

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
& LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

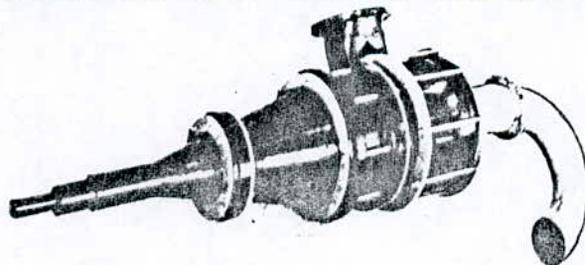
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département: Génie Minier

PROJET DE FIN D'ÉTUDES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Sujet

**ÉTUDE DES
PARAMÈTRES
D'UN
HYDROCYCLONE**



Préparé par:
Mr M. OULD HAMOU

Étudié par:
Mr M. YAHIATENE

Dirigé par:
Mr M. OULD HAMOU

Promotion: Septembre 1996
E.N.P. 10, Avenue Hacen BADI EL-HARRACH - ALGER

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Président de Jury:

Mr. D. E. MERIEM

Membres de Jury:

Mr. M. OULD HAMOU.....Promoteur

Mr. A. AIT YAHATENE.....Examineur

Mr. A. SAADA.....Examineur



Dédicaces

A ma Mère et mon Père
qui me sont très chers

A mes chères Soeurs,

A mes deux petits Frères,

A mes amis de C.U.B.A. (Alger)

Enfin, à tout ceux et celles
qui me sont très chers.

Je dédie ce projet de fin d'études

Nahiatène



Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord mon promoteur, Monsieur M. Ould Hamou, pour son suivi et son aide durant l'élaboration de ce projet de fin d'études.

Je tiens à remercier aussi Monsieur *A. Ait Yahiatene*, pour tout ce que j'ai appris de lui à propos de programme « Windows » et « Excel » qui m'ont beaucoup aidé durant l'élaboration de ce projet.

Je tiens à remercier aussi *Monsieur A. Saada*, car c'est grâce à lui que le centre de calcul se ferme tard afin de permettre aux étudiants de terminer leur projet.

Mes remerciements vont aussi au Président et aux Membres du Jury, qui ont bien voulu accepter de juger ce travail,

ainsi qu'à tous les enseignants et enseignantes qui ont contribué à ma formation.



SOMMAIRE

	page
BUT DU TRAVAIL.....	01
INTRODUCTION	02
I. LA PREPARATION MECANIQUE DES MINERAIS.....	04
I.1 OBJET DE LA PREPARATION MECANIQUE DES MINERAIS.....	04
I.2 IMPORTANCE DE LA PREPARATION MECANIQUE DES MINERAIS.....	05
I.3 LES PARTIES PRINCIPALES DE LA PREPARATION MECANIQUE DES MINERAIS.....	06
I.3.1 La fragmentation.....	06
I.3.2 La concentration.....	07
I.3.3 La filtration des concentrés.....	08
I.3.4 La mise au dépôt des stériles.....	08
I.4 ETUDE DES MINERAIS.....	09
I.4.1 Etude minéralogique.....	09
I.4.2 Etude chimique.....	09
I.4.3 Etude granulométrique.....	09
I.5 BROYAGE.....	12
I.5.1 Définition.....	12
I.5.2 Installations de broyage.....	12
II. LA CLASSIFICATION.....	22
II.1 GENERALITE SUR LE CLASSEMENT PAR DIMENSION.....	22
II.2 CLASSIFICATION.....	23
II.2.1 Introduction.....	23
II.2.2 Lois du mouvement des particules dans un fluide	23
II.2.3 Principe de la classification.....	30
II.2.4 Mode de classification.....	31

III. ETUDES D'UN HYDROCYCLONE.....	34
III.1 CLASSIFICATION PAR DIMENSION.....	34
III.1.1 Introduction.....	34
III.1.2 Classificateurs (séparateurs).....	35
III.2 LES HYDROCYCLONES.....	36
III.2.1 Histoire de leur developpement.....	36
III.2.2 Description générale	40
III.2.3 Principe de séparation dans un hydrocyclone.....	41
III.2.4 Efficacité de l'hydrocyclone.....	45
III.2.5 Avantages et inconvénients.....	49
III.2.6 Paramètres et formules.....	51
III.2.7 Etudes des paramètres par la methode numérique.....	53
III.2.7.1 introduction.....	53
III.2.6.2 L' organigramme.....	54
III.2.7.3 Le programme.....	58
III.2.8 Effet de quelque paramètre.....	60
CONCLUSION.....	63
BIBLIOGRAPHIE	

But du travail

La classification étant une « fonction » essentielle dans un processus minéralurgique, il est nécessaire, voir important de porter une attention particulière au réglage de certains paramètres, qui déterminent le point de coupure, assurant ainsi une meilleure efficacité de séparation.

Pour cela, des modèles mathématiques ont été développés, principalement pour le calcul du diamètre et de la capacité de l'hydrocyclone.

Nous essayons d'utiliser à notre tour ces modèles et d'établir un programme en Qbasic afin de contrôler scientifiquement ces paramètres.

INTRODUCTION

En préparation mécanique des minerais, la fragmentation comprend le plus souvent des opérations de concassage et de broyage, sur lesquelles viennent se greffer des opérations de classement par dimensionnement (*classification*).

Il s'agit avant tout de faciliter la séparation ultérieure des phases différentes d'un tout-venant, en cherchant à obtenir des granulométries serrées, c'est-à-dire en évitant autant que possible la production de « surfines » nuisibles aux opérations de concentration.

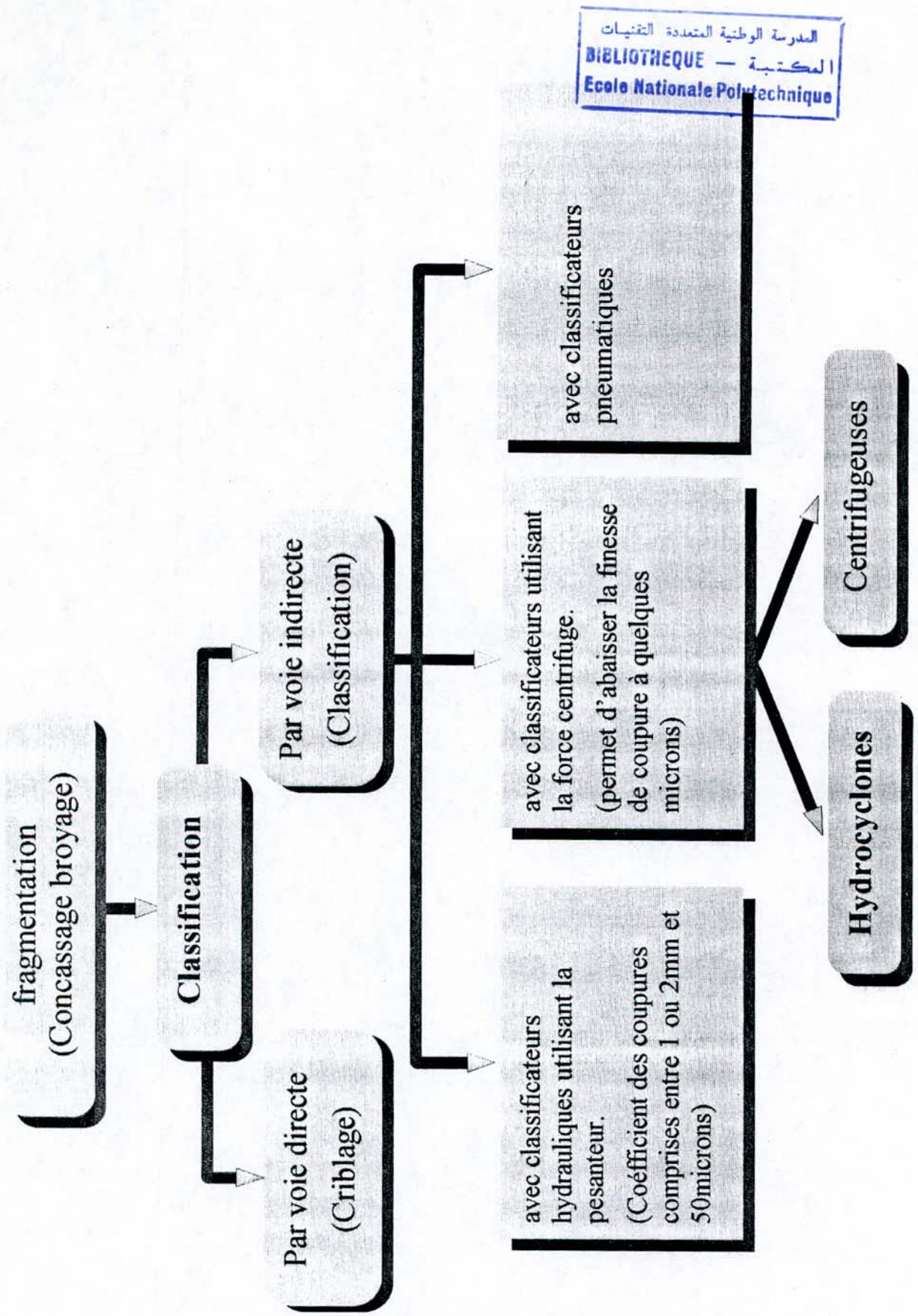
Quelque soit le procédé choisi (*broyage à sec ou par voie humide*), il faut presque toujours associer le broyeur à un dispositif de classement (*classification*), destiné à éliminer les produits ayant la granulométrie désirée au fur-et-à mesure de leur production et à recycler vers le broyeur les grains insuffisamment broyés.

En broyage à sec, c'est la classification pneumatique qui est utilisée le plus souvent; en voie humide, on a recours aux classificateurs mécaniques et aux hydrocyclones.

Pour tout appareil choisi, le but recherché doit-être de rejeter des stériles aussi grenus que possible. Ce souci est pratiquement vif, lorsqu'il faut traiter des minerais pauvres tout en évitant des consommation énergétiques élevées et la production d'ultrafins toujours néfastes à la sélectivité et au rendement de l'opération de concentration. En conséquence, la classification est une fonction essentielle; un broyage long produit davantage de fines particules et le circuit de classification doit opérer sur les grains dès qu'ils ont atteint leur maille de libération.

Dans notre étude, nous avons choisi « *les hydrocyclones* » comme moyen de classification, objet d'étude dans le chapitre III, après avoir traité la classification dans le chapitre II et la préparation mécanique des minerais dans le chapitre I (*voir schéma du raisonnement global*).

Schéma du raisonnement global



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

CHAPITRE I

I. LA PREPARATION MECANIQUE DES MINERAIS

I.1. OBJET DE LA PREPARATION MECANIQUE DES MINERAIS [1]

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; la plupart des minerais sortis de la mine ont une teneur en métal trop faible.

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

C'est une opération d'enrichissement, de concentration physique indispensable, qui se situe entre la mine ou la carrière et la fonderie.

