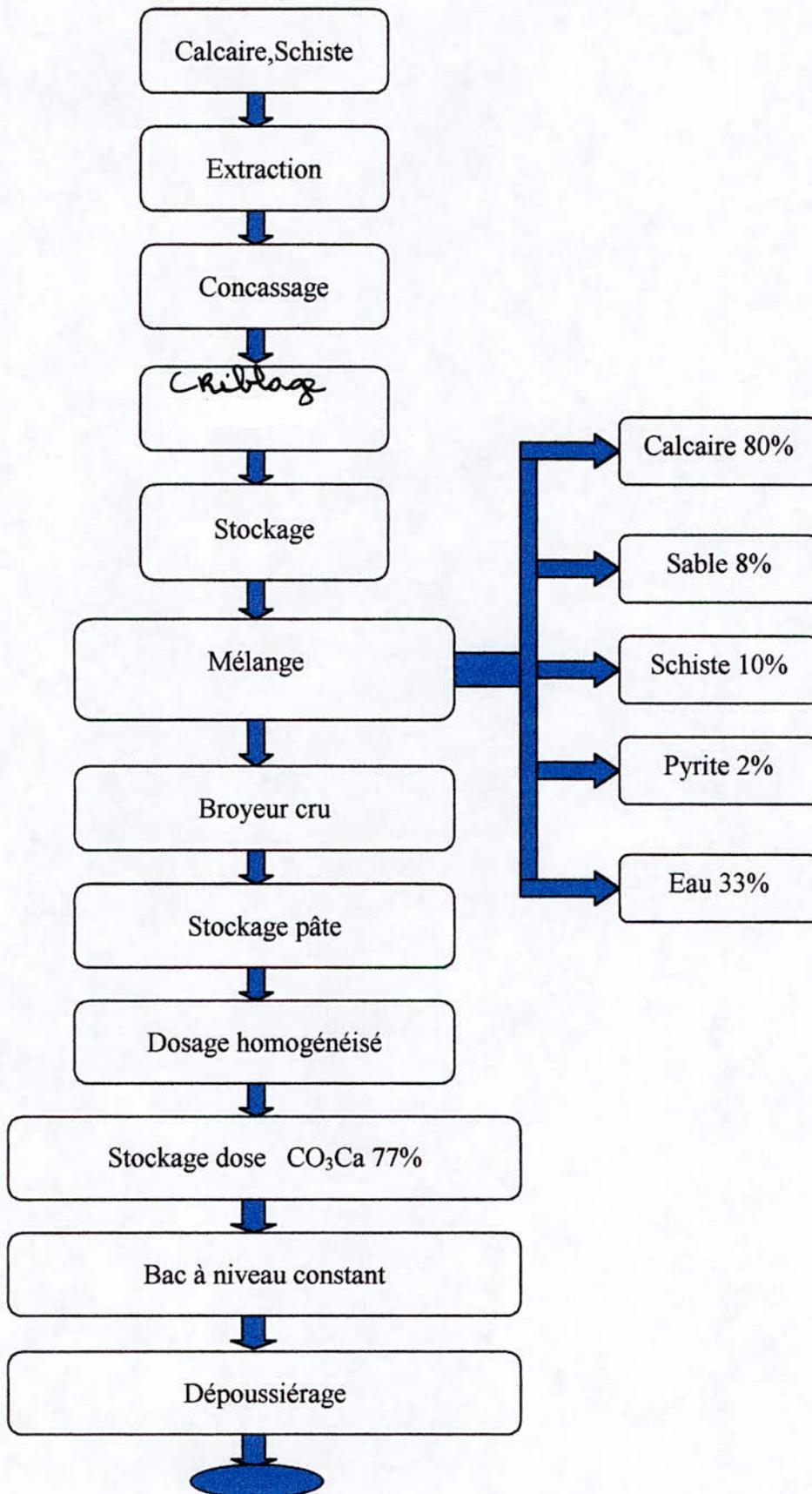
V - Les Réserves :

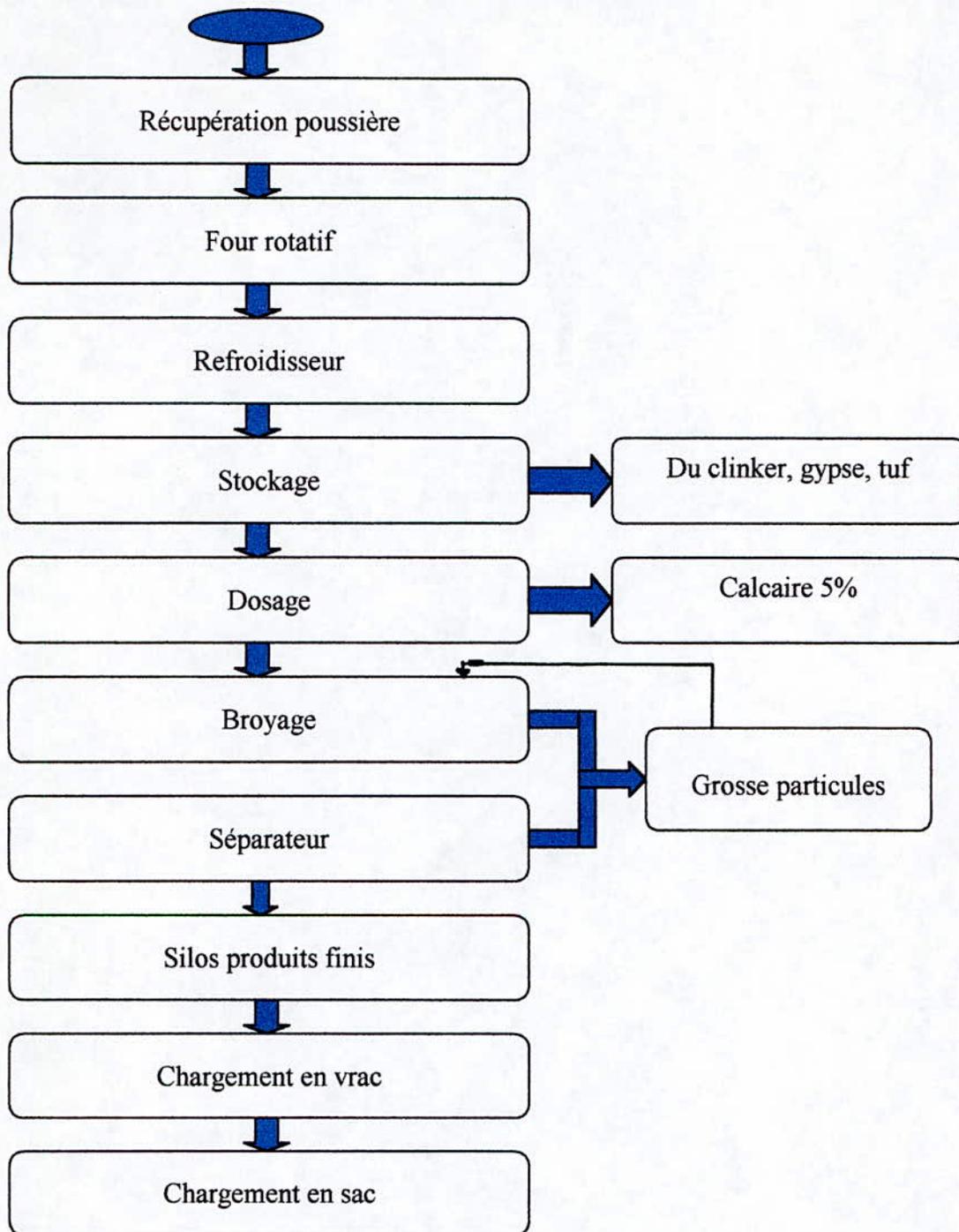
Les réserves exploitables des calcaires du principal niveau productif jusqu'à la cote 235 m sont :

Catégorie [B]	14.3 millions de tonnes
Catégorie [C1]	11 millions de tonnes
Catégorie [B+C1]	25 millions de tonnes

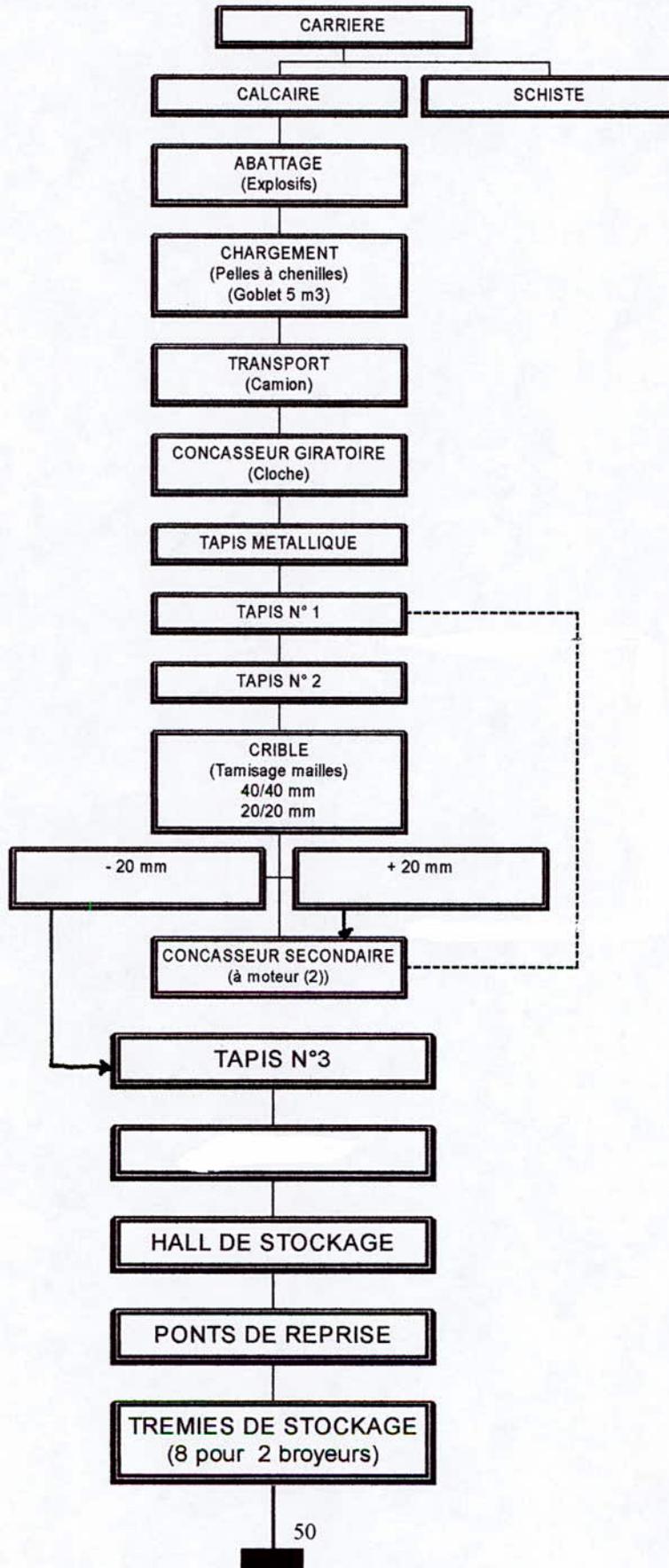
VI - La cimenterie : Aspect métallurgique

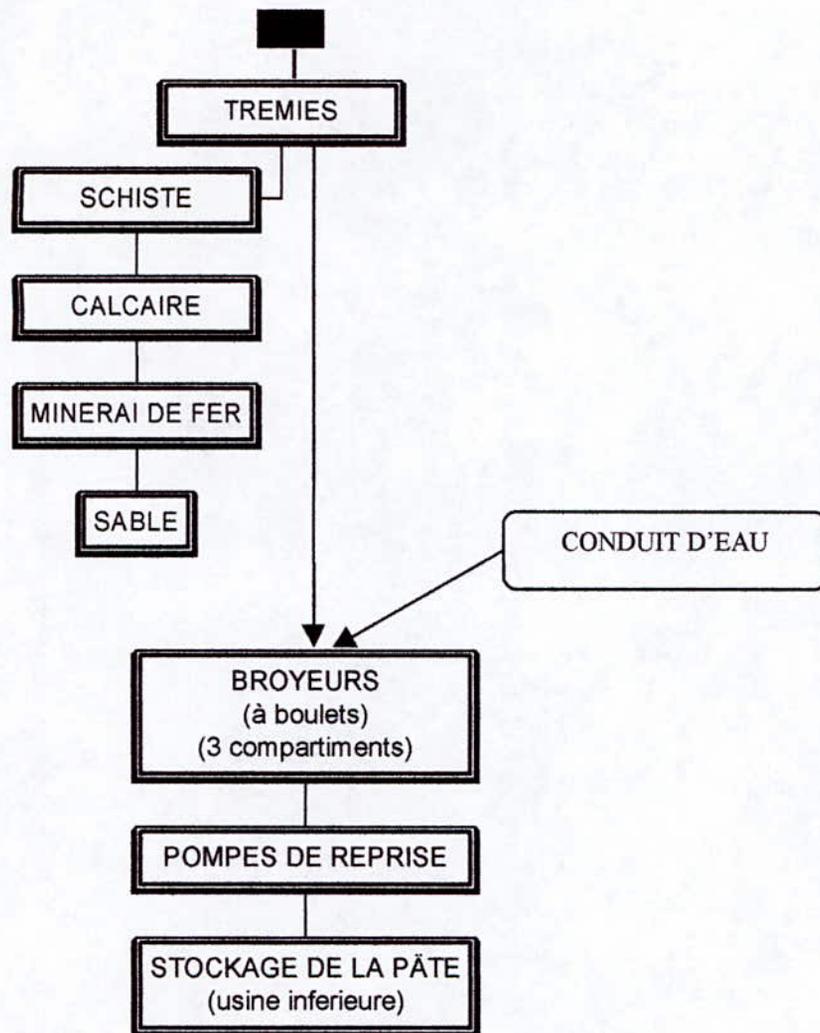
SCHEMA DE LA CHAINE TECHNOLOGIQUE POUR LA FABRICATION DU CIMENT DANS L'USINE DE RAIS-HAMIDOU





ATELIER DE PREPARATION MECANIQUE DE LA CIMENTERIE





Appareils	Débits
Concasseur	280 T/H
Broyeurs N°1 et N°2	45 T/H
Camion	30 T

CORPS BROYANTS			
Compartiments	Forme	Appellation	Dimensions (mm)
I	Sphérique	Boulets	90 ; 80 ; 70 ; 60
II	Sphérique	Boulets	60 ; 50 ; 30
III	Cylindrique	Gylepebs	L : 25 ; D : 25

CHAPITRE V
IDENTIFICATION ET
PREPARATION MECANIQUE
DE L'ECHANTILLON

IDENTIFICATION ET PREPARATION MECANIQUE DE L'ECHANTILLON

I – Echantillonnage :

L'échantillonnage est une opération permettant d'obtenir des échantillons ou prélèvements représentatifs et homogènes d'un tas de minerai.