Les installations de préparation mécanique sont situées aussi près que possible des lieux d'extraction, pour réduire les frais de transport des substances brutes entre mines et usines métallurgiques, parfois fort éloignées les unes des autres, en sorte que seuls les produits enrichis sont transportés. Très souvent, d'ailleurs, une usine métallurgique est alimentée par plusieurs mines.

TERMINOLOGIE: *La préparation mécanique se fait généralement dans l'eau et pour cette raison, on appelle les ateliers de préparation mécanique des laveries, s'ils traitent des minerais ou des lavoirs, s'ils traitent des charbons.*

La substance brute extraite du sol s'appelle tout-venant, s'il s'agit d'un minerai et un lavé, s'il s'agit d'un charbon.

Le produit de valeur obtenu après séparation est un concentré, pour le minerai et un lavé, pour le charbon.

Les produits sans valeur rejetés après séparation sont, pour un minerai, appelés stériles, résidus ou rejets et schistes pour un charbon.

Le mélange solide / eau prend le nom de pulpe.

I.2 IMPORTANCE DE LA PREPARATION MECANIQUE DES MINERAIS [1]

La production minérale représente seulement 5% du revenu mondial, mais sans elle, les structures mêmes de la société seraient remises en question. L'industrie lourde, base de la puissance industrielle ne pourrait subsister sans charbon ni minerai de fer. De même le cuivre, l'aluminium, le plomb, le zinc, jouent un rôle capital dans la vie industrielle et c'est un fait que la production minérale est une de celle qui reflète le mieux l'évolution globale de l'économie mondiale. On a comparé les substances minérales dans l'économie aux catalyseurs dans la chimie qu'elles viennent à manquer et tout risque de s'arrêter.

On conçoit donc l'importance de la valorisation de la substance brute par la concentration des éléments de valeur au moyen d'une technologie du traitement des minerais, technologie qui doit s'orienter vers des perspectives audacieuses et nouvelles pour être en mesure d'enrichir les minerais traditionnels de plus en plus pauvres et les substances minérales nouvelles dont le monde a besoin.

I.3 LES PARTIES PRINCIPALES DE LA PREPARATION MECANIQUE DES MINERAIS [1]

Un atelier de préparation mécanique des minerais comprend, le plus souvent, quatre parties principales :

- 1. la fragmentation*
- 2. la concentration*
- 3. la filtration des concentrés*
- 4. la mise au dépôt des stériles*

1. FRAGMENTATION

Dans la préparation mécanique des minerais, la fragmentation est une succession d'opérations, ayant pour objet d'amener la roche extraite de la mine ou de la carrière à la dimension voulue, pour en permettre la concentration, en assurant la libération des minéraux constitutants.

La fragmentation, comprend le plus souvent des opérations de concassage et de broyage, sur lesquelles viennent se greffer des opérations de classement par dimensions.

Le concassage traite le minerai tout-venant et le réduit à des dimensions, telles qu'il puisse être facilement transporté et stocké; il prépare les étapes ultérieures de broyage. Ce concassage prend des gros blocs et les ramène à des dimensions plus faibles (quelques décimètres); il prend le nom de granulation lorsqu'il est poussé assez loin (dimensions comprise entre 5 et 20 mm). Il se fait généralement à sec.

Le broyage, à sec ou à l'eau, peut aller jusqu'à 5 microns. Il a une influence décisive sur les résultats de la concentration. Le minerai doit être broyé aussi uniformément que possible, s'efforçant de réaliser les deux objectifs suivants :

- libérer les particules minéralisées*
- obtenir des grains dont les dimensions seront adaptées aux méthodes de concentration prévues.*

Notons que dans d'autres industries, le broyage peut avoir un but différent: création de nouvelles surfaces en cimenterie ou production de grains de dimensions imposées (agrégats pour le béton),etc...

2. LA CONCENTRATION

La concentration ou enrichissement des minéraux utiles, se fait au moyen des divers procédés dont principalement:

- * la gravimétrie,*
- * la flottation,*
- * la séparation magnétique et électrique.*

L'évolution de la technique a conduit à l'utilisation de nouveaux procédés tels que l'enrichissement par voie chimique (pyro et hydrométallurgie), qui permettent le traitement des minerais complexes.

Le choix d'un procédé de concentration est lié aux caractéristiques et aux propriétés physiques et chimiques des éléments minéraux, qui constituent la roche à traiter. Il est donc important de connaître les avantages techniques et économiques respectifs des différents procédés d'enrichissement, pouvant être utilisés afin de choisir un schéma de traitement en connaissance de cause.

3. LA FILTRATION DES CONCENTRES

Les opérations de concentration se font généralement dans l'eau et, à la sortie des machines de concentration, la pulpe est trop diluée pour permettre le transport des concentrés. On opère donc une filtration des concentrés avec ou sans épaissement préalable de la pulpe.

4. LA MISE AU DEPOT DES STERILES

Les laveries produisent quotidiennement des tonnages parfois considérables de stériles. Le stockage de ces matières fines constitue un problème important et il faut prévoir un endroit convenable pour les déposer. Généralement, on forme des réservoirs fonctionnant comme des bassins de décantation de telle sorte qu'à l'extrémité opposée à l'arrivée de la pulpe, s'écoule une eau claire.

I.4 ETUDE DES MINERAIS [1]

L'enrichissement des minerais fait appel à des techniques, faisant intervenir certaines de leurs propriétés spécifiques, telles: la densité, la dureté, la susceptibilité magnétique, la conductibilité électrique, etc...

Le procédé qui sera adopté pour enrichir un minerai sera donc le résultat d'un choix de la technique la mieux adaptée aux caractères des produits à traiter, et la mieux appropriée au bilan métallurgique recherché dans un ensemble économiquement valable.

Pour réaliser L'étude d'un minerai, on commencera par soumettre plusieurs échantillons, aussi représentatifs que possible, à un quadruple examen : Minéralogique, géotechnique, Chimique et Granulométrique.

- ETUDE MINERALOGIQUE

L'étude minéralogique est fondamentale pour identifier les minéraux, déterminer les relations qu'il ont entre eux et mesurer la dimension de leurs grains.

- ETUDE CHIMIQUE

L'analyse chimique doit-être complète, c'est à dire, indiquer les teneurs des produits utiles de valeur. Mais aussi celles de tous les autres éléments notamment les teneurs en impuretés nuisibles, qui peuvent interférer avec les premiers, nuire à leur concentration et éventuellement pénalisantes dans les formules de vente de minerais.

- ETUDE GRANULOMETRIQUE

Les études minéralogiques et chimiques sont effectuées dans des laboratoires spécialisés et les techniques utilisées ne sont pas du domaine de la

préparation mécanique. Certes, beaucoup de laveries ont leur propre laboratoire de chimie, mais ce sont ces premiers à qui sont confiées les expertises.

Par contre, l'étude granulométrique est du domaine de la préparation mécanique et elle se fait principalement par tamisage.

Toute méthode de concentration d'un minerai impose que le minerai soit fragmenté à une dimension dite " dimension de libération ", telle que les constituants recherchés puissent-être séparés ultérieurement avec facilité, à l'aide de procédés utilisant les propriétés physiques ou physico-chimiques.

A part certains minerais alluvionnaires (or, étain) et certains charbons, cette libération n'existe pas à l'état naturel et on doit l'obtenir par fragmentation.

La libération totale des divers constituants d'un minerai brut est difficilement réalisable dans des conditions économiques acceptables. Dans ce domaine il n'existe pas de solutions "à priori ". Chaque minerai nécessite une étude particulière, ayant pour but de rechercher la façon la plus économique d'obtenir cette séparation entre le minéral pur, les autres constituants et la gangue, compatibles avec la libération recherchée, en effectuant des analyses granulométriques, qui renseigneront sur les degrés de libération obtenus en fonction des finesses de fragmentation.

Cette étude, doit-être faite avec soin car l'opération de broyage est une des plus coûteuses dans l'ensemble de la préparation mécanique : il faut s'efforcer notamment d'éviter le surbroyage, c'est-à-dire la production trop importante de grains fins dont le traitement ultérieur est difficile.

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

- le refus composé des grains plus gros que l'ouverture du tamis .*
- le passé composé des grains plus petites que l'ouverture du tamis .*

Après tamisage, on pèse le refus de chaque tamis (refus partiel) et on dresse le tableau, sur lequel sont reportés :

- les ouvertures des tamis,*
- le poids et les pourcentages des refus,*
- les pourcentages cumulés des refus,*
- les pourcentages cumulés des passés.*

Pourcentages cumulés des passés = 100 - pourcentages cumulés des refus

Les résultats de l'analyse granulométrique sont ensuite reportés sur un graphique. On porte en abscisses les ouvertures des tamis et en ordonnées les refus (ou les passés) cumulés.

I.5 BROYAGE [1;9]

I.5.1 DEFINITION DU BROYAGE

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 qui travaillent par chocs, écrasement ou usure. Par exemple, il y a broyage lorsqu'on effectue sur un minerai une opération qui permet d'amener la taille de ces grains les plus gros de 25 mm à 100 microns.

En préparation des minerais, il s'agit avant tout de faciliter la séparation ultérieure des phases différentes d'un tout-venant, en cherchant à obtenir des granulométries serrées, c'est-à-dire en évitant autant que possible la production de " surfines ", nuisibles aux opérations de concentration.

En général, le broyage est précédé du concassage, et les produits entrant au broyeur sont à l'état granuleux.

On admettra que le "broyage " porte sur la réduction de grains de 20 à 30 mm en grains à quelques dizaines de microns.

I.5.2 INSTALLATION DE BROYAGE

La conduite des opérations de broyage, qui représentent des frais de traitement la plupart du temps élevés, conditionne, dans une très large mesure le succès de la concentration, tant du point de vue économique que métallurgique.

Il faut donc faire avec le plus grand soin le double choix qui s'impose :

A - choix des appareils

B- choix des schémas de broyage

En tenant compte d'un certain nombre de facteurs, qui sont notamment :

la dimension du minerai à broyer;

. les caractères du minerai : dureté, abrasivité, humidité ...

. la finesse désirée;

. la production horaire;

. la pollution du produit;

. l'usure et la maintenance de l'équipement;

. le prix de revient, etc...

A- CHOIX DES APPAREILS (BROYEURS, CLASSIFICATEURS)

Chaque appareil de fragmentation recouvre un domaine d'utilisation particulier, si l'on ne considère que la réduction de taille (figure 1).

A-1 choix des broyeurs

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

- Ils sont simples et robustes
- Leurs pièces d'usure sont relativement peu coûteuses
- Leur surveillance et leur entretien sont faciles
- Ils peuvent broyer fin les roches dures et abrasives à un prix de revient acceptable
- Ils peuvent travailler en voie sèche ou en voie humide

Généralement, le broyage se fait par voie humide dans les laveries, la plupart des opérations de concentration se faisant dans l'eau.

Fonctionnant en circuit fermé avec un classificateur, ils sont peu sensibles aux irrégularités de l'alimentation.