Au laboratoire deux méthodes sont généralement utilisées :

- Par quartage ;
- Par division.

Nous avons opté pour la division : cette technique consiste à diviser un lot de minerai en deux parties homogènes, l'une servant pour les travaux et analyses, quant à l'autre représentant l'échantillon témoin. Nos échantillons ont été pris en vrac après l'abattage par explosif

- Procédure opératoire d'identification:

Deux variantes de schémas technologiques de fragmentation, incluant différents stades de concassage, broyage et classification, se référeront aux schémas types de concassage et de broyage, provenant de diverses sources bibliographiques.

Faisant suite aux tests de concassage, broyage et classification au laboratoire, une variante de schéma technologique sera retenue. Une comparaison entre cette variante de schéma et celle de la section de la cimenterie sera envisagée, en considérant les paramètres technico-économiques, en vue de dégager une conclusion et des recommandations.

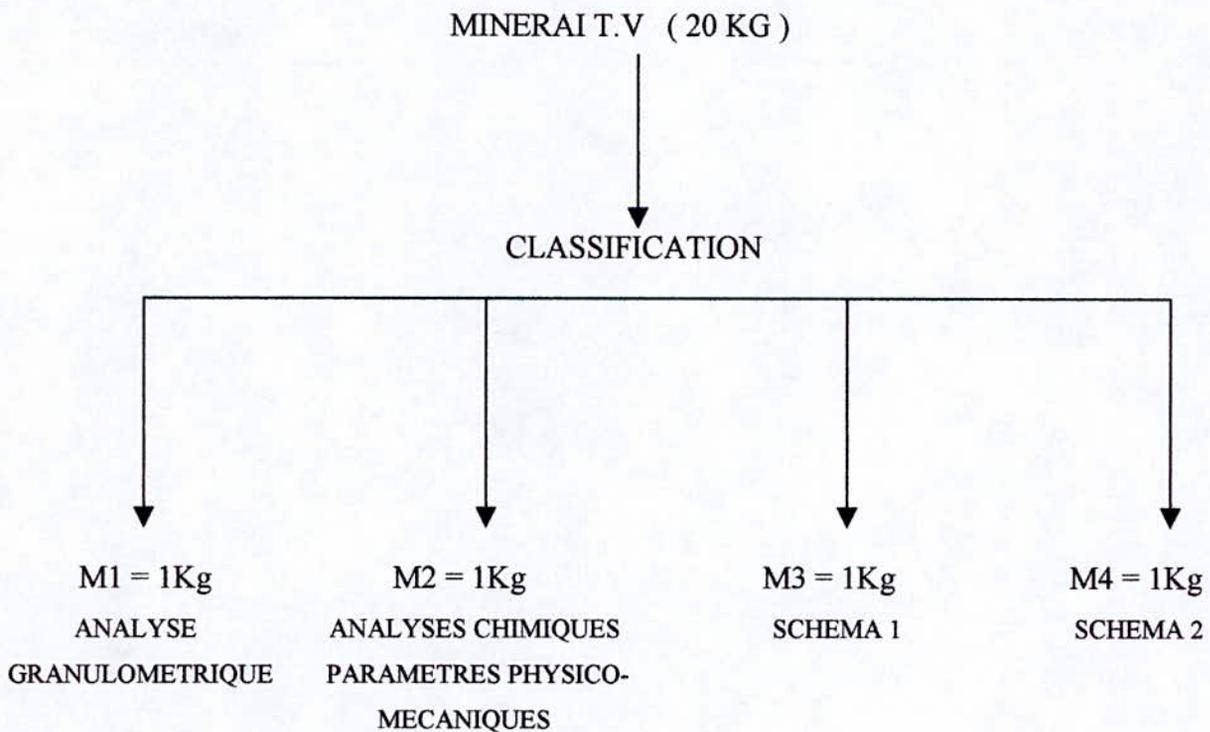
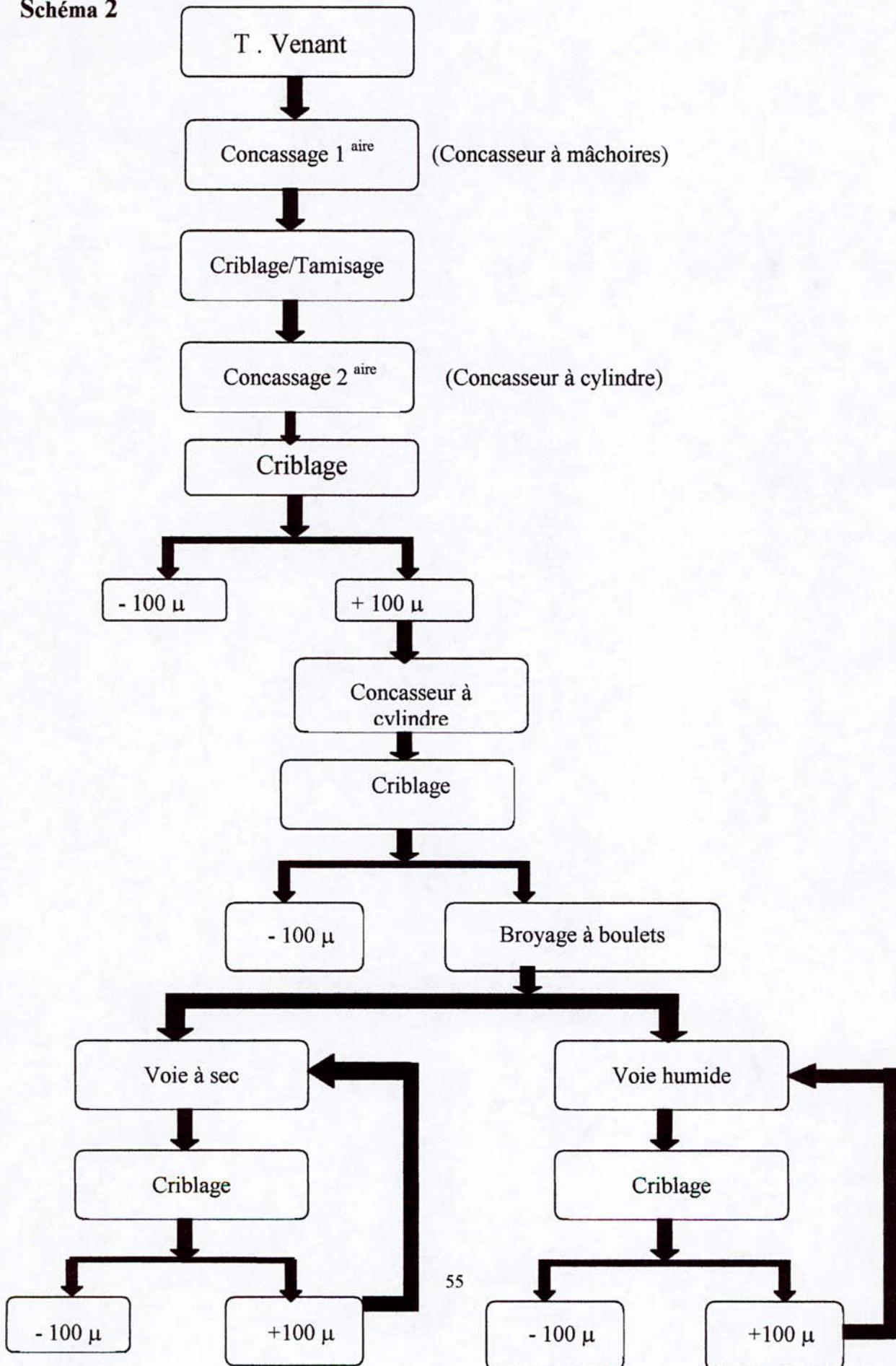


Schéma 2



II - Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique a été effectuée à l'aide d'une série de tamis de type (AFNOR 3 NFX II – 501) d'ouverture carrée, variant de 5 à 0.425 mm .

Les résultats de cette analyse sont dans le tableau suivant :

TRANCHE GRANULOMETRIQUE (mm)	REFUS (g)	REFUS (%)	REFUS CUMULE (%)	PASSANT CUMULE (%)
+ 5	879,7	88,2	88,2	11,8
-5 ; +4	53,8	5,4	93,6	6,4
-4 ; +3,15	17,8	1,8	95,4	4,6
-3,15 ; +2,5	12	1,2	96,6	3,4
-2,5 ; +2	8,6	0,9	97,4	2,6
-2 ; +1,6	3,9	0,4	97,8	2,2
-1,6 ; +1,25	3,8	0,4	98,2	1,8
-1,25 ; +1	2,5	0,3	98,5	1,5
-1 ; +0,8	1,9	0,2	98,7	1,3
-0,8 ; +0,63	1,8	0,2	98,8	1,2
-0,63 ; +0,5	1,5	0,2	99,0	1,0
-0,5 ; +0,425	1,2	0,1	99,1	0,9
- 0,425	8,66	0,7	100,0	0
ALIMENTATION	997,42	100 %		

III - Détermination des paramètres physiques du minerai :

III – 1 Mesure de la dureté :

Ce paramètre a été déterminé au niveau du laboratoire géologique par la méthode de l'échelle de MOHS . (Annexe 3)

On trouve : D compris entre 2 et 4 sur l'échelle de MOHS.

III – 2 calcul de la porosité :

On appelle porosité d'une roche, le volume des vides contenu dans l'unité de volume. (Annexe 3)

$$P (\%) = [\text{Volumes des Vides} / \text{Volume de la matière}] * 100$$

$$P (\%) = 5.13 \%$$

III – 3 calcul de la surface spécifique :

La surface spécifique est calculée par formule suivante (**Annexe 3**) :

$$S.s = \frac{K * \sqrt{T * e^3}}{(1 - e) * \rho * \sqrt{\eta}}$$

$$S.s = 126 [\text{m}^2/\text{kg}]$$

III – 4 calcul du taux d'humidité :

Ce paramètre a été déterminé au laboratoire de notre département, on le calcule d'après la formule suivante (**Annexe 3**):

$$T (\%) = 100 * (M1 - M0) / M1$$

$$T (\%) = 4.11\%$$

IV - Etude minéralogique et pétrographique :

Cette étude a été réalisée au laboratoire du département GENIE MINIER.

Notre travail consiste à préparer des lames minces et à entreprendre une description assez précise de ces lames à l'aide du microscope minéralogique. (**Annexe photos**)

- Description:

On découvre une forte présence de cristaux de calcite. Ils sont soit déformés, soit fracturés. Ces fractures sont opaques et elles sont remplies par des cristaux de pyrite (visible à l'œil nu), et d'hématite.

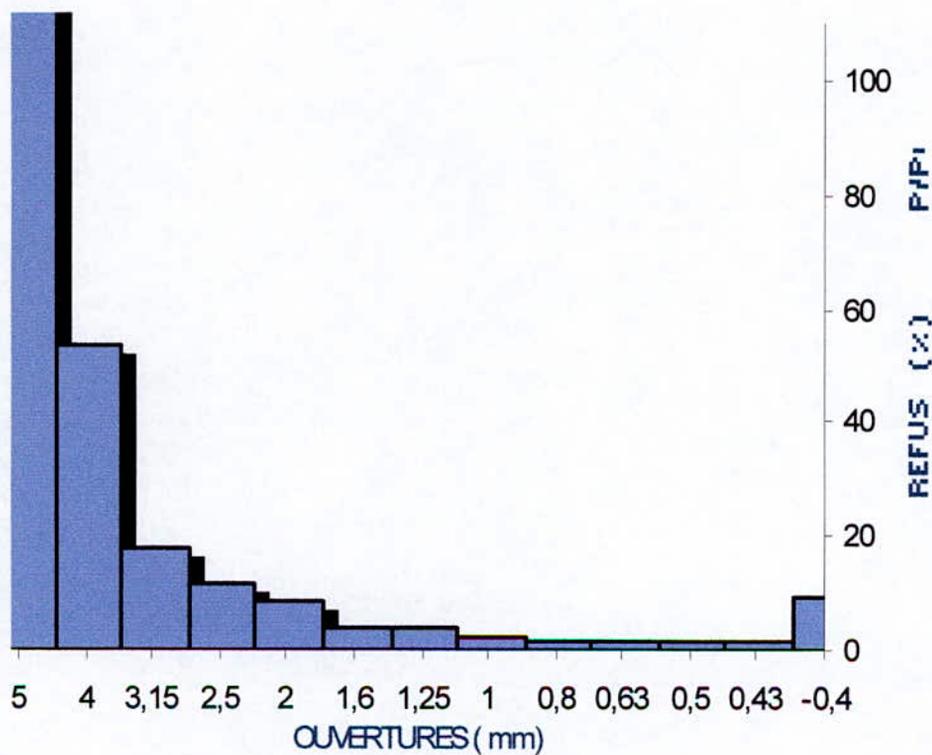
Texture : cristalline

V - Analyse chimique :

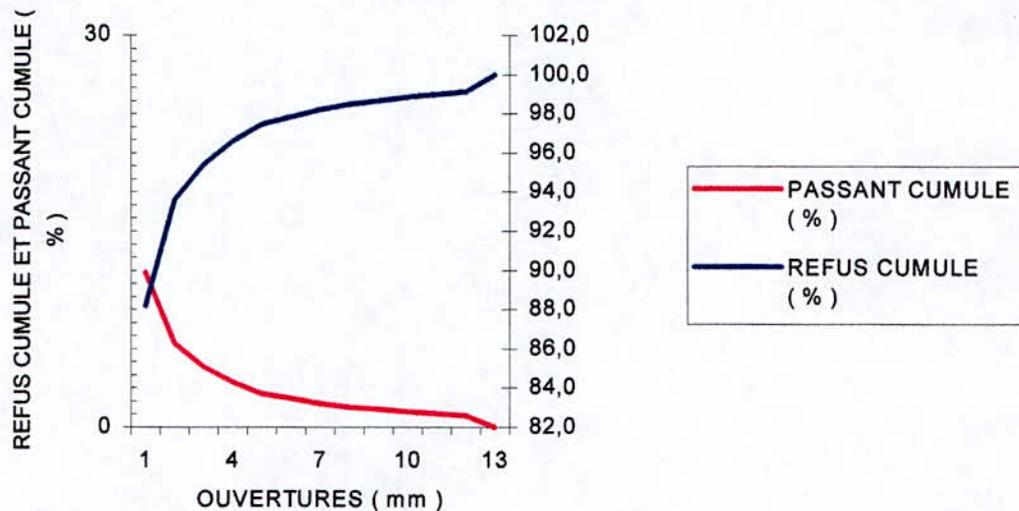
Ces analyses permettent de déterminer la teneur en carbonate de calcium, en silice, en oxyde de fer, en alumine, qui sont les éléments majeurs et celle des éléments mineurs ou impuretés que l'on risque de rencontrer, tels que : MgO, SO₃, Na₂O, TiO₂, FeO₅, MO.

COMPOSANT	TENEUR (%)
SiO ₂	7,3
Al ₂ O ₃	2,06
CaO	49,1
Fe ₂ O ₃	1,6
P.A.F	39,72

ANALYSE GRANULOMETRIQUE



VARIATION DES REFUS CUMULES ET PASSANT CUMULES EN FONCTION DES CLASSES



- INTERPRETATION :

L'analyse granulométrique a montré que :

- La répartition granulométrique du minerai est hétérogène ; cela indique aussi que la résistance mécanique des différents composants minéralogiques de l'échantillon est très variable .
- La courbe du refus cumulé représente une forme convexe , ce qui indique qu'il y ait prédominance de gros grains dans notre échantillon ; cela nous conduit à prévoir un concassage secondaire.

VI – Etude de concassage:

VI – 1 Procédure opératoire:

Pour l'étude de la *concassabilité* des matériaux, on a procédé de la façon suivante :

• Préconcassage :

Le but de cette phase, est de réduire les gros blocs de dimensions comprises entre 15 à 20 cm, pour obtenir des échantillons adéquats à notre étude, en pratiquant :

- Une fragmentation à la masse :
- Cela consiste à diminuer les dimensions des blocs initiaux, afin d'obtenir des blocs de dimensions comprises entre 50 et 70 mm.
- Un préconcassage à l'aide d'un concasseur à mâchoires avec une ouverture de sortie égale à 10 mm.
- A la fin, on fait la division du matériau, pour que ce dernier soit homogène le plus possible.

• Le concassage primaire :

Il se pratique à l'aide d'un concasseur à mâchoires type SE . 35 DRAGON ; nous déterminons le rendement, en faisant varier la dimension de l'ouverture de décharge du concasseur pour les valeurs suivantes : 10 ; 6 ; 4 ; 3 mm .

• Le concassage secondaire:

Nous proposons l'utilisation de deux types de concasseur, l'un à mâchoires et l'autre à cylindres, une comparaison en matière de rendement, d'efficacité, de résistance à l'usure ou à l'abrasion vis-à-vis de ces deux agrégats devrait apparaître en fin d'étude.

L'ouverture de décharge du concasseur à mâchoires sera celle qui donnera le meilleur rendement ; Quant au concasseur à cylindre, la variation dimensionnelle de l'espace

rendement ; Quant au concasseur à cylindre, la variation dimensionnelle de l'espace compris entre les deux cylindres (soient 6 ; 5 ; 4 ; 3) devrait permettre d'optimiser son rendement.

VI – 2 Résultats des tests:

– Concassage primaire (D = 10 mm ; R = 3.6) :

R: Rapport de réduction

TRANCHE GRANULOMETRIQUE	REFUS (g)	REFUS (%)
+ 5	778,1	77,94
-5 ; +4	64,2	6,43
-4 ; +3,15	26,3	2,63
-3.15 ; +2	14,6	1,46
-2 ; +1,6	12,5	1,25
-1.6 ; +1,25	9,8	0,98
-1.25 ; +1	7,9	0,79
-1 ; +0,8	7,5	0,75
-0.8 ; +0,5	6,9	0,69
-0.5 ; +0,425	5,9	0,59
-0,425	64,6	6,47
ALIMENTATION	998,3	

– Concassage primaire (D = 6 mm ; R = 4) :

TRANCHE GRANULOMETRIQUE	REFUS (g)	REFUS (%)
+ 5	478,2	47,90
-5 ; +4	139,5	13,97
-4 ; +3,15	96,2	9,63
-3.15 ; +2	52,6	5,27
-2 ; +1,6	31,6	3,16
-1.6 ; +1,25	28,6	2,86
-1.25 ; +1	21,9	2,19
-1 ; +0,8	18,2	1,82
-0.8 ; +0,5	15,6	1,56
-0.5 ; +0,425	13,7	1,37
-0,425	102,6	10,27
ALIMENTATION	998,7	

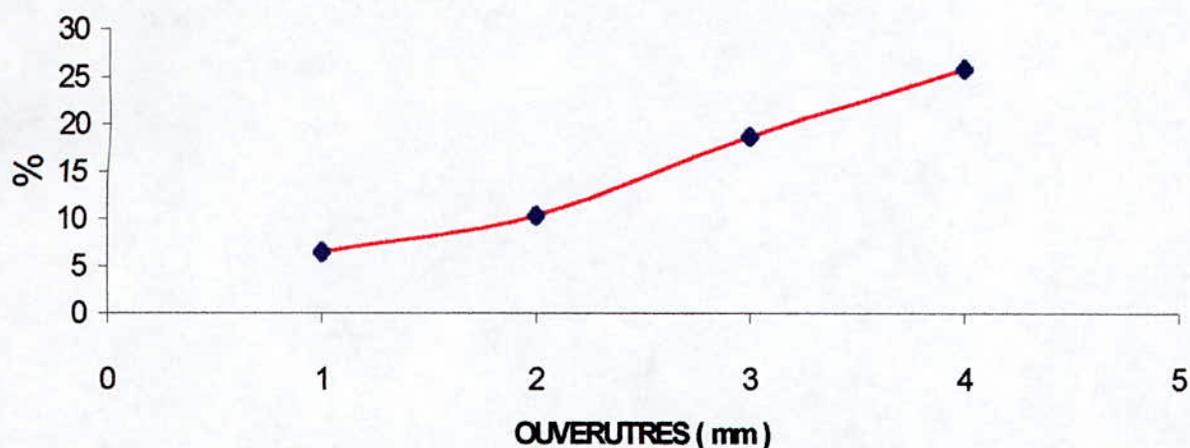
– Concassage primaire (D = 4 mm ; R = 4.4) :

TRANCHE GRANULOMETRIQUE	REFUS (g)	REFUS (%)
+ 5	106,5	10,67
-5 ; +4	126,8	12,70
-4 ; +3,15	126,3	12,65
-3.15 ; +2	122,1	12,23
-2 ; +1,6	98,6	9,87
-1.6 ; +1,25	79,6	7,97
-1.25 ; +1	68,7	6,88
-1 ; +0,8	43,2	4,33
-0.8 ; +0,5	25,3	2,53
-0.5 ; +0,425	15,3	1,53
-0,425	186,3	18,65
ALIMENTATION	998,7	

– Concassage primaire (D = 3 mm ; R = 7.5) :

TRANCHE GRANULOMETRIQUE	REFUS (g)	REFUS (%)
+ 5	47,5	4,76
-5 ; +4	45,2	4,53
-4 ; +3,15	105,6	10,59
-3.15 ; +2	124,6	12,49
-2 ; +1,6	102,5	10,28
-1.6 ; +1,25	83,4	8,36
-1.25 ; +1	75,2	7,54
-1 ; +0,8	45,6	4,57
-0.8 ; +0,5	45,2	4,53
-0.5 ; +0,425	65,1	6,53
-0,425	257,3	25,80
ALIMENTATION	997,2	

VARIATION DU RENDEMENT EN FINES EN FONCTION DES OUVERTURES
(CONCASSAGE PRIMAIRE)



– Concassage secondaire avec concasseur à mâchoires (D = 3 mm ; R = 1.9):

TRANCHE GRANULOMETRIQUE	REFUS (g)	REFUS (%)
+ 5	17,8	1,78
-5 ; +4	22,3	2,24
-4 ; +3,15	35,9	3,60
-3.15 ; +2	38,9	3,90
-2 ; +1,6	49,2	4,93
-1.6 ; +1,25	64,9	6,51
-1.25 ; +1	86,5	8,67
-1 ; +0,8	129,9	13,03
-0.8 ; +0,5	96,5	9,68
-0.5 ; +0,425	186,7	18,72
-0,425	268,7	26,94
ALIMENTATION	997,3	

- Concassage secondaire avec concasseur à cylindres:

D = 6 mm ; R = 2 – 2.5

TRANCHE GRANULOMETRIQUE	REFUS (g)	REFUS (%)
+ 5	8,7	0,87
-5 ; +4	11,9	1,19
-4 ; +3,15	39,4	3,95
-3.15 ; +2	88,6	8,88
-2 ; +1,6	89,9	9,01
-1.6 ; +1,25	98,1	9,84
-1.25 ; +1	90,1	9,03
-1 ; +0,8	109,5	10,98
-0.8 ; +0,5	99,1	9,94
-0.5 ; +0,425	130,5	13,08
-0,425	231,6	23,22
ALIMENTATION	997,4	

D = 5 mm ; R = 2 – 2.4

TRANCHE GRANULOMETRIQUE	REFUS (g)	REFUS (%)
+ 5	7,6	0,76
-5 ; +4	10,6	1,06
-4 ; +3,15	38,5	3,85
-3.15 ; +2	85,3	8,53
-2 ; +1,6	88,8	8,88
-1.6 ; +1,25	97,6	9,76
-1.25 ; +1	88,6	8,86
-1 ; +0,8	107,6	10,77
-0.8 ; +0,5	99,3	9,93
-0.5 ; +0,425	136,4	13,65
-0,425	239,2	23,93
ALIMENTATION	999,5	

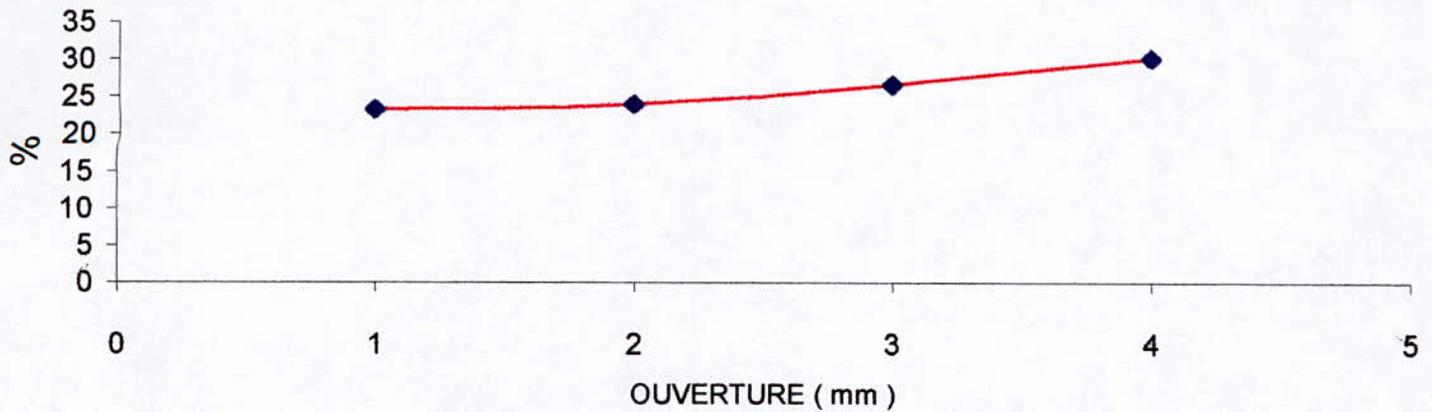
D = 4 mm ; R = 2.35 – 2.94

TRANCHE GRANULOMETRIQUE	REFUS (g)	REFUS (%)
+ 5	6,9	0,69
-5 ; +4	10,9	1,09
-4 ; +3,15	37,5	3,75
-3.15 ; +2	80,6	8,06
-2 ; +1,6	46,8	4,68
-1.6 ; +1,25	69,6	6,96
-1.25 ; +1	81,9	8,19
-1 ; +0,8	117,7	11,78
-0.8 ; +0,5	96,5	9,65
-0.5 ; +0,425	185,5	18,56
-0,425	265,6	26,57
ALIMENTATION	999,5	