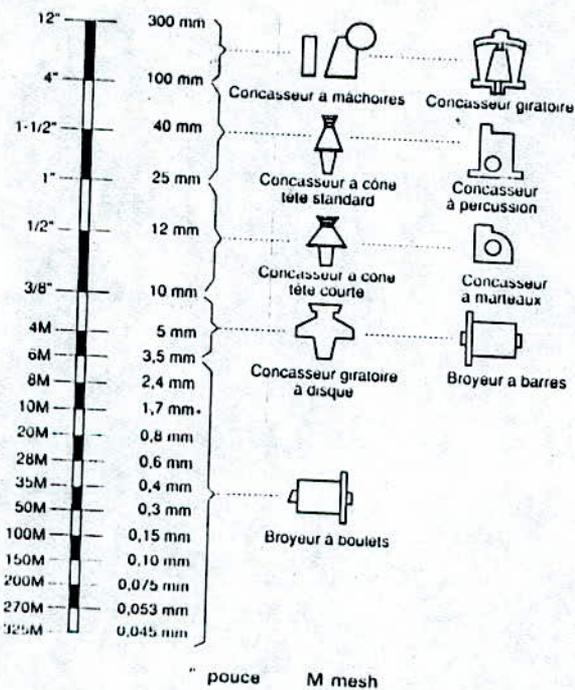


FIG. 1 : DOMAINES GRANULOMETRIQUES D'UTILISATION DE QUELQUES APPAREILS USUELS DE FRAGMENTATION.

A.2 choix des classificateurs

L'objectif visé étant d'obtenir du minerai, présentant des caractéristiques granulométriques bien définies, il est presque toujours nécessaire de faire travailler les broyeurs en circuit fermé avec des classificateurs et, si le broyage se fait par voie humide, la pulpe doit avoir une dilution également bien définie. C'est pourquoi le choix des classificateurs est aussi important que celui des broyeurs.

La sousverse des classificateurs qui retourne au broyeur s'appelle "charge circulante" et elle est généralement comprise entre 100 et 800 % du tonnage alimenté au broyeur.

Dans les circuits de broyage humide, le choix se fait entre classificateurs mécaniques (à râteaux ou à vis) et hydrocyclones, suivant la finesse désirée.

B. CHOIX DES SCHEMAS DE BROYAGES (LIES AUX CLASSIFICATEURS)

B.1 VOIE HUMIDE

La configuration d'un circuit de broyage en humide doit s'adapter au but particulier que l'on recherche. Les broyeurs utilisés couramment dans ces circuits sont les broyeurs à barres, les broyeurs à boulets, les broyeurs autogènes ou semi-autogènes. Les appareils de classification sont les cribles vibrants, les hydrocyclones et les classificateurs à râteaux ou à vis.

Dans tout agencement de circuit de broyage en voie humide, cas le plus fréquent, il se pose trois sortes de problèmes:

- Lorsque l'on se situe au niveau du projet, on doit choisir la configuration la plus adéquate en fonction du type, de la taille et du nombre de machines intervenantes;

- Lorsque l'on se situe au niveau des opérations, on doit évaluer correctement les paramètres qui interviennent quand le circuit est en ligne; par exemple, les distributions granulométriques de la figure 2 sont affectées par un changement du diamètre de la buse de décharge de l'hydrocyclone qui entraîne une variation de la dimension de coupure et de la charge circulante;
- Lorsque l'on opère en continu, on doit évaluer les variations affectant l'alimentation ou le fonctionnement, qui perturbent la qualité des produits et les rendements.

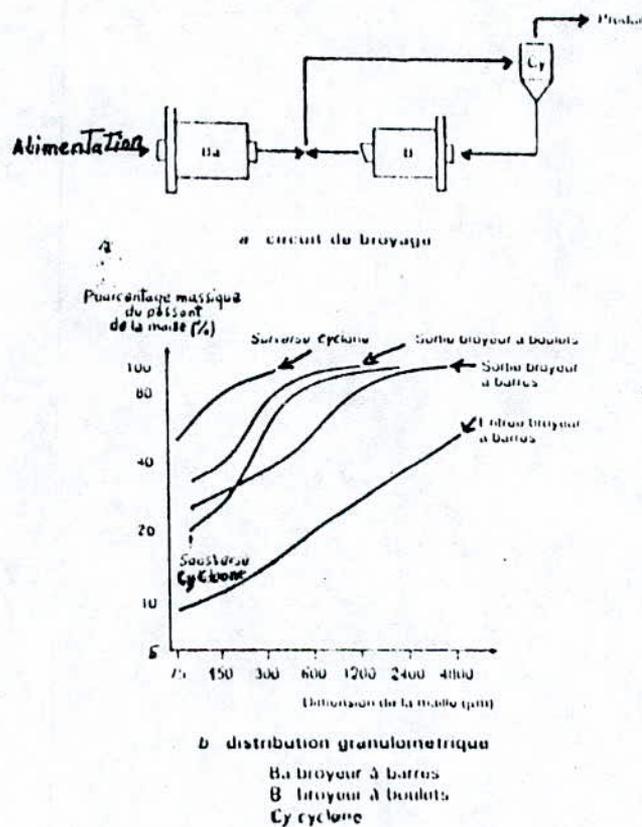


FIG. 2 : TRAITEMENT CLASSIQUE EN VOIE HUMIDE.

1. Le schéma de la figure 3 est le schéma classique d'un broyeur à boulets travaillant en circuit fermé avec un classificateur mécanique. A la sortie du broyeur, la pulpe contenant environ 70% de solides en poids entre dans le classificateur par une goulotte, dans laquelle on ajoute encore de l'eau pour permettre au classificateur de travailler dans les meilleures conditions. La pulpe de surverse contient environ 70 % d'eau et la pulpe de sousverse 15 / 20 % .

Avec ce schéma, le calcul de la charge circulante se fait comme suit :

Considérons la figure 3

Si T est le tonnage de minerai sec alimentant le broyeur

S est le tonnage de minerai sec sortant du broyeur

P est le tonnage de minerai sec de la surverse du classificateur

R est le tonnage de minerai sec de la sousverse du classificateur

On effectue une analyse granulométrique en chacun des points S , P et R et on appelle s , p et r le pourcentage cumulé des passants sur la même tranche granulométrique en chacun des points S , P et R .

Par définition on a :

$$\text{charge circulante } C = 100 \times \frac{R}{T}$$

et on se trouve dans les mêmes conditions que pour le calcul de la charge circulante d'un criblage en circuit fermé avec un concasseur,

d'où:

$$C = 100 \times \frac{p-s}{s-r}$$

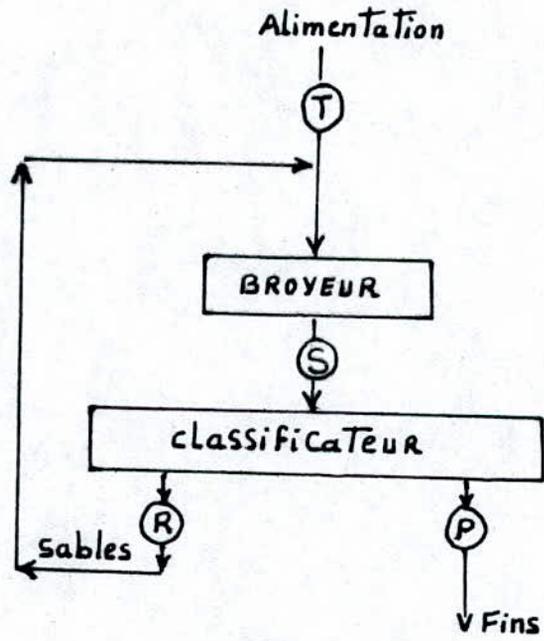


FIG. 3

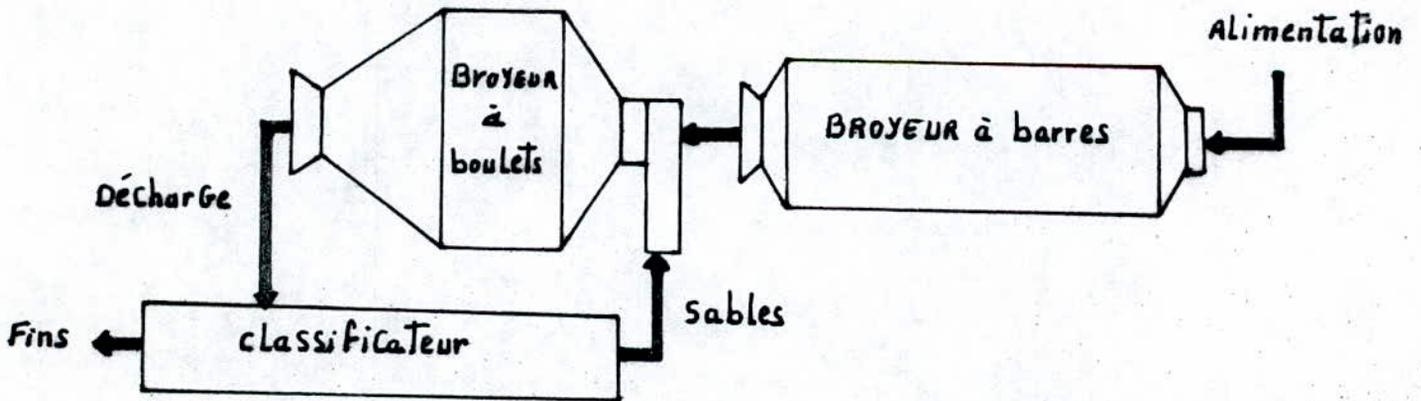


FIG. 4

N.B:

Avant d'effectuer les analyses granulométriques aux points S, P et R, il faut s'assurer que le circuit soit bien en équilibre. Or, l'équilibre d'un circuit fermé broyeur-classificateur mécanique n'est atteint qu'au bout d'un temps assez long (1 heure et plus).

Au contraire, dans le cas d'un circuit fermé BROYEUR-HYDROCYCLONE, cet équilibre est atteint au bout de quelques minutes seulement.

Pour s'assurer que le circuit est en équilibre, on porte sur un graphique :

- en abscisses les valeurs $x = s - r$
- en ordonnées les valeurs $y = p - s$

Les points doivent s'aligner autour d'une droite théorique (équilibre et tamisage parfaits) passant par 0 et de coefficient angulaire $c / 100$.

La valeur de c est lue sur l'ordonnée du point d'abscisses $x = 10$.

2. Dans les installations importantes, on broie le minerai en deux stades: broyage primaire avec un broyeur à barres, fonctionnant en circuit ouvert, qui alimente un broyage secondaire, composé d'un broyeur à boulets, fonctionnant en circuit fermé avec un classificateur (figure 4).

3. Si la sortie du broyeur à barres contient déjà beaucoup de fines, de dimensions inférieures à la finesse finale requise, il serait plus logique d'adopter le schéma de la figure 5.

Dans ce cas, le cas de la charge circulante, qui correspond au schéma de la figure 6, se fait de la même façon que précédemment et on aura :

$$T = P \quad ; \quad R = S \quad ; \quad Tt + Ss = Pp + Rr$$

d'ou :

$$C = \frac{p - t}{s - r} \times 100$$

4. Enfin, dans le cas où le produit final doit être très fin, (moins de 100 microns) on peut adjoindre UN HYDROCYCLONE au classificateur mécanique figure 7.

B.2 VOIE SECHE

Dans le broyage par voie sèche, l'agent de classification est l'air.