D = 3 mm ; R = 2.86 – 3.43

TRANCHE GRANULOMETRIQUE	REFUS (g)	REFUS (%)
+ 5	3,5	0,35
-5 ; +4	6,2	0,62
-4 ; +3,15	24,6	2,46
-3.15 ; +2	74,8	7,48
-2 ; +1,6	36,5	3,65
-1.6 ; +1,25	61,9	6,19
-1.25 ; +1	80,6	8,06
-1 ; +0,8	114,6	11,46
-0.8 ; +0,5	98,3	9,83
-0.5 ; +0,425	197,3	19,73
-0,425	301,5	30,16
ALIMENTATION	999,8	

RENDEMENT EN FINES EN FONCTION DES OUVERTURES (CONCASSAGE SECONDAIRE)



VI-3 Conclusion :

En comparant les deux types de concassage, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Le concassage secondaire donne un meilleur rendement que celui du concassage primaire ;
- Il y a une meilleure répartition des fractions granulométriques après le concassage secondaire ;
- Le concasseur à cylindres est plus efficace que le concasseur à mâchoires, car il joue le rôle de concasseur et broyeur simultanément.

VII - Etude de broyage

On utilise deux modes de broyages :

- 1 - Broyage à voie sèche ;
- 2 - Broyage à voie humide.

La comparaison de ces deux modes de broyage se pratiquera selon deux schémas

technologiques distincts. Cette étude portera sur des tests d'optimisation des paramètres technologiques.

VII – 1 Broyage à voie sèche :

Les paramètres technologiques investigués sont :

- La durée du broyage (durée de rétention) ;
- La charge broyante (boulets , boules) ;
- La vitesse de rotation du tambour.

VII – 1 – 1 Procédure opératoire :

Les tests réalisés sur le broyeur du laboratoire, nous indique que la vitesse de rotation du tambour reste fixe.

- On fixe la masse de la charge broyante, et on varie la durée de broyage (15 ; 30 ; 45 ; 60 min) ; Après avoir retenu la meilleure durée permettant d'obtenir le meilleur rendement en produit fini ;
- On fixera cette durée de rétention, et on variera la masse de la charge broyante jusqu'à obtention du meilleur rendement en produit fini.

- Remarque :

Ces expériences s'appliquent sur :

- un minerai qui a subi un concassage secondaire, à l'aide d'un concasseur à mâchoires ;
- un minerai qui a subi un concassage secondaire, à l'aide d'un concasseur à cylindres.

VII – 1 – 2 Résultats des tests : (annexe n°1)

- ◆ Variation du rendement en fines (-100mm) en fonction de la durée de rétention et la masse broyante :

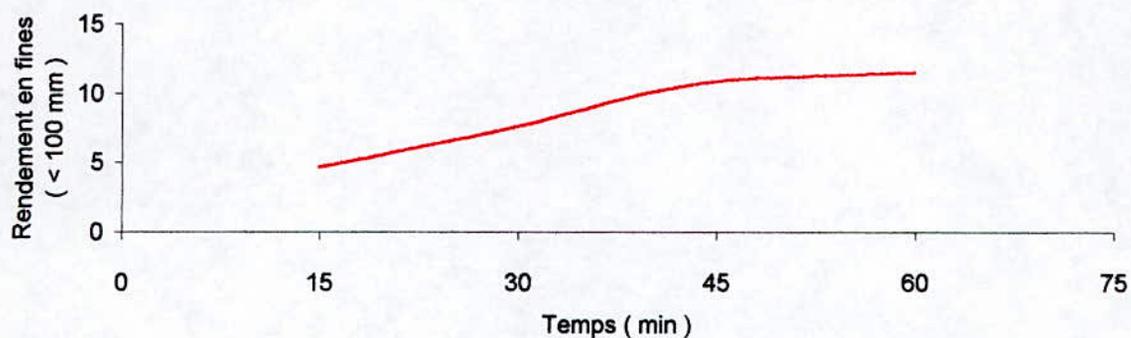
Concasseur à mâchoire

TEMPS (min)	MB=1793,1 g	MB=2756,5 g	MB=3671,9 g	MB=4593,7 g	MB=9202,9 g
	RENDEMENT EN FINES (-100 mm)				
15	4,62	32,17	33,12	42,51	59,50
30	7,59	34,52	35,75	43,81	64,98
45	10,68	34,66	36,00	43,88	65,22
60	11,52	34,75	36,10	44,17	65,31

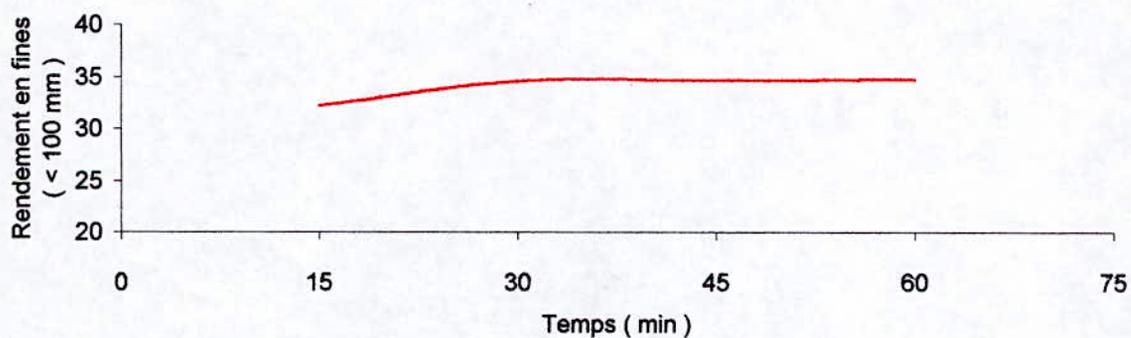
Concasseur à cylindre

TEMPS (min)	MB=9202,9 g
	RENDEMENT EN FINES (-100 mm)
15	58,22
30	67,05
45	67,24
60	67,33

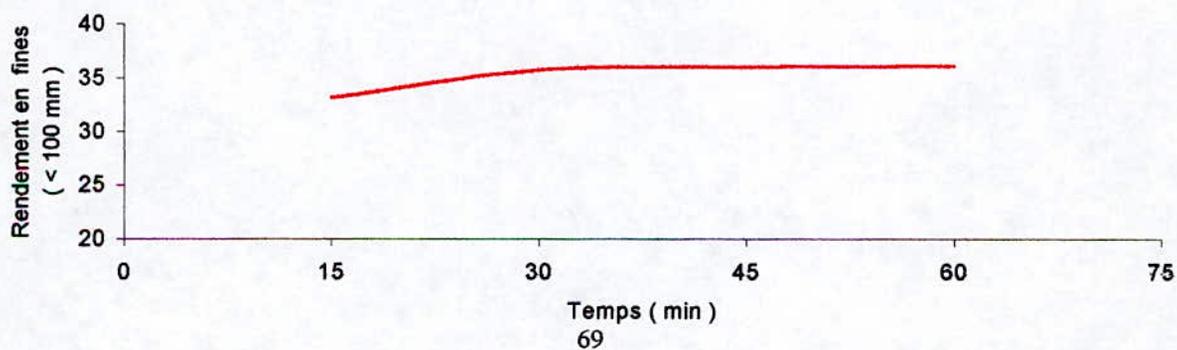
VARIATION DU RENDEMENT EN FINES EN FONCTION DU TEMPS
(MB=1793,1 g)



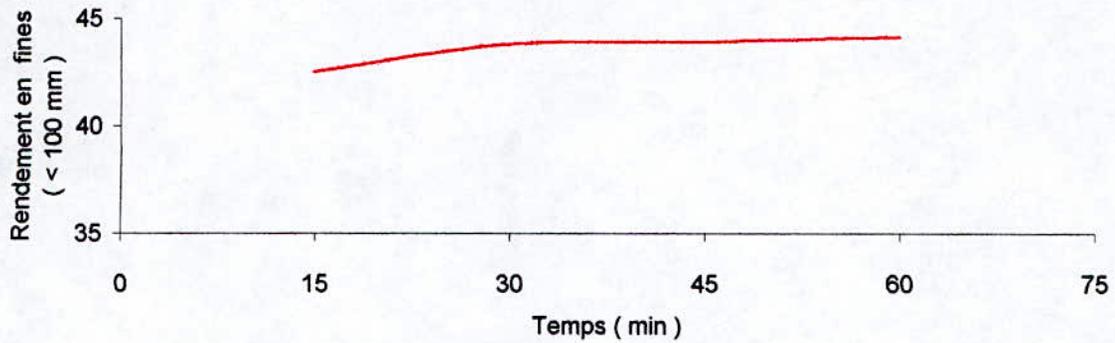
VARIATION DU RENDEMENT EN FINES EN FONCTION DU TEMPS
(MB=2756,5 g)



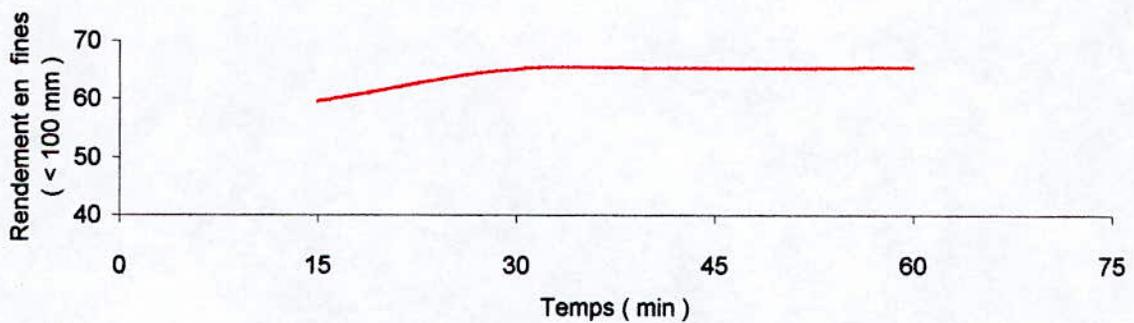
VARIATION DU RENDEMENT EN FINES EN FONCTION DU TEMPS
(MB=3671,9 g)



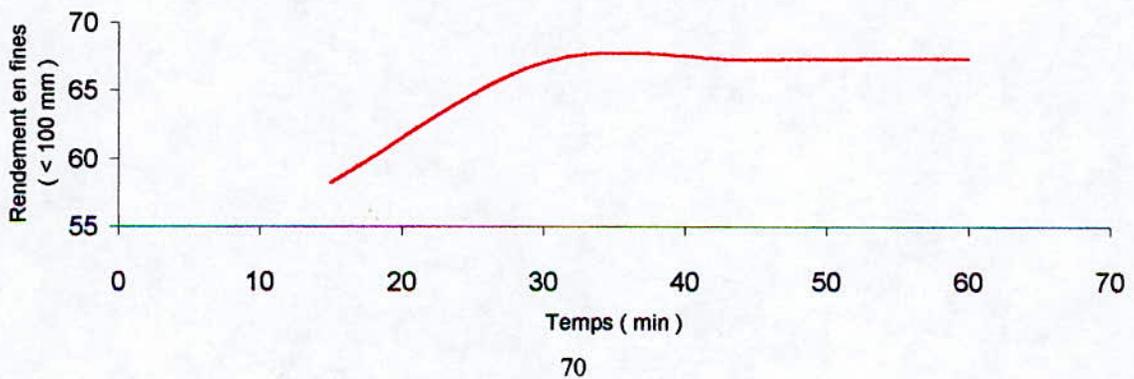
VARIATION DU RENDEMENT EN FINES EN FONCTION DU TEMPS (MB=4593,7 g)