Le minerai à broyer est déversé dans une trémie de stockage, équipée d'un vibreur d'extraction, suivi d'une bande transporteuse alimentant le broyeur. A la sortie du broyeur (généralement broyeur Aérofall), les produits entraînés par un courant d'air de débit réglable sont recueillis :

- a) dans le classificateur pour les produits grossiers*
- b) dans le cyclone pour les produits fins*
- c) dans le multicyclone pour les produits très fins, ainsi que le dépoussiéreur par filtre à manche permettant d'épurer l'air avant son rejet dans l'atmosphère.*

REMARQUE: *Pour tout appareil et schéma choisis, le but recherché doit être de rejeter des stériles aussi grenus que possible. Ce souci est particulièrement vif, lorsqu'il faut traiter des minerais pauvres, en évitant des consommations énergétiques élevées et la production d'ultrafines toujours néfastes à la sélectivité et au rendement de l'opération de concentration. En conséquence, la classification est une fonction essentielle; un broyage long produit davantage de fines particules et le circuit de classification doit opérer sur les grains, dès qu'ils ont atteint leur maille de libération.*

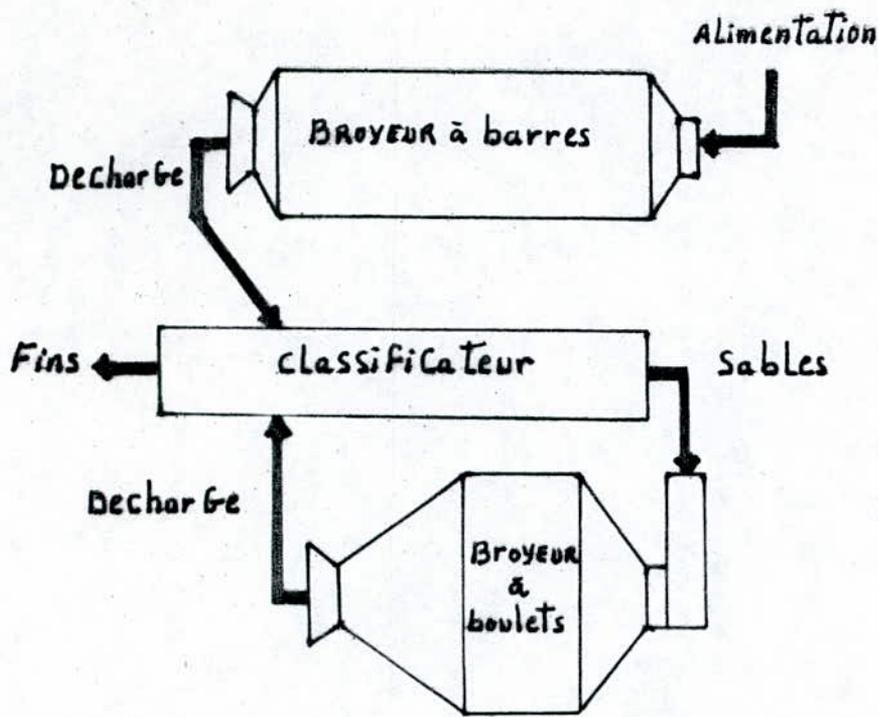


FIG. 5

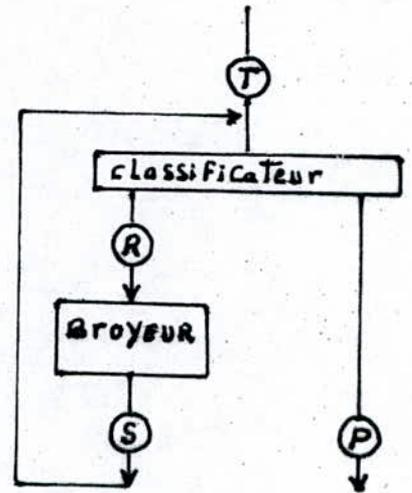


FIG. 6

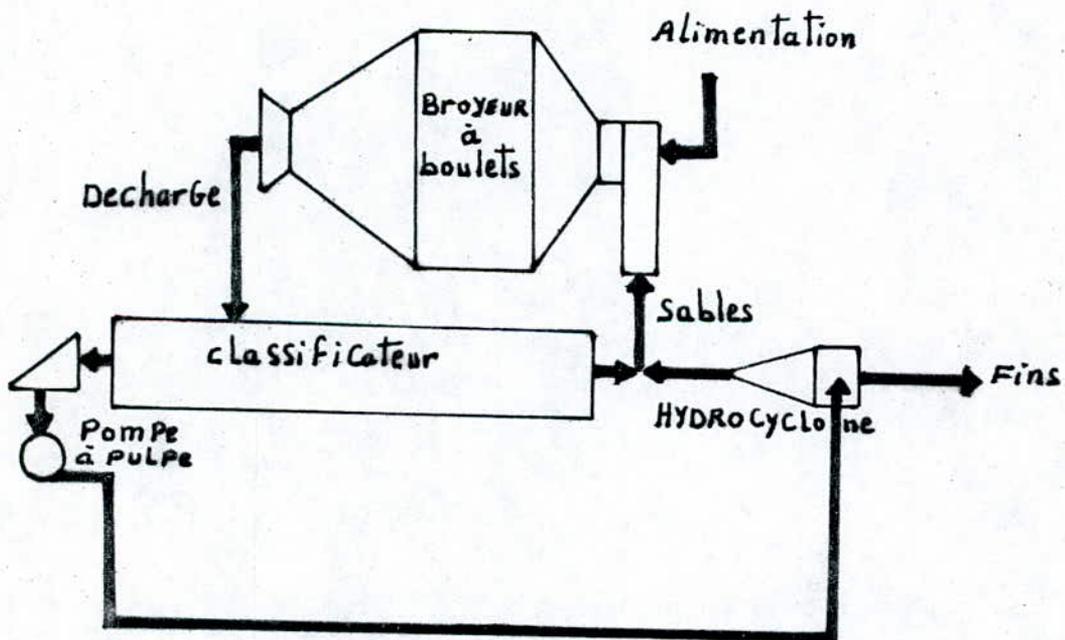


FIG. 7

CHAPITRE II

II. LA CLASSIFICATION

II .1 GENERALITES SUR LE CLASSEMENT PAR DIMENSION [1]

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

1) AU CONCASSAGE, il s'agit de soustraire à l'action des concasseurs les morceaux qui sont déjà plus petits que la dimension de décharge des appareils.

2) AU BROYAGE, le classement par dimensions est utilisé à deux fins d'ordre général :

a - Pour soustraire les produits suffisamment fins à l'action des broyeurs, de façon à augmenter la capacité de ceux-ci.

b - Pour former un circuit fermé avec le broyeur, et, limiter le calibre maximum du produit final.

3) DANS CERTAINS PROCÉDES DE CONCENTRATION, qui exigent des calibres de grains bien définis.

4) AU LABORATOIRE, on doit effectuer des opérations de contrôles granulométriques, qui sont 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 :

A) PAR VOIE DIRECTE, pour des séparations allant jusqu'à 1 mm, par passage des grains à travers des ouvertures de mailles de dimensions et de formes déterminées (grilles, cribles); c'est LE CRIBLAGE

B) 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), c'est LA CLASSIFICATION (par HYDROCYCLONES, cas concret de notre étude qui sera étudié ultérieurement dans le chapitre III).

II.2 CLASSIFICATION [3;2;1]

II.2.1 INTRODUCTION

La classification est la méthode de séparation de mixture ou de composites des minerais en deux ou plusieurs produits, sur la base de la vitesse, avec laquelle les grains tombent à travers le milieu fluide.

En traitement, c'est usuellement de l'eau et la classification humide qui sont généralement appliqués aux particules de minéraux qui sont considérées très fines pour être séparées efficacement par criblage.

Du moment que la vitesse des particules dans un milieu fluide est dépendante non seulement de LA DIMENSION, mais aussi de LA DENSITE et de la forme des particules.

II.2.2 LOIS DU MOUVEMENT DES PARTICULES DANS UN FLUIDE

Dans la préparation des minerais, les classements par sédimentation interviennent dans les opérations de classification (classement par dimensions), de séparation gravimétrique (classement par densité), de décantation, de filtration.

Si un corps tombe librement dans le vide, sa vitesse, en tout temps, est donnée par l'expression :

$$V = g \cdot t$$

dans laquelle g est une constante (l'accélération de la pesanteur).

La vitesse est alors indépendante de la dimension et de la densité du solide et avec le temps, elle augmente indéfiniment.

Si, au contraire, le corps tombe dans un fluide, son mouvement résulte de l'action de trois forces :

a) la gravité, proportionnelle à la masse du corps.

$$F_g = m \cdot g \quad \text{où } m \text{ est la masse du corps}$$

b) la poussée d'Archimède

$$F_a = m' \cdot g \quad \text{où } m' \text{ est la masse du fluide déplacé}$$

c) la résistance opposée par le fluide au mouvement du corps

$$R = \frac{C \times S \times D_f \times V^2}{2} \quad (\text{formule de Lord Raleigh, réfère sous-chapitre ultérieur})$$

Donc, l'équation du mouvement s'écrit :

$$F_g - F_a - R = m \times \frac{dV}{dt}$$

La résistance, due à la friction, s'oppose à la force de gravité, de telle sorte qu'après un temps plus ou moins court, le corps atteint une certaine vitesse limite et, à partir de ce moment, il tombe à une vitesse uniforme.

Les grains inférieurs à 1 mm atteignent rapidement la vitesse limite, et dans la plupart des cas, on peut négliger la période d'accélération.

Il en va différemment pour les grains plus gros et, pour des grains de 1 cm par exemple, la vitesse limite n'est atteinte, qu'après plusieurs dixièmes de seconde; dans ce cas la période d'accélération devient prépondérante.

II.2.2.1 VALEUR DE LA RESISTANCE DU FLUIDE

La résistance opposée par le fluide au mouvement d'un corps solide dépend du régime d'écoulement du fluide autour du solide.

- Lorsque le mouvement relatif est lent, le régime d'écoulement est laminaire (figure 8-a), il correspond à la région dite de Stokes : le passage du corps ne trouble pas la masse du fluide, la seule résistance au mouvement est due aux forces de cohésion des molécules du fluide, c'est-à-dire à sa viscosité μ , et cette résistance est proportionnelle à la vitesse relative V du corps par rapport au fluide et à la viscosité de celui-ci.

- Lorsque le mouvement relatif croît, on a un régime d'écoulement turbulent (figure 8-b), qui correspond à la région dite de « Newton » : les lignes de courant du fluide se détachent du corps, il se forme des tourbillons, qui se détachent du solide et le suivent à une vitesse inférieure.

FORMULE GENERALE DE LA RESISTANCE DU FLUIDE

On exprime la résistance du fluide au passage d'un corps solide sphérique par la formule de Lord Raleigh :

$$R = \frac{C \times S \times D_f \times V^2}{2}$$

dans laquelle :

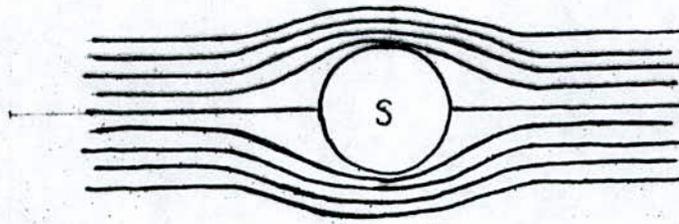
C : coefficient de résistance

S : surface du maître couple du corps solide = $\Pi \times d^2 / 4$

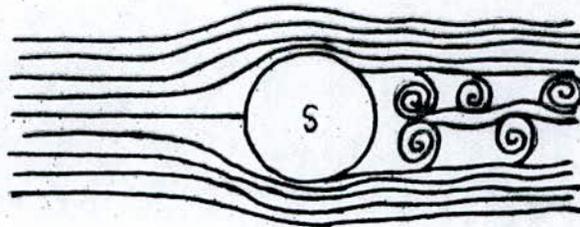
(d étant le diamètre de la sphère)

D_f : densité du fluide

V : vitesse relative de la sphère par rapport au fluide



(a) régime de Stokes



(b) régime turbulent de Newton

FIG. 8 DEPLACEMENT D'UN SOLIDE DANS UN FLUIDE

REMARQUE Le coefficient de résistance C est un nombre fonction de d , V , D_f et μ . Il s'exprime par la formule :

$$C = \frac{k}{R_e}$$

tels que : $R_e = \frac{V \times d \times D_f}{\mu}$ (c-à-d forces d'inertie sur les forces de viscosité)

R_e est appelé " nombre de Reynolds ". C'est un nombre sans dimension, c'est-à-dire que sa valeur est indépendante des unités.

a) Résistance dans la région de Stokes

C'est le régime d'écoulement, pour lequel Re est plus petit que 1, et que

$$C = 24 / Re.$$

Soit une sphère de diamètre d tombant dans un fluide de viscosité μ et de densité du fluide D_f .

Au moment où la vitesse de la sphère devient uniforme, la résistance opposée par le fluide est :

$$R = \frac{C \times S \times D_f \times V^2}{2} = \frac{k}{Re} \times \frac{\Pi \times d^2}{4} \times \frac{D_f \times V^2}{2}$$

$$R = k \times \frac{\mu}{V \times d \times D_f} \times \frac{\Pi \times d^2}{4} \times \frac{D_f \times V^2}{2}$$

d'où

$$R = 3 \times \Pi \times \mu \times d \times V$$

c'est la loi de Stokes

b) Résistance dans la région de Newton

C'est le régime d'écoulement pour Re plus grand que 500, et que C est pratiquement constant et égal à 0.4.

d'où :

$$R = C \times S \times \frac{D_f \times V^2}{2} \times 0,4 \times \frac{\Pi \times d^2}{4} \times \frac{D_f \times V^2}{2}$$

d'où

$$R = \frac{\Pi}{20} \times D_f \times d^2 \times V^2$$

c'est la loi de Newton

II.2.2.2 VALEUR DE LA VITESSE LIMITE

Quand la vitesse limite est atteinte, $dv/dt = 0$

d'où

la force accélératrice F de la sphère est égale à la résistance R du fluide.

$$F = \frac{\Pi \times d^3}{6} \times g \times (D_s - D_f)$$

dans laquelle :

$\frac{\Pi \times d^3}{6}$: volume de la sphère

D_s : densité de la sphère

D_f : densité du fluide

g : accélération à l'endroit où se trouve la sphère (le terme $\frac{\Pi \times d^3}{6} \times g$ représente la poussée d'Archimède)

a) Vitesse limite dans la région de Stokes

$$F = R$$

d'où
$$F = \frac{\Pi \times d^3}{6} \times g \times (D_s - D_f) = 3 \times \Pi \times \mu \times d \times V$$

d'où
$$V = \frac{g \times d^2 \times (D_s - D_f)}{18 \times \mu} \quad (\text{ystème C.G.S})$$

ou:
$$V = k_1 \times d^2 \times (D_s - D_f) \quad \text{tel que } k_1 = g / 18 \mu$$

b) Vitesse limite dans la région de Newton

$$F = R$$

$$\text{d'ou } F = \frac{\Pi \times d^3}{6} \times g \times (D_s - D_f) = \frac{\Pi}{20} \times D_f \times d^2 \times V^2$$

$$\text{d'ou } V = \left(\frac{3 \times g \times d \times (D_s - D_f)}{D_f} \right)^{1/2}$$

$$\text{ou } \boxed{V = k_2 \times \left[d (D_s - D_f) \right]^{1/2}} \quad \text{tel que } k_2 = (3g/D_f)^{1/2}$$

k1 et k2 sont des constantes, et (Ds - Df) est la densité effective de la particule de densité Ds dans un fluide de densité Df.

Les deux lois de la vitesse limite de la particule dans un fluide particulier montrent que la vitesse limite dépende seulement de la dimension de la particule et de sa densité.

CONCLUSION

La vitesse des particules, en chute libre dans un fluide donné, variera:

- comme le carré de leur diamètre, quand les grains auront des dimensions de l'ordre de 100 microns ou moins (loi de Stokes).*
- comme la racine carrée de leur diamètre, quand les grains seront relativement gros (2 mm et plus) suivant la loi de Newton.*
- dans les proportions comprises entre le carré et la racine carrée de leur diamètre, quand les grains auront des dimensions comprises entre 100 microns et 2 mm.*

II.2.3 PRINCIPE DE LA CLASSIFICATION

Dans un milieu visqueux, comme l'eau, il y a une résistance au mouvement et sa valeur augmente avec la vitesse.

L'accélération des particules dans le fluide diminue rapidement et la vitesse limite est rapidement atteinte.

Les classificateurs représentent essentiellement une colonne de sortie (de séparation), dans laquelle le fluide remonte à une cadence uniforme (figure 9). Les particules introduites dans la colonne immergent (ou émergent) d'après leur vitesse limite plus grande (ou plus petite) que la vitesse du fluide.

Dans ce cas la colonne sépare l'alimentation en deux produits :

. la surverse (overflow) : a trait aux particules ayant une vitesse limite inférieure à la vitesse du fluide.

. la sousverse (inderflow) : a trait aux particules ayant une vitesse limite supérieure à la vitesse du fluide.

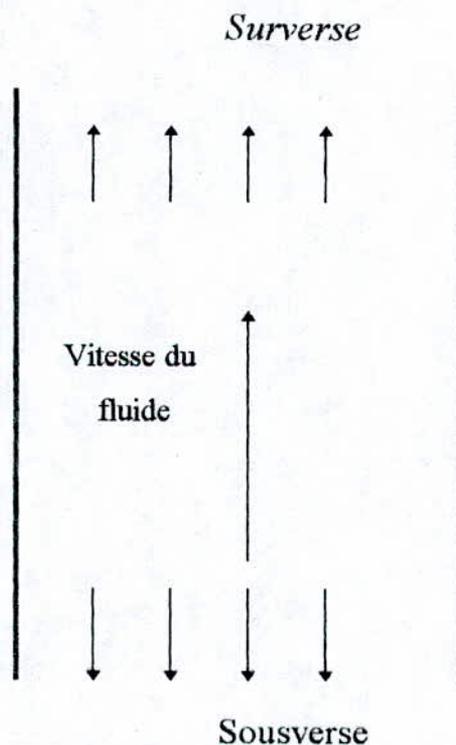


FIG. 9 : PRINCIPE D'UNE COLONNE DE SEPARATION

II.2.4 MODE DE LA CLASSIFICATION (SEPARATION)

a) Séparation libre

La séparation dans un fluide est dite " libre ", quand les grains en mouvement ne rencontrent pas d'obstacles de la part d'autres grains. On considère que cette condition est remplie, quand le pourcentage des solides par poids est inférieur à 15. [Taggart .A.F]

RAISON DE SEPARATION LIBRE :

Pour deux grains sphériques, de densités différentes, mais de même équivalence, c'est-à-dire équitombance, c'est-à-dire tombant avec la même vitesse dans un fluide donné. La raison de séparation libre (RSL) est donnée par l'expression :

$$RSL = [(D_s - D_f) / (D'_s - D_f)]^n = d' / d$$

Dans laquelle D_s , D'_s , et D_f sont respectivement les densités du minéral léger, du minéral lourd et du fluide.

d est le diamètre du minéral léger et d' est le diamètre du minéral lourd; quand à l'exposant n , sa valeur varie de 0.5 (zone de Stokes) à 1 (zone de Newton).

b) Séparation entravée (gênée)

La séparation dans un fluide est dite " gênée " quand les grains en mouvement rencontrent des obstacles de la part d'autres grains. On considère que cette condition est remplie quand la proportion de solides augmente, ce qui explique que la vitesse de chute diminue.

RAISON DE SEPARATION ENTRAVEE

Pour deux grains sphériques équitombants, la raison de séparation entravée (RSE) est donnée par :

$$RSE = [(D_s - D_p) / (D'_s - D_p)]^n = d' / d$$

Dans laquelle, D_p , étant la densité de la pulpe, mais pas celle du fluide et n conserve les mêmes valeurs que précédemment.

La raison de séparation entravée est toujours plus élevée que celle de séparation libre, c'est-à-dire qu'il y a toujours une plus grande différence de grosseurs entre les grains ayant la même vitesse de chute.

Si on opère une séparation gravimétrique (classification suivant le poids spécifique des minerais), la séparation est toujours entravée.

Si on effectue une classification suivant les dimensions des grains, on opère en pulpe diluée, en se rapprochant des conditions de la séparation libre.

L'influence de la densité sur la vitesse de chute des grains, et par suite la dimension de classification est avantageuse lorsque l'on broie un minerai, dont les minéraux de valeur sont plus denses que ceux de la gangue.

Remarque:

Les améliorations constatées dans les circuits de broyage équipés d'hydrocyclones proviennent des régimes d'écoulement qui sont différents. Dans les classificateurs mécaniques, les grains se déplacent dans la zone de Stokes, alors que dans les hydrocyclones, où les séparations s'effectuent dans un champ d'accélération centrifuge compris entre 100 et 1000 fois la pesanteur g , ils se déplacent dans la zone de Newton.

CHAPITRE III

III. ETUDES D'UN HYDROCYCLONE

III.1 CLASSIFICATION PAR DIMENSION [1]

III.1.1 INTRODUCTION

La classification des grains, suivant leurs dimensions, est un procédé de classement, basé sur la vitesse de déplacement de 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 dimension 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.

En effet, à la sortie des broyeurs, les particules de minerais ne sont pas toutes de même calibre : il y a des grains plus gros que la maille de libération désirée, et ces grains doivent être rebroyés.

Dans ce cas, les classificateurs ont pour but de séparer les grains suffisamment fins pour être concentrés, des grains trop gros qui doivent être rebroyés, et de plus, ces derniers ne doivent pas retourner au broyeur avec une trop grande quantité d'eau si le broyage se fait 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, provoquant une seule coupure, donc donnant deux produits :

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

III.1.2 CLASSIFICATEURS

De nombreux types de classificateurs ont vu le jour, depuis les appareils les plus élémentaires, dans lesquels la séparation est approximative, jusqu'aux engins automatiques, permettant d'effectuer une coupure quasi rigoureuse des produits.