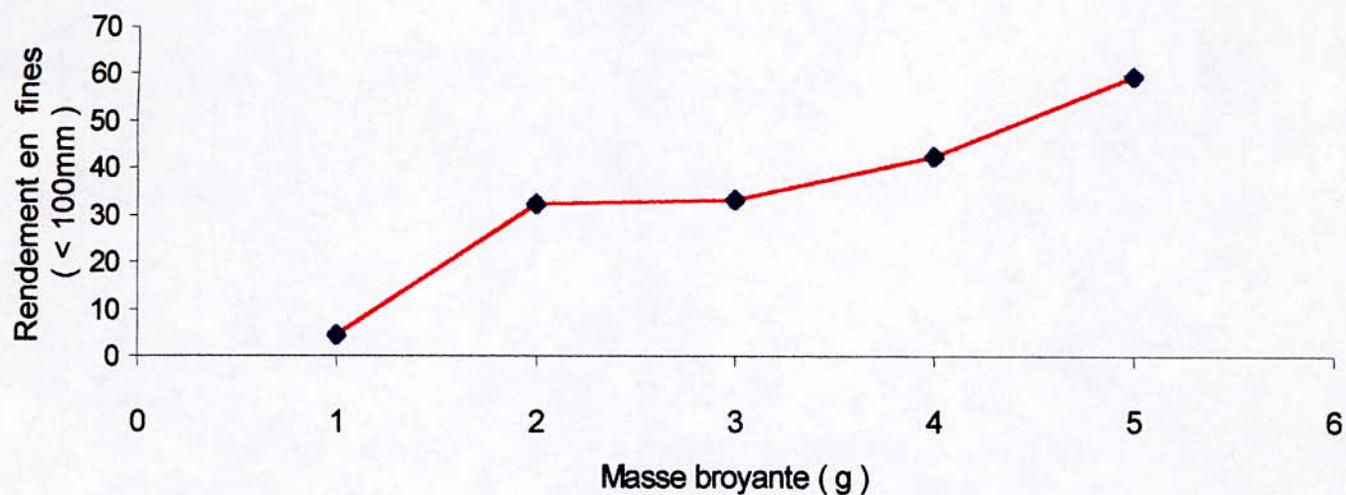
VARIATION DU RENDEMENT EN FINES EN FONCTION DU TEMPS (MB=9202,9 g)



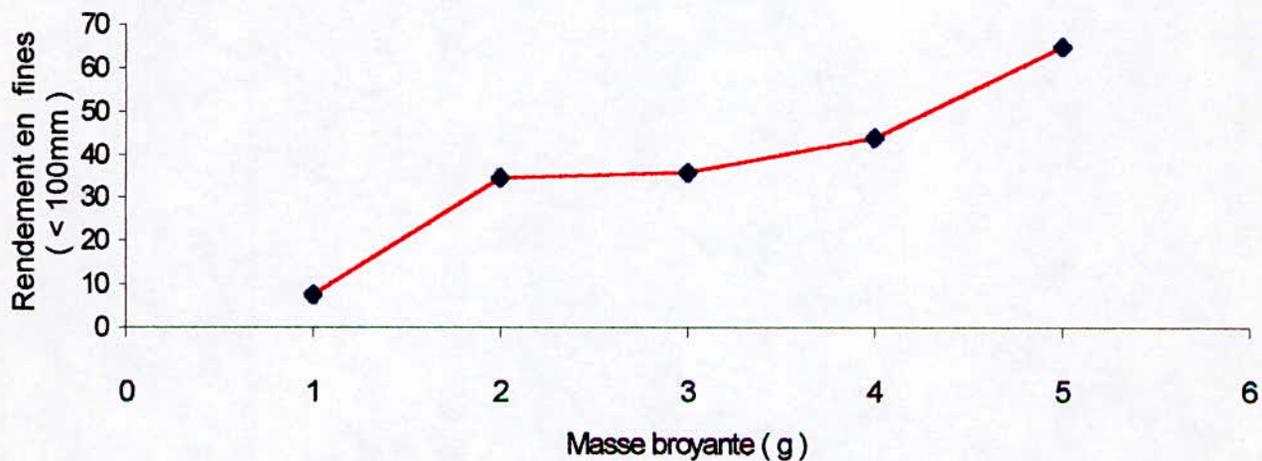
VARIATION DU RENDEMENT EN FINES EN FONCTION DU TEMPS (concasseur à cylindre)



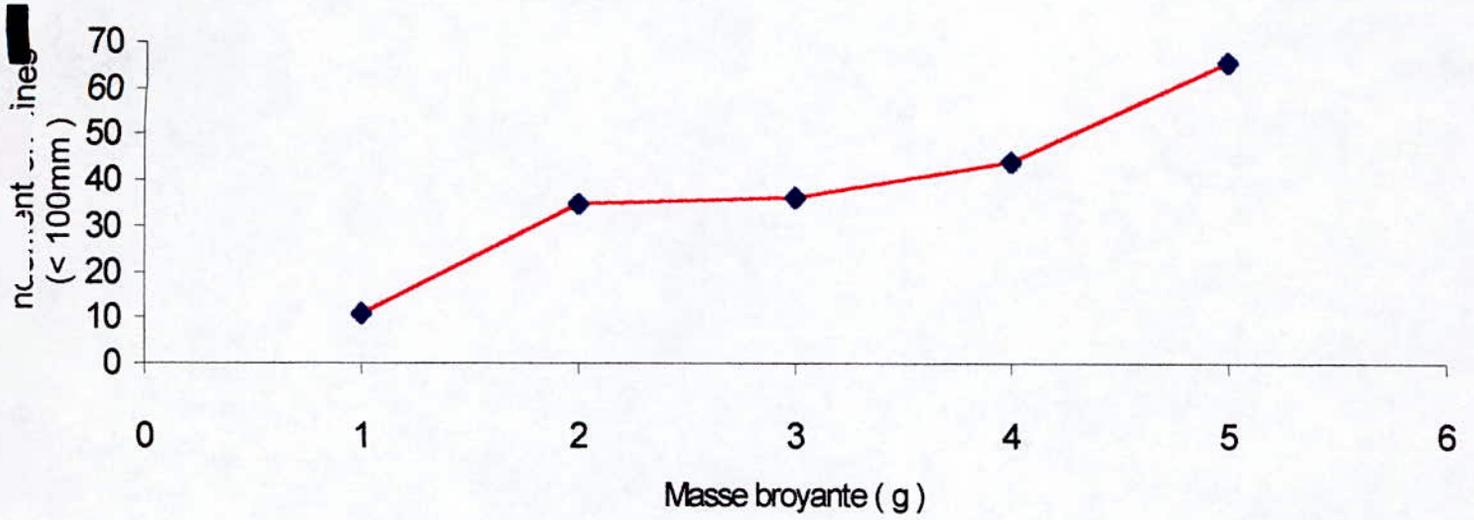
VARIATION DU RENDEMENT EN FINES EN FONCTION DE LA MASSE BROYANTE (T=15min)



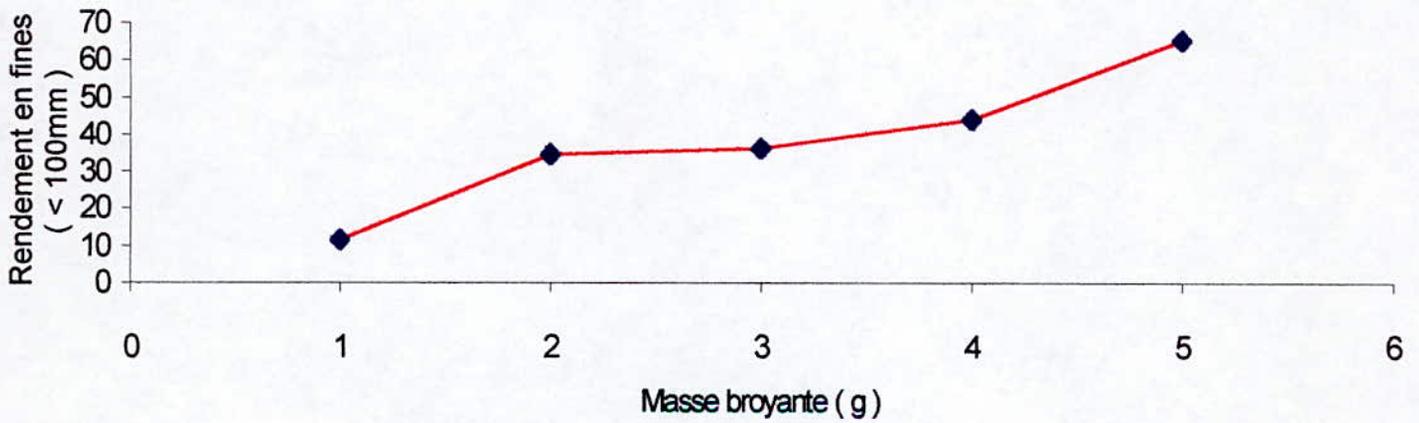
VARIATION DU RENDEMENT EN FINES EN FONCTION DE LA MASSE BROYANTE (T=30min)



VARIATION DU RENDEMENT EN FINES EN FONCTION DE LA MASSE BROYANTE (T=45min)



VARIATION DU RENDEMENT EN FINES EN FONCTION DE LA MASSE BROYANTE (T=60min)



VII – 1 – 3 Conclusion :

- L'influence de la masse de la charge broyante est très visible, sur le rendement du broyage à sec ;
- L'influence de la durée de rétention n'est pas très importante. En effet, dès que la durée dépasse 30 minutes, on observe une stabilisation du rendement.

VII – 2 Broyage a voie humide :

Dans ce type de broyage, nous observons l'influence des paramètres technologiques (rapport L/S ; durée de rétention ; charge broyante) sur le rendement en produit fini.

VII – 2 – 1 Procédure opératoire :

- Nous retiendrons la masse de la charge broyante, qui nous a procuré un rendement satisfaisant, lors du broyage à sec ;
- Nous fixerons la durée de rétention, et nous ferons varier le rapport L/S (25% ; 33% ; 50%) ;
- Nous fixerons le pourcentage optimisé du rapport L/S, tout en variant la durée de broyage (15 ; 25 ; 30 min) jusqu'à obtention du meilleur rendement en produit fini.

VII – 2 – 2 Résultats des tests : (voir annexe n°2)

- ♦ Variation du rendement en fines (<100mm), en fonction du rapport l/s :

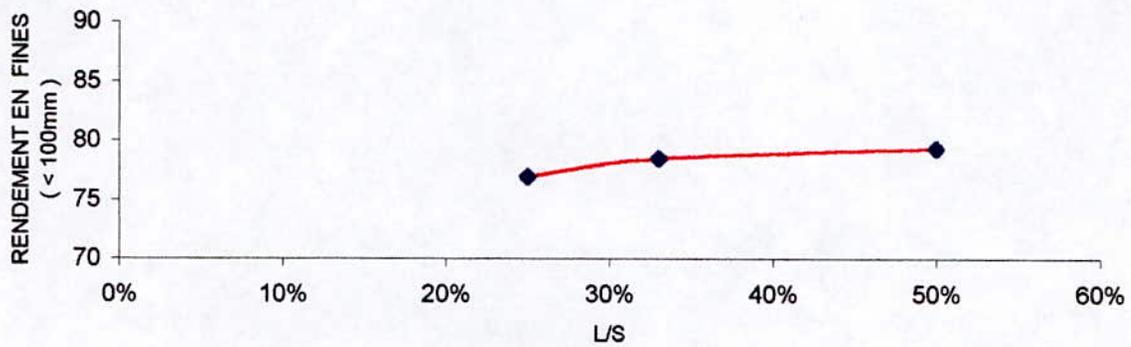
Concasseur à mâchoires

	T=15 min	T=25 min	T=30 min
L/S	% des grains <100 mm		
25%	76,92	78,31	83,70
33%	78,44	81,06	84,94
50%	79,31	82,31	85,85

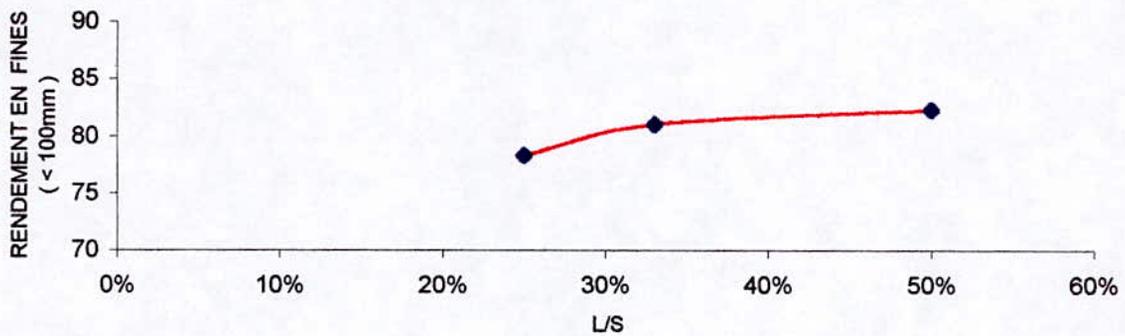
Concasseur à cylindres

	T=15 min	T=25 min	T=30 min
L/S	% des grains <100 mm		
25%	78,34	83,75	84,38
33%	80,68	84,04	85,82
50%	81,46	84,93	86,95

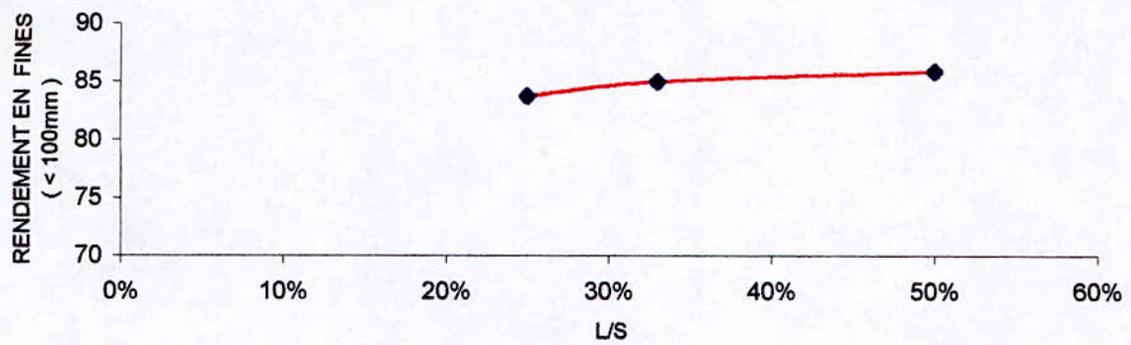
VARIATION DU RENDEMENT EN FINES EN FONCTION DU RAPPORT L/S
(T=15min)