Les classificateurs utilisés dans la préparation des minerais travaillent soit dans l'eau, soit à l'air, et suivant le fluide utilisé et les forces mises en jeu, on peut les classer de la manière suivante :

A) Classificateurs hydrauliques, utilisant la pesanteur (Cônes, Hydro-séparateurs, Caisses pointues, Classificateurs mécaniques).

B) Classificateurs, utilisant la force centrifuge (HYDROCYCLONES, Centrifugeuses).

C) Classificateurs pneumatiques (Cyclones, Séparateurs centrifuges, Dépoussiéreurs).

Les classificateurs, utilisant la pesanteur, provoquent des coupures comprises entre 1 ou 2 mm et 500 microns.

L'utilisation d'une accélération centrifuge permet d'abaisser la finesse de coupure à quelques microns.

III.2 HYDROCYCLONE

III.2.1 HISTOIRE DE LEUR DEVELOPPEMENT [4]

L'hydrocyclone, probablement à cause de sa simplicité, a été utilisé pour diverses applications de classification, et cela, depuis 1890.

Un brevet a été accordé aux U.S.A a « Britnet » à partir d'un système de séparation du sable de l'eau, collectant le sable dans une chambre fermée pour une décharge intermittente, pratiquement identique à quelques cyclones actuels de dessablement d'eau.

Entre 1900 et 1935, il y a eu 30 ou plus, de brevets supplémentaires issus de configuration hydrocyclone ou de leur utilisation.

En 1937, l'hydrocyclone a commencé à être utilisé commercialement dans le traitement de fibres de cellulose dans la pulpe et du papier industriel, séparant les particules contaminées de la fibre dans la suspension d'eau, utilisée pour fabriquer du papier de premier choix.

Nicole Engineering et Research Corps de NEW YORK a commercialisé un hydrocyclone pour nettoyer le sable et les particules sales des suspensions de fibre dans la pulpe et le papier industriel, à partir de 1937. La dénomination, durant cette période, a été tel que, les hydrocyclones déchargent une petite quantité d'un matériel de haute densité relativement dans une chambre connectée à l'apex de l'hydrocyclone, qui en échange, décharge les matériaux sales collectés de manière intermittente.

Un travail expérimental considérable a été fait dans de petit cyclone (presque 3 inches de diamètre [1in.= 2.54 cms]), opérant à une pression relativement élevée, de l'ordre de 50 psi, pour bouger les plus petites particules contaminantes de la fibre cellulose, d'où la production de papier de premier choix dans l'industrie du papier.

Au début des années quarante, M.G Driessen, chef du laboratoire de tests de recherche minière de l'état hollandais, travaillait avec de petits hydrocyclones pour l'épaississement et la classification de slurries liquide-solide, particulièrement comme ils sont relatés du lavage du charbon et la concentration. Certains des travaux de Driessen sont publiés aussitôt en 1939.

La campagne d'investissement d'Humphreys a commencé à utiliser des hydrocyclones aux environs de 1944, dans l'intention de récupérer l'eau des différents produits du dispositif de concentration spirale de Humphreys.

Le cyclone de mine de l'état hollandais développé par Driessen était d'abord introduit aux Etats Unies, aux environs de 1948.

Les ingénieurs de la Dorr compagnie avaient commencé un travail de test extensif durant cette période, effectuant un certain nombre d'échanges.

Ils étaient probablement les premières compagnies américaines à utiliser l'hydrocyclone comme nouvel outil de classification, en dehors de la pulpe et l'industrie du papier.

La compagnie américaine Cynamid avait aussi expérimenté l'hydrocyclone des mines d'état hollandais, comme un moyen lourd de récipient de séparation dans un système de concentration minéral.

En 1948, Driessen quittait la Hollande et vient en Amérique, comme ingénieur consultant pour Heyl et Patterson, Inc, qui était intéressé en premier lieu à l'utilisation de cet équipement dans le lavage de charbon et la concentration.

D.A Dahlstrom était un autre investigateur de la première heure, ayant travaillé sur les opérations fondamentales du cyclone à la fin des années 1940 et début de 1950 à la North Western University.

Il y avait environs 60 auteurs avant 1950 comparés à plus de 800 articles jusqu'en 1972.

Le mot cyclone va être utilisé pour indiquer l'hydrocyclone, pour abréviation dans les travaux ultérieurs.

Durant la période 1950 et 1960 une énorme quantité de travail a été réalisée par de nombreux grands contributeurs notables pour la compréhension de bases des hydrocyclones et leur utilisation, à la fois dans l'industrie de processus minéral et dans d'autres à très larges applications industrielles, en plus par le nettoyage de suspensions de fibre de cellulose.

Débutant à partir du milieu des années 1950, le cyclone commençait à trouver une utilisation croissante dans l'industrie minérale.

Quelques premiers exemples typiques de l'utilisation de l'hydrocyclone dans l'industrie minérale incluaient l'utilisation de 3 in.diam. unités par la chino Mines Div. of Kennecott Copper corp. aussitôt que 1948. F.T. Davis et A. A. Wallach utilisaient spécialement des cyclones désignés dans l'opération de San Manuel de la Magma Copper Co. en 1951.

En Mai 1951 la Tennessee Copper Co. installait dans son moulin (usine) de London de la Copper Hill, Tenn, un 24.in.diam Dorrclone en circuit fermé avec un 6 x 12 ft ball mill F.M Lewis, superintendant du concentrateur de l'usine de London, indiquait une amélioration significative à la fois dans le tonnage et l'utilisation de l'énergie.

Presque simultanément, les tests de la production fonctionnaient avec les cyclones 24.in.diam dans le Climax Molybdenum en Climax, Colo, à Montana. toutes ces applications ont montré du succès.

Dans le processus du minerai de fer, l'Erie Mining Co. de Pickands Mather & Co convertit des classifications spiral duplex 60.in. en un 14.in.diam rubber-lined cyclone spécialement désigné, connu comme l'Erie cyclone.

Les avantages reportés étaient: la non nécessité de désaimantation, la dimension de séparation facilement contrôlée, la consommation d'eau plus faible,

les coûts initiaux plus faible, nécessitant moins d'espace, et un meilleur contrôle de la charge circulante.

En 1957 R.Salter de la Silver Bell Unit d'Asarco, Inc dans la Silver Bell, Ariz, a commencé à utiliser les hydrocyclones dans le broyage alors que de « low-grade porphury copper ore ».

Alors que les cyclones ont été utilisés antérieurement pour cette application, on pense qu'il est la première conversion complète reconnue des types précédents de classificateurs spirale ou type râteau en hydrocyclones dans l'industrie du cuivre. Durant la même période, ou peut-être un peu avant, les hydrocyclones avaient aussi trouvé une utilisation en Afrique dans l'application du broyage en circuit fermé.

Des données relativement maigres sont disponibles pour ces opérations, parce que l'hydrocyclone est un outil mécanique très simple sans parties mobiles, il est rarement plus chère qu'une évaluation théorique élevée, souvent nécessaire d'un type de processus d'équipement sophistiqué et compliqué.

Actuellement, cet appareil d'apparence très simple, est l'un des plus compliqué et les moins compris de l'équipement utilisé dans l'industrie minière. Les désignations et les variables opérationnelles semblent presque sans limites, et comme résultat nous avons vu un grand sursaut durant ces dernières 20 années de travaux théoriques supérieurs des chercheurs du monde entier.

III.2.2 DESCRIPTION GENERALE [5;3]

Les hydrocyclones trouvent une large utilisation dans les laveries, pour une classification fine des pulpes dans des cycles de broyage et pour une classification, ayant pour but l'évacuation des schlamms avant le procédé par flottation ou bien avant la concentration par gravité.

L'hydrocyclone est un classificateur basé sur le principe de la centrifugation. C'est un corps creux, à symétrie de révolution, et avec une conception très simple, comprenant trois parties fixes (figure 10) :

- la partie supérieure cylindrique(3) qui constitue une boîte d'évacuation, dans laquelle débouche le diaphragme de décharge(2);

- la partie médiane cylindrique(4), dans laquelle la pulpe d'alimentation(1) est injectée tangentiellement sous une certaine pression, puis soumise à la force centrifuge (qui peut atteindre jusqu'à 1000 fois le champ d'accélération de la pesanteur), et acquiert ainsi un mouvement rapide de rotation, mouvement qui s'accélère encore dans la partie conique(5), où se produit un classement radial des divers constituants par équivalence de granulométrie et de densité;

- la partie conique(5) qui est formée d'un cône d'angle au sommet bien défini, pourvu en bas d'une buse de décharge(6).

1. Alimentation
2. Diaphragme
3. Partie supérieure cylindrique
4. Partie médiane cylindrique
5. Partie conique
6. Buse de décharge
7. Surverse
8. Sousvers

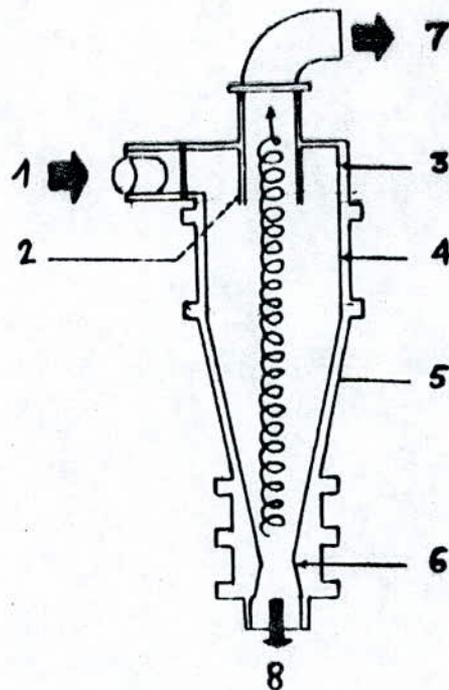


FIG.10 HYDROCYCLONE

III.2.3 PRINCIPE DE SEPARATION DANS UN HYDROCYCLONE [5;4;3;6]

La séparation du matériau s'effectue dans un hydrocyclone sous l'action des forces centrifuges, dépassant de plusieurs fois la force de gravité. Sous l'action des forces centrifuges, se forment deux courants qui se meuvent en sens opposés (figure 11).

Par centrifugation, les grains les plus grossiers et plus denses formant le courant extérieur, sont rejetés vers la surface intérieure de la partie conique de l'hydrocyclone, et les grains fins et légers formant le courant intérieur ascendant situé dans la partie centrale de l'hydrocyclone. Ces deux phénomènes réunis provoquent la séparation dans les hydrocyclones, les produits fins s'échappent vers le haut par le diaphragme de surverse, tandis que les produits grossiers s'écoulent vers le bas par la buse de sousverse.

L'hydrocyclone est un appareil statique qui ne comporte aucune pièce en mouvement

1. Courant extérieur
2. Courant intérieur
3. Alimentation
4. Surverse
5. Souverse

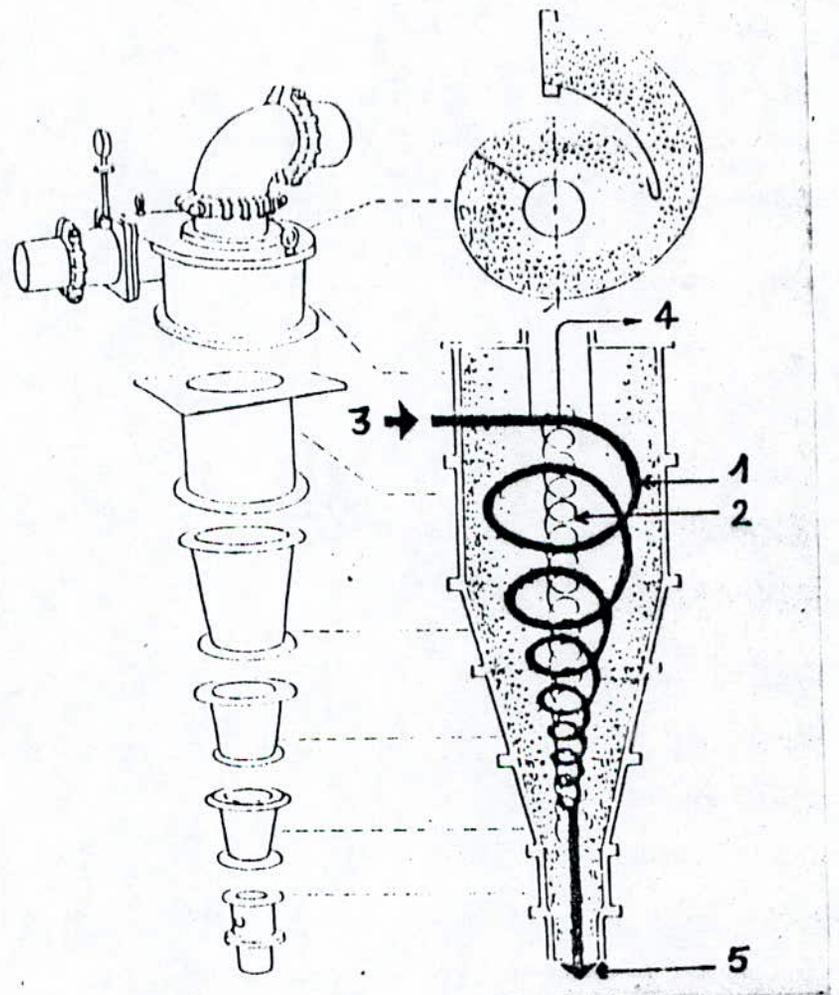


FIG.11 SCHEMA DU MOUVEMENT DES COURANTS DE LA PULPE DANS UN HYDROCYCLONE .

La théorie classique de fonctionnement d'un hydrocyclone c'est que les particules dans un écoulement modèle sont soumises à deux forces opposées: à l'extérieur une force centrifuge et à l'intérieur une force centripète (figure 12).

La force centrifuge développée accélère le taux de séparation des particules (il y a une évidence de montrer cette loi de stocks appliquée avec la précision raisonnable en séparation dans les cyclones de désignation conventionnelle), de ce fait, la séparation de particules accordée à la dimension et à la gravité spécifique.

Les particules de la séparation grossière se déplacent vers le mur de l'hydrocyclone, où la vitesse est basse, puis quitte la buse de décharge, dû au fonctionnement de la force centripète; les particules de la séparation fine se déplacent vers la zone de faible pression le long de l'axe et elles sont transportées vers le haut à travers le diaphragme vers la surverse.

L'existence d'une région extérieure de l'écoulement descendant et d'une région intérieure de l'écoulement montant nécessite une position, à laquelle il n'y a pas de vitesse verticale (figure 13).

Les particules jetées à l'extérieur d'une enveloppe de la vitesse verticale nulle par la grande force centrifuge sortent par la sousverse, alors que les particules emportées au centre par la grande force centripète sortent par la surverse.

Les particules restantes sur l'enveloppe à vitesse nulle, par égalité de force centrifuge et centripète, ont la même chance de se diriger soit vers la sousverse ou la surverse.

1. *Orbite de la particule*
2. *Force centripète*
3. *Force centrifuge*
4. *Mouvement de la particule*

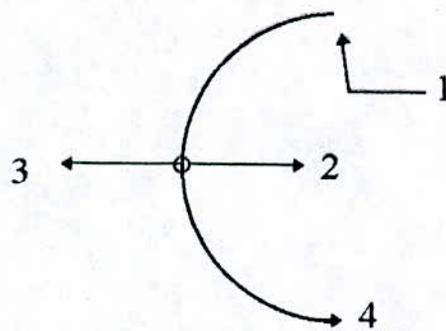


FIG 12 L'ACTION DES FORCES SUR L'ORBITE DE LA PARTICULE
DANS UN HYDROCYCLONE

1. *Surverse*
2. *Diaphragme*
3. *Alimentation*
4. *Enveloppe de la vitesse verticale nulle*
5. *Sousverse*

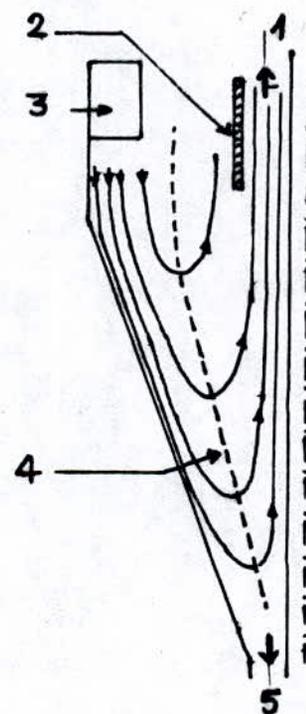


FIG 13. LA DISTRIBUTION DES CONSTITUANTS VERTICAL ET
RADIAL DE VITESSE DANS UN HYDROCYCLONE

III.2.4. EFFICACITE DE L'HYDROCYCLONE [3;11;7]

La méthode commune de la représentation de l'efficacité de l'hydrocyclone se traduit par la performance ou par la courbe de partage (figure 14), qui rapporte le poids en fraction ou en pourcentage, de chaque dimension de la particule dans l'alimentation, se présentant au sommet du cône (apex) , ou la sousverse (underflow), à la particule dimensionnée.

*Le point de coupure, ou dimension de séparation, de l'hydrocyclone est souvent défini comme étant ce point sur la courbe de partage, afin que 50% des particules dans l'alimentation de cette dimension se rapportent à la sousverse; c'est-à-dire que **les particules de cette dimension possèdent la même chance de se diriger soit vers la surverse ou la sousverse. D'habitude, ce point se réfère comme étant la dimension d_{50} .***

La finesse de la coupure dépend de la pente de la partie centrale de la courbe de partage ; le rapprochement vertical, c'est la pente; la hauteur c'est l'efficacité.

La théorie montre que le premier axe rend compte des variations de la pente de la courbe de partage réduite au point (1 ; 50%) tandis que le second axe rend compte des variations de la concavité de la courbe en ce point.

Physiquement, la pente de la courbe de partage réduite au point (1;50%) est liée à l'imperfection de la séparation, alors que la concavité de la courbe de partage réduite à ce point est liée à la dissymétrie de la classification des gros et des fins.

On peut donc interpréter le premier axe, comme étant un axe d'imperfection et le second axe comme un axe d'efficacité de la séparation des gros et des fins.

L'imperfection augmente de la gauche vers la droite et l'efficacité du classement des gros et des fins diminue de bas en haut.

La pente de la courbe peut être exacte par relèvement des points à 75% et 25% de particules de l'alimentation rapportées à la sousverse. Celles-ci sont respectivement les dimensions d_{75} et d_{25} . L'efficacité de séparation, ou soi-disant l'imperfection I , est alors donnée par la formule suivante :

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2 \times d_{50}}$$

Beaucoup de modèles mathématiques des hydrocyclones comprennent le terme « d_{50} corrigé » comme la courbe de classification « corrigée ». Il est présumé aussi dans tous les classificateurs, les solides de toutes dimensions sont entraînés dans le liquide de production grossière par le petit trajet dans la proportion directe à la fraction de l'eau d'alimentation reportée à la sousverse.

EXEMPLE: *Si l'alimentation contient 16 t/h de matériau d'une certaine dimension, et 12 t/h reporté à la sousverse, alors le pourcentage de cette dimension reportée à la sousverse est relevée sur la normale de la courbe de partage est 75%.*

Cependant, si on dit, 25% de l'alimentation d'eau reporté à la sousverse, alors 25% de l'alimentation du matériau formera un petit circuit avec elle. Donc 4 t/h de la dimension de fraction sera un petit circuit à la sousverse et seulement 8 t/h reste dans la sousverse dû à la classification.

La récupération corrigée de la dimension en fraction est de cette façon :

$$\frac{12-4}{16-4} \times 100 = 67\%$$

La courbe de partage non corrigée peut donc être corrigée par utilisation de l'équation suivante :

$$y' = \frac{y - R}{1 - R}$$

où: y' est la correction en fraction de masse de la dimension particulière reportée à la sousverse.

y est l'actuel en fraction de masse de la dimension particulière reporté a la sousverse.

R est la fraction de liquide d'alimentation, qui est récupérée dans le filet de la production grossière (figure 15), montrent les courbes de classification non corrigées et corrigées.

La supposition de cette fraction de matériau d'alimentation, qui n'est pas classée, est proportionnelle à la fraction volumique d'eau dans la sousverse a été reportée a être sujet a erreur, et la procédure mathématique a l'extrapolation de la courbe de partage vers les dimensions fines a été développée. Lynch décrit une application de la « courbe de partage réduite » qui est obtenue par complotation corrigée du pourcentage en poids des particules reportées à la sousverse contre la dimension actuelle (d) divisée par la dimension corrigée $d_{50(c)}$ (figure 16) , et suggère celle qui peut être utilisée pour dériver la courbe de partage actuelle après tout changements dans des conditions d'opération.

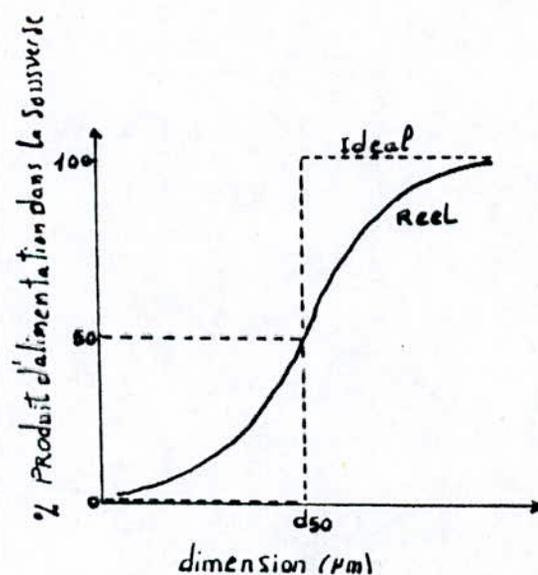


FIG. 14 COURBE DE PARTAGE POUR UN HYDROCYCLONE

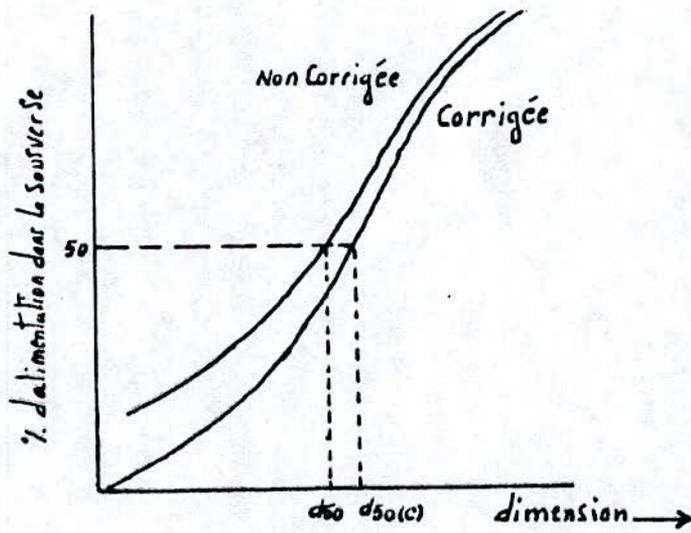


FIG. 15 COURBES DE SEPARATION NON CORRIGEE ET CORRIGEE

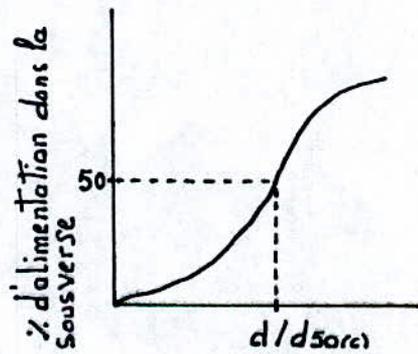


FIG. 16 LA COURBE DE PARTAGE REDUITE

III.2.5 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU CYCLONE [10;1]

** Indépendamment de la qualité des classifications effectuées par les hydrocyclones, un certain nombre d'avantages bien établis sont à leur actif, et justifient à eux seuls leur utilisation, ce sont :*

- 1 - Leur installation dans les circuits de broyage conduit à des dépenses d'investissement plus faibles qu'avec les classificateurs classiques.*
- 2 - Ils sont très peu encombrants et permettent de diminuer les dimensions des ateliers de broyage. Dans les ateliers existants, à l'occasion d'une modification de circuits, il est toujours possible d'installer des cyclones, alors que des classificateurs classiques ne trouveraient pas une place suffisante.*
- 3 - Le temps de séjour du produit dans un hydrocyclone est très court. De ce fait, les arrêts et les démarrages sont pratiquement instantanés et le régime de fonctionnement est atteint très rapidement.*
- 4 - Pour une même finesse de coupure, les cyclones peuvent donner des surverses plus denses que les classificateurs. Cet avantage est particulièrement marqué dans le cas des minerais comportant une proportion importante de schlamms, donnant à la pulpe une viscosité, qui nécessite une plus grande dilution, pour permettre la bonne marche des classificateurs agissant sous la simple action de la pesanteur. Dans le cas des cyclones, qui travaillent dans des champs d'accélération centrifuge, atteignant plusieurs centaines de fois la pesanteur g , la pulpe est soumise à des forces de cisaillement, qui empêchent la floculation des schlamms, et la classification s'effectue dans une pulpe parfaitement dispersée.*

* *Signalons maintenant les points, par lesquels il n'y a pas d'avantage en faveur du cyclone :*

a) Le prix de revient d'exploitation d'un cyclone avec sa pompe d'alimentation est plus élevée que pour un classificateur classique; les dépenses d'énergie et l'entretien étant toutes deux plus grandes. Par contre, les investissements sont bien moindres et si l'on tient compte de l'amortissement, il n'y a sensiblement égalité des prix de revient dans deux modes de classification.

b) Le surveillant n'a pas avec un cyclone un contrôle visuel direct de la charge circulante, comme dans le cas d'un classificateur à râtaux ou à vis. Il dispose par contre d'un appareil réagissant immédiatement aux modifications de réglage.

III.2.6. PARAMETRES ET FORMULES [3;11]

Les effets de changement d'opération et les paramètres dans les hydrocyclones sont très complexes. Tous ces paramètres sont reliés entre eux.

Il est presque impossible de sélectionner un cyclone pour donner la précision de séparation exigée et il est presque toujours nécessaire d'ajuster l'entrée d'alimentation, le diaphragme, la buse de décharge, la pression de la pulpe et la dilution.

Donc, on tend à spécifier un cyclone capable de manier le taux du débit exigé, avec provision pour un degré approprié d'une alimentation, l'ouverture de la surverse et la sousverse.

Il y a un nombre de relations empiriques, qui sont utilisées par des modèles dans la prévision de performances et la désignation des cyclones.

De nombreux auteurs ont étudié et proposé des formules, permettant de définir et calculer les caractéristiques des hydrocyclones.

Parmi eux on a Bradley, Plitt, Dahlstrom, Mullar et Jull. Ces derniers, à partir de travaux expérimentaux, ont établi des séries de formules tenant compte :

- de la capacité volumique Q [m^3/h] ou [litre/h]
- de la pression d'alimentation P [kpa] ou [Psi]
- du diamètre du cyclone D_c [Cms]
- du point de coupure d_{50} [microns]
- de la capacité massique M [t/h] ou [kg/h]
- de la densité de Shurry D [kg/litre]
- de la gravité spécifique du solide sec S [kg/litre]
- du pourcentage du solide d'alimentation en poids X [%]
- du pourcentage du solide d'alimentation volumique V [%]

*** La première formule est celle de la capacité volumique du cyclone Q [m³/h]**

$$Q = 9.4 \times 10^{-3} \times \sqrt{P} \times D_c^2 \quad (3.1)$$

*** La deuxième formule est celle du point de coupure du cyclone d₅₀ [microns]**

$$d_{50(c)} = \frac{0.77 \times D_c^{1.875} \times \text{EXP}(-0.301 + 0.0945 \times V - 0.00356 \times V^2 + 0.0000684 \times V^3)}{Q^{0.6} \times (S-1)^{0.5}} \quad (3.2)$$

On combinant la formule 3.1 et 3.2 d'où :

$$d_{50(c)} = \frac{12.67 \times D_c^{0.675} \times \text{EXP}(-0.301 + 0.0945 \times V - 0.00356 \times V^2 + 0.0000684 \times V^3)}{P^{0.3} \times (S-1)^{0.5}} \quad (3.3)$$

D'après cette dernière formule, on remarque que pour obtenir une petite coupure, il est préférable de diminuer le diamètre du cyclone plutôt que d'augmenter la pression.

*** La troisième formule est celle du diamètre du cyclone exigé D_c [Cms]**

d'après la formule 3.3 on obtient :

$$D_c = \frac{d_{50}^{1.481} \times (S-1)^{0.741} \times (0.0094)^{0.889} \times P^{0.444}}{0.77^{1.481} [\text{EXP}(-0.301 + 0.0945 \times V - 0.00356 \times V^2 + 0.0000684 \times V^3)]^{1.481}} \quad (3.4)$$

III.2.7 ETUDES DES PARAMETRES PAR LA METHODE NUMERIQUE

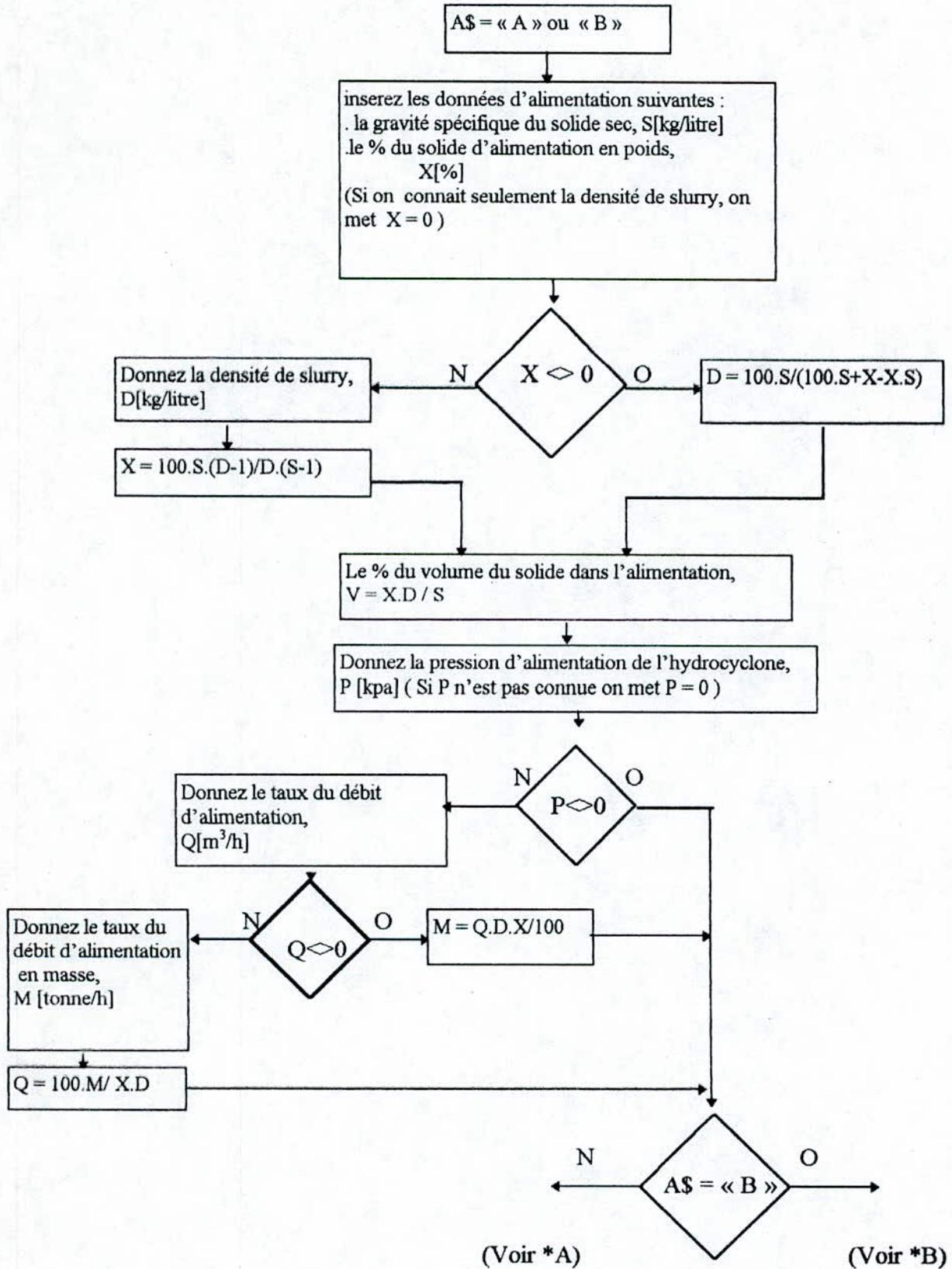
III.2.7.1 introduction

Les formules, citées