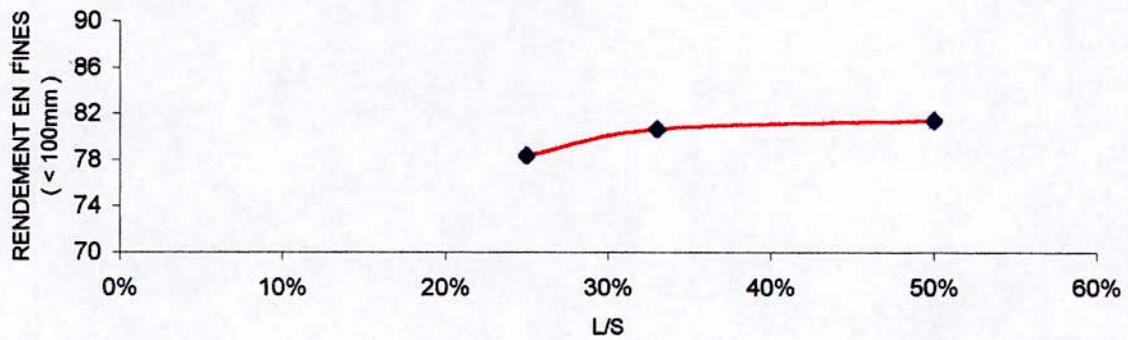
VARIATION DU RENDEMENT EN FINES EN FONCTION DU RAPPORT L/S
(T=25min)



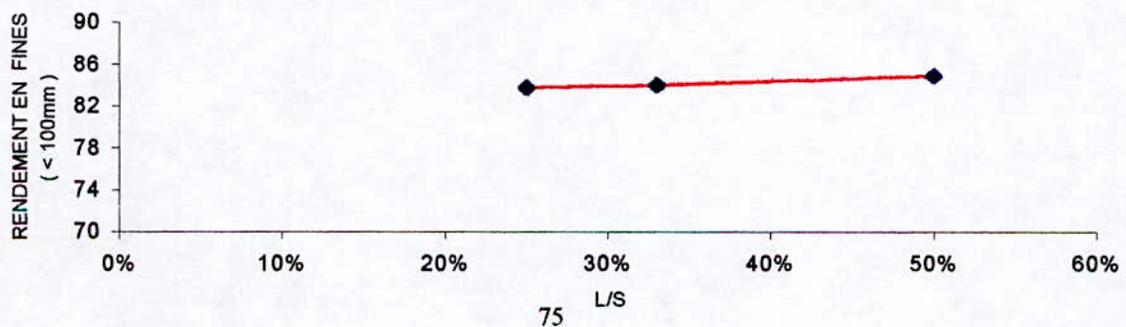
VARIATION DU RENDEMENT EN FINES EN FONCTION DU RAPPORT L/S
(T=30min)

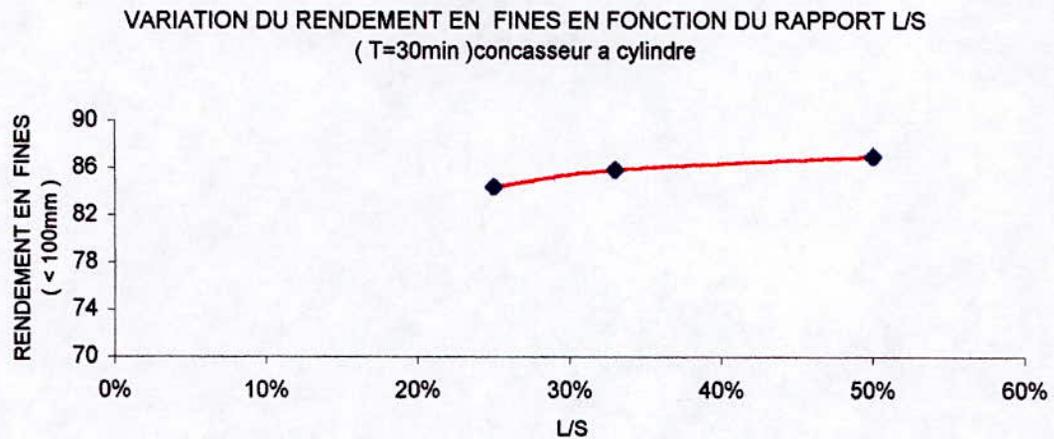


VARIATION DU RENDEMENT EN FINES EN FONCTION DU RAPPORT L/S
(T=15min)concasseur a cylindre



VARIATION DU RENDEMENT EN FINES EN FONCTION DU RAPPORT L/S
(T=25min)concasseur a cylindre





VII – 2 – 3 Conclusion :

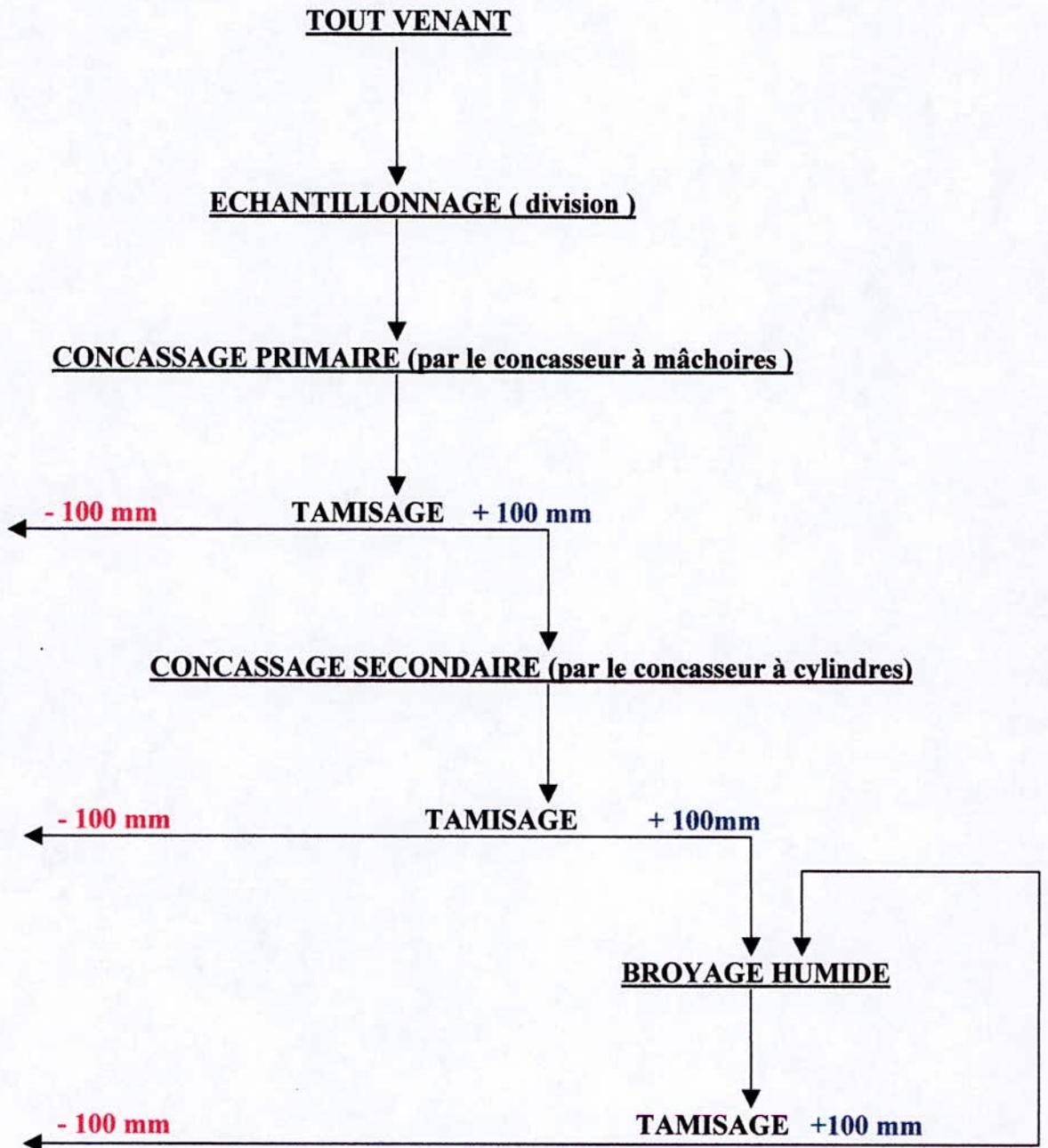
L'allure des graphes précédents, nous amène aux conclusion suivantes :

- Le rapport L/S influe positivement sur le rendement du broyage humide ;
- Le minerai qui a subi un concassage secondaire avec le concasseur à cylindres, nous a fourni des résultats très satisfaisants (rendement en fines [de -100mm] a atteint les 86.95%).

**CONCLUSION
GENERALE**

CONCLUSION GENERALE.

Les différents résultats qu'on a obtenu, nous amène à proposer un schéma technologique susceptible de donner satisfaction aux producteurs de ciment.



VERSIA
 Chimérisation

ANNEXES

En considérant les différents paramètres technologiques investigués dans les deux stades de la fragmentation (concassage et broyage), nous avons retenu ceux qui donnent un rendement maximal.

1 – CONCASSAGE :

- L'ouverture de décharge du concasseur à mâchoires devrait être réglée à la dimension $d = 3$ mm (concassage primaire);
- La dimension entre les deux cylindres ou de décharge du concasseur à cylindre devrait être réglée à $d = 3$ mm (concassage secondaire) si on considère uniquement l'aspect technologiques du processus.

2 – BROYAGE :

- Si nous optons, pour un broyage humide, nous retiendrons : durée de rétention égale à 30 minutes ; la masse de la charge broyante serait égale à 9202.9 gr ; le rapport L/S =33% ;
- Si nous optons, pour un broyage à sec, les paramètres retenus sont : une durée de rétention égale à 30 minutes ; la masse de la charge broyante égale à 9202.9 gr ;
- Le choix entre un broyage à voie sèche et le broyage à voie humide, désignera le premier type de broyage vu son rendement et une économie en eau.

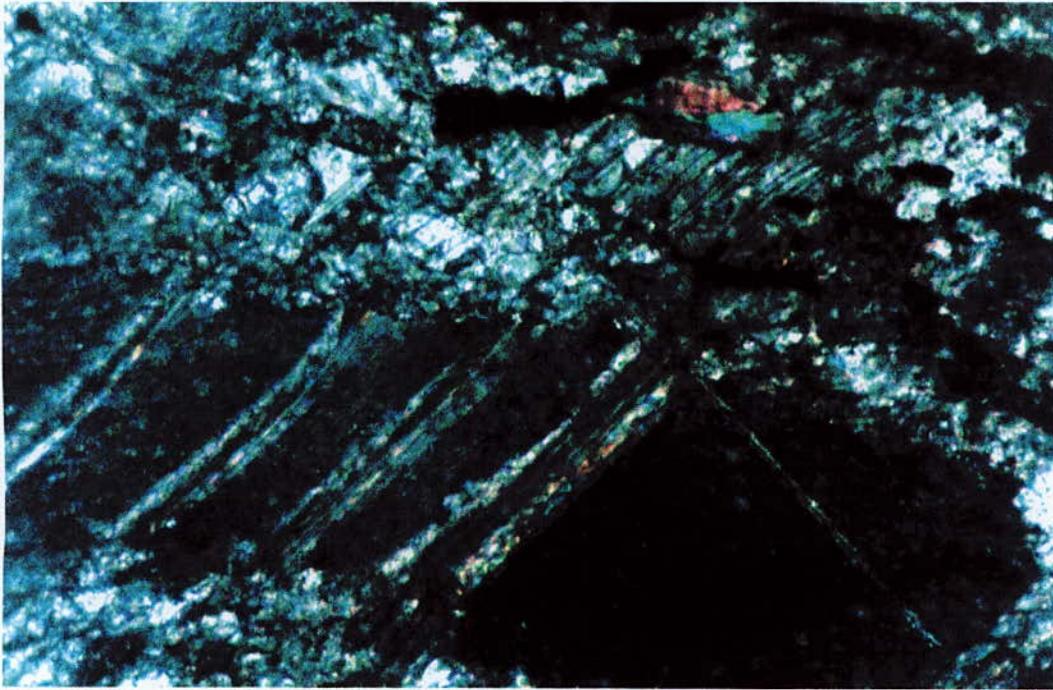


PHOTO 1: Avec agrandissement de 10 (page 1)



PHOTO 2: Avec agrandissement de 10 (page 2)

Annexe 1

RESULTATS DU BROYAGE A SEC

I – Concassage primaire et secondaire par le concasseur à mâchoire:

MB = 1793.1 gr

TAMIS	REFUS T=15min	REFUS T=30min	REFUS T=45min	REFUS T=60min
+ 0,5	602,3	570,5	210,4	79,2
-0.5 ; +0,315	223,1	165,3	187,2	181,2
-0.315 ; +0,15	60,2	131,6	335,3	435,2
-0.15 ; +0,1	67,1	54,9	158,1	186,2
- 0,1	46,1	75,7	106,5	114,8
Alimentation	998,8	998	997,5	996,6

MB = 2756.5 gr

TAMIS	REFUS T=15min	REFUS T=30min	REFUS T=45min	REFUS T=60min
+ 0,5	145,2	78,3	55,4	35,4
-0.5 ; +0,315	143,9	95,3	121,4	95,6
-0.315 ; +0,15	234,6	289,1	315,2	364,8
-0.15 ; +0,1	153,8	190,8	159,2	154,2
- 0,1	321,1	344,5	345,8	346,5
Alimentation	998,6	998	997	996,5

MB = 3671.9 gr

TAMIS	REFUS T=15min	REFUS T=30min	REFUS T=45min	REFUS T=60min
+ 0,5	67,7	44,5	38,2	22,9
-0.5 ; +0,315	205,6	187,4	165,5	135,8
-0.315 ; +0,15	217,9	211,6	241,7	360,8
-0.15 ; +0,1	177,2	197,4	192,1	116,6
- 0,1	330,5	356,6	358,9	359,6
Alimentation	998,9	997,5	996,4	995,7

MB = 4593.7 gr

TAMIS	REFUS T=15min	REFUS T=30min	REFUS T=45min	REFUS T=60min
+ 0,5	46,2	42,6	36,5	20,7
-0.5 ; +0,315	218,3	259,4	251,4	259,4
-0.315 ; +0,15	219,2	145	215,7	88,6
-0.15 ; +0,1	87,6	110,4	52,6	183,7
- 0,1	424,2	437,1	437,6	440,2
Alimentation	995,5	994,5	993,8	992,6

MB = 9202.9 gr

TAMIS	REFUS T=15min	REFUS T=30min	REFUS T=45min	REFUS T=60min
+ 0,5	8,6	4,4	4,1	3,6
-0.5 ; +0,315	22,5	18,6	17,6	16,2
-0.315 ; +0,15	26,5	33,9	56	100
-0.15 ; +0,1	346,8	291,8	268,2	224,6
- 0,1	593,8	648,5	650,6	651,2
Alimentation	998,2	997,2	996,5	995,6

II – Concassage primaire au concasseur à mâchoire, concassage secondaire au le concasseur à cylindre:

MB = 9202.9 gr

TAMIS	REFUS T=15min	REFUS T=30min	REFUS T=45min	REFUS T=60min
+ 0,5	1,1	5,5	10,2	12,5
-0.5 ; +0,315	35,9	12	30,5	47,2
-0.315 ; +0,15	150,3	187,3	184,1	133,2
-0.15 ; +0,1	229,9	123,8	101,2	132,1
- 0,1	581,3	668,6	669,2	669,8
Alimentation	998,5	997,2	995,2	994,8

Annexe 2

RESULTATS DU BROYAGE HUMIDE

I – Concassage primaire et secondaire par le concasseur à mâchoire:

T=15 minutes			
TAMIS	L/S=25%	L/S=33%	L/S=50%
+ 0,5	1,6	1,6	1,1
-0.5 ; +0,315	6,5	7,8	6,9
-0.315 ; +0,15	16,4	17,8	22,5
-0.15 ; +0,1	207,5	189,6	177,4
- 0,1	766,1	780,5	788,6
Alimentation	998,1	997,3	996,5

T=25 minutes			
TAMIS	L/S=25%	L/S=33%	L/S=50%
+ 0,5	1,5	1,1	0,6
-0.5 ; +0,315	5,9	7,7	7,6
-0.315 ; +0,15	14,9	17,8	16,2
-0.15 ; +0,1	196,3	164,4	153,1
- 0,1	779,2	806,5	818,7
Alimentation	997,8	997,5	996,2

T=30 minutes			
TAMIS	L/S=25%	L/S=33%	L/S=50%
+ 0,5	0,3	0,2	0,1
-0.5 ; +0,315	0,9	1,1	3,6
-0.315 ; +0,15	11,9	15,6	19,5
-0.15 ; +0,1	150,8	135,5	120,2
- 0,1	834,5	845,2	853,4
Alimentation	998,4	997,6	996,8

II – Concassage primaire au concasseur à mâchoire, concassage secondaire par le concasseur à cylindre:

T=15 minutes			
TAMIS	L/S=25%	L/S=33%	L/S=50%
+ 0,5	0,9	0,5	0,4
-0.5 ; +0,315	2,3	3,5	2,9
-0.315 ; +0,15	9,4	16,5	13,8
-0.15 ; +0,1	203,4	171,8	167,7
- 0,1	781,2	803,1	811,8
Alimentation	997,2	995,4	996,6

T=25 minutes			
TAMIS	L/S=25%	L/S=33%	L/S=50%
+ 0,5	0,6	0,3	0,1
-0.5 ; +0,315	2,2	3,9	3,7
-0.315 ; +0,15	10,9	14,3	12,6
-0.15 ; +0,1	148,5	140,7	133,6
- 0,1	836,2	838,3	845,6
Alimentation	998,4	997,5	995,6

T=30 minutes			
TAMIS	L/S=25%	L/S=33%	L/S=50%
+ 0,5	0,4	0,2	0,1
-0.5 ; +0,315	2,1	1,6	1,9
-0.315 ; +0,15	15,6	17,6	16,6
-0.15 ; +0,1	137,8	122	111,4
- 0,1	842,1	856,1	866,2
Alimentation	998	997,5	996,2

Annexe 3

TESTS OPERATOIRES DE LA DETERMINATION DES PROPRIETES PHYSIQUES DE L'ECHANTILLON

I – La dureté :

La dureté est définie par la capacité pour une surface minérale à résister aux rayures. La dureté relative des minéraux est déterminée selon l'échelle de dureté de MOHS. Dans l'échelle de « MOHS », du nom du minéralogiste allemand Freidrich Mohs qui l'inventa, on trouve dix minéraux communs rangés par ordre croissant de dureté, auxquels on a attribué un chiffre : 1 pour le Talc ; 2 pour le Gypse ; 3 pour la Calcite ; 4 pour la Fluorine ; 5 pour l'Apatite ; 6 pour l'Orthose ; 7 pour le Quartz ; 8 pour le Topaze ; 9 pour le Corindon ; 10 pour le Diamant .

Pour notre échantillon, il raye le Talc et le Gypse ; et il rayé par la Fluorine. Donc la dureté de notre échantillon est proche ou égale à 3.

II – Le taux d'humidité :

Le taux d'humidité est définit par le pourcentage d'eau, contenue dans l'échantillon. On a procédé de la manière suivante :

- Nous séchons l'échantillon, de masse M_1 à la température de $T^\circ = 103^\circ\text{c}$.
- nous pesons notre échantillon, après deux heures de séchage, Nous obtenons une nouvelle masse M_0 .

$M_1 = 170.2 \text{ gr}$;
 $M_0 = 163.2 \text{ gr}$.

$$T (\%) = (M_1 - M_0) * 100 / M_1$$

On trouve $T (\%) = 4.11\%$.

III – La porosité:

Toutes les roches présentent, dans une proportion plus ou moins grande, des fissures ou des petits vides, qui renferment souvent de l'eau. Certaines cavités communiquent avec l'extérieur : elles constituent la "porosité ouverte" ; les autres composent la "porosité fermée".

La porosité ouverte qui la plus importante en construction, car l'eau peut pénétrer dans les pores, et geler, en faisant éclater la roche . Il importait donc de caractériser la quantité des vides par une valeur numérique qui traduira (du moins sous cet angle) la plus ou moins bonne qualité du matériau.

On appelle porosité d'une roche, le volume des vides contenus dans l'unité de volume de matière :

$$P (\%) = (V_{\text{vides}} / V_{\text{matière}}) * 100$$

Principe :

- Chasser tout le liquide, et peser le matériau à sec .
- Remplir ces vides avec de l'eau.
- Une nouvelle pesée donnera le résultat recherché.

1.Préparation de l'échantillon :

- Quantité prélevée ni trop grande, ni trop petite (environ 1 kg).
- Pas de grains trop petits (au moins 10 g).

2.Sécher l'échantillon :

- Porter lentement à 103°C.
- L'y maintenir (thermostat) jusqu'à masse constante.

3.Peser l'échantillon sec :

- Soit M_0 .

4.Remplir les pores d'eau :

- Placer l'échantillon dans de l'eau froide, et porter à ébullition.
- Maintenir l'ébullition pendant 2 heures, pour chasser l'air des pores.
- Laisser refroidir dans l'eau, pour que l'eau rentre dans les pores.

5. Peser à nouveau :

- Auparavant, retirer de l'eau et essuyer chaque grains (chiffon).
- Nouvelle masse M_1 .

6. En déduire la porosité :

$M_1 - M_0$ représente la masse d'eau contenue dans les pores ; le même nombre mesure le volume de ces vides. Donc :

$$P (\%) = [(M_1 - M_0) / \text{Volume du matériau}] * 100$$

- Volume du matériau = Masse du matériau / Masse volumique absolue
- Donc :

$$P (\%) = (M_1 - M_0 / M_0) * \gamma * 100$$

- On a :

$$M_1 = 1013.4 \text{ g}$$

$$M_0 = 994.5 \text{ g}$$

$$\gamma = 2.7 \text{ g/cm}^2$$

IV – La surface spécifique :

Elle a été déterminée au niveau du laboratoire de la cimenterie de RAIS-HAMIDOU. A cet effet, nous avons utilisé l'appareil de « BLAINE » qui se compose essentiellement d'une cellule en métal inoxydable, ainsi qu'un manomètre en verre en forme de U, l'appareil est étalonné avec une poudre étalon, de surface spécifique et de masse volumique connue ; la masse spécifique est la surface exprimée en cm^2 par gramme de mouture.

Ce que nous mesurons, c'est le temps que met l'air à traverser la cartouche de poudre tassée, pour que le niveau d'un liquide non volatil, de faible densité, préalablement en dépression jusqu'à un

repère supérieur du tube manométrique, redescendre jusqu'au niveau d'un repère inférieur de ce tube.

$$S.s = \frac{K * \sqrt{T * e^3}}{(1-e) * \rho * \sqrt{\eta}}$$

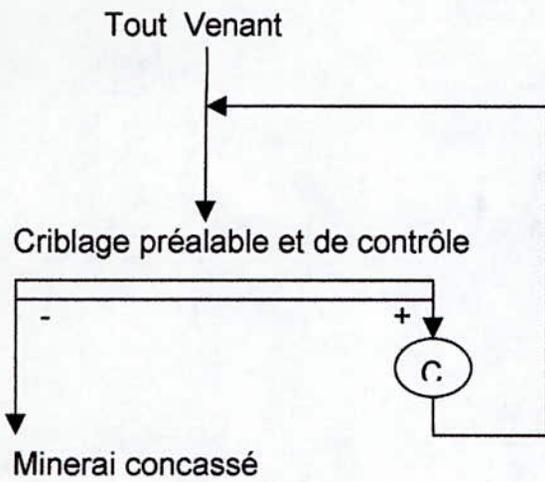
K : Constante de l'appareil égale a 19,87 .

η : Viscosité de l'air ; égale à $8,396 * 10^3$

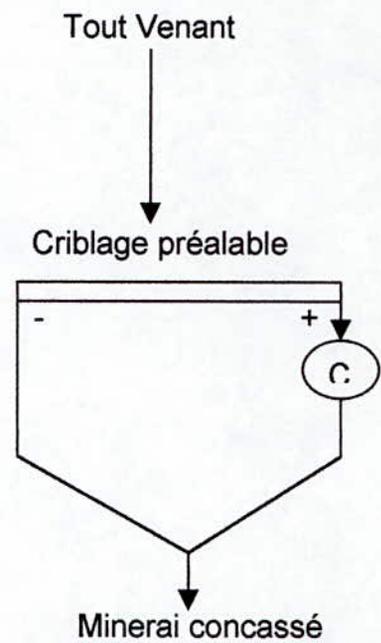
Nous trouvons : T = 52 s ; S.s = 126 m²/ kg.

**LES DIFFERENTS SCHEMAS DE CONCASSAGE
(UN SEUL STADE)**

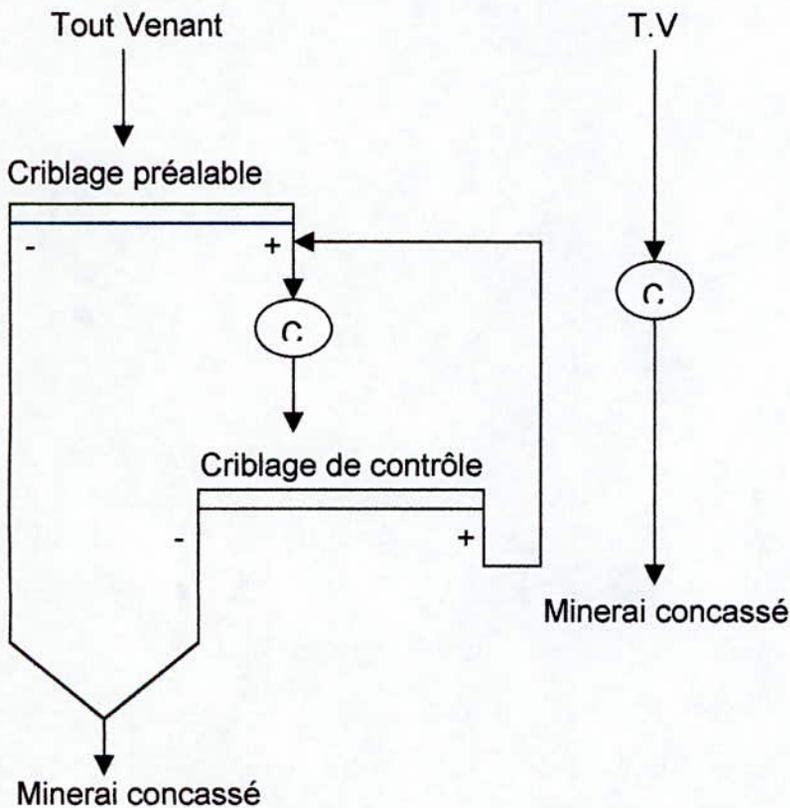
A1



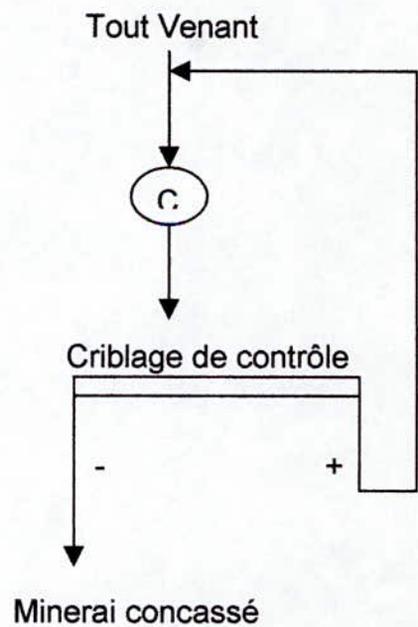
B



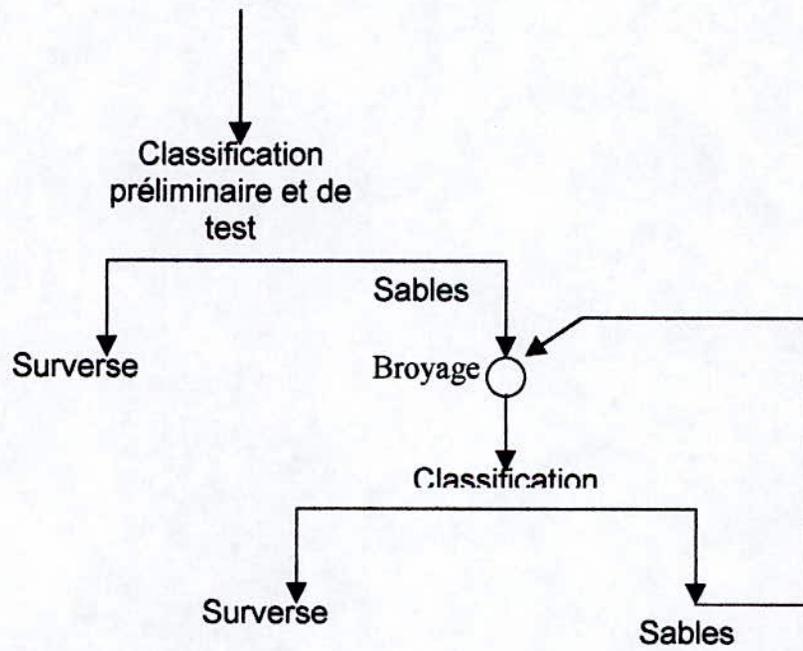
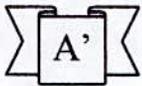
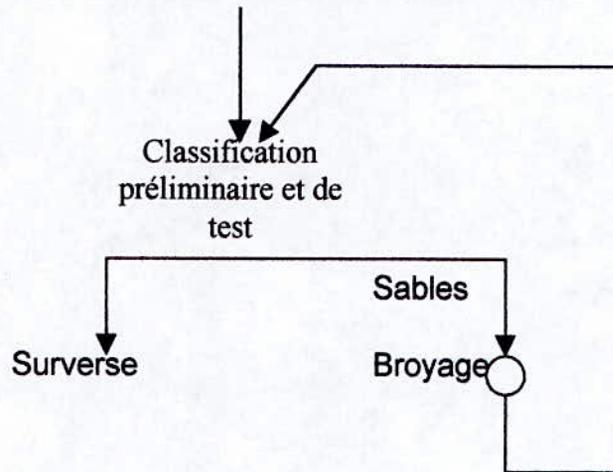
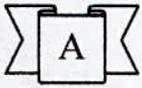
D



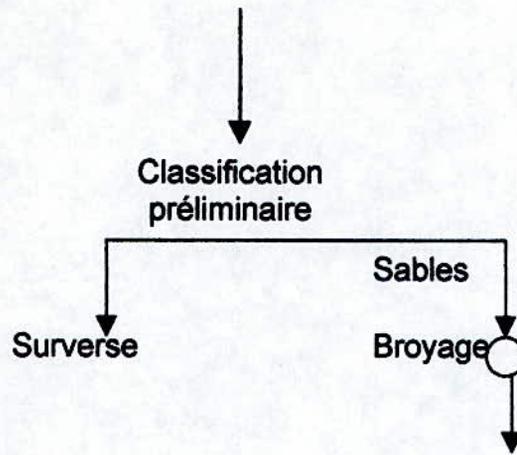
C



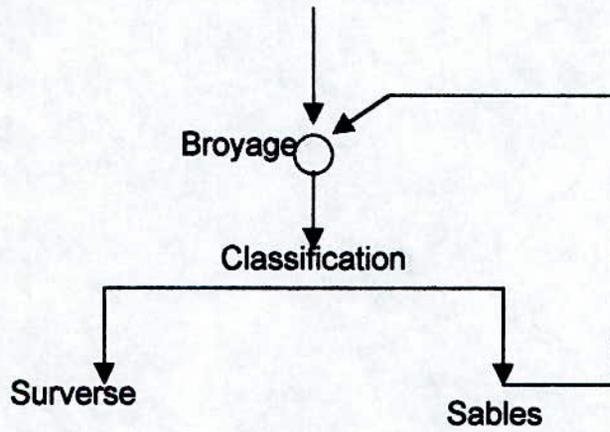
LES DIFFERENTS SCHEMA DE BROYAGE (UN STADE DE BROYAGE)



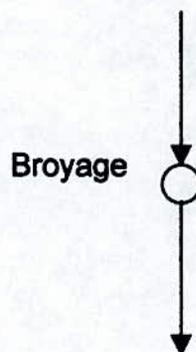
B



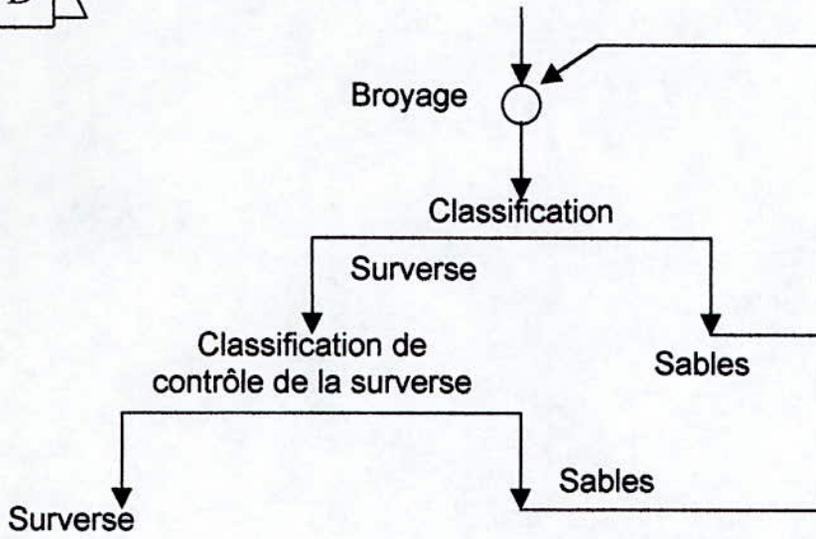
C



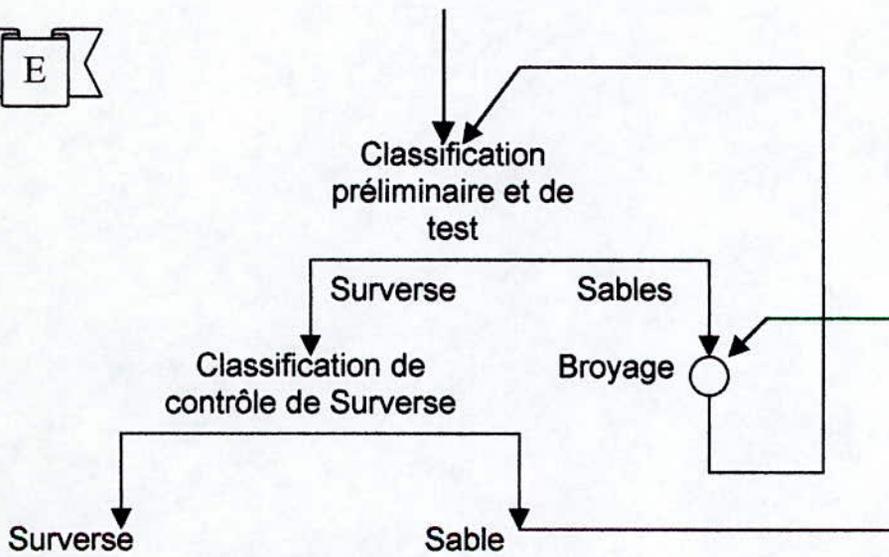
C

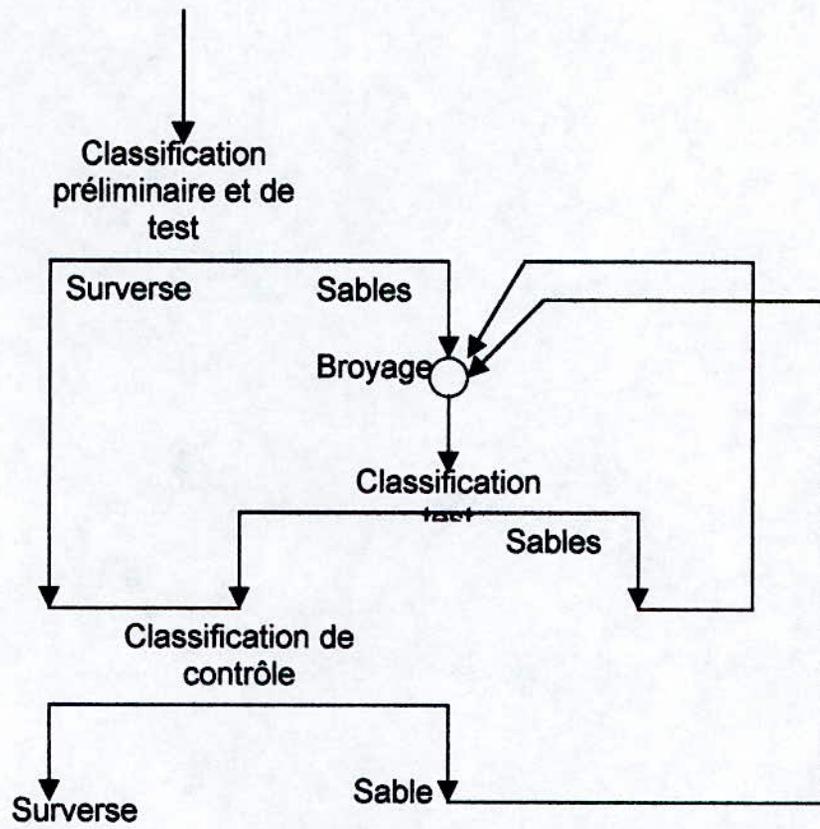
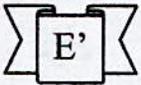


D



E





BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Encyclopédie ENCARTA 98**
- [2] **Grage Batelière** : Atlas de minéralogie et pétrographie, édition Alpha 1972
- [3] **Technique de l'ingénieur**
P.Blazy, J.El Aid Jdide 1992
 [a] Fragmentation : Généralités ; Théories
 [b] Fragmentation : Applications
- Edmond Blanc**
 [c] Fragmentation : Généralités ; Théories
 [d] Fragmentation : Technologie
 [e] Fragmentation : Applications
 [f] Criblage
- [4] **A.Saada** : Cours de minéralurgie
- [5] **S.E.Andreev, V.V.Zbrevitch, V.A.Perov** : Concassage, broyage et criblage des minerais, édition nationale technico-scientifique de la littérature minière Moscou 1967
- [6] **Blazy** : La valorisation des minerais, presses universitaires (France)
- [7] **J.Sandier** : Mise en valeur des gisements métallifères, édition Masson 1962
- [8] **J.Brougère** : Cours de minéralurgie, Ecole Nationale Technique des Mines d'Als
- [9] **A.Ould Hamou** : Cours de minéralurgie ENP.
- [10] **K.A Razoumov** : Projection d'usines de concentration, édition Nedra
- [11] **G.Aubert, C.Guillemin** : Précis de minéralogie, édition Masson 1978
- [12] **A.Saihi** : Préparation mécanique du quartz aurifère du gisement de

Tekouyet (Hoggar), E.N.P 1996.

[13] S.S.Boubou : Etude de la stabilité des talus de la carrière de Bouzaréah, E.N.P 1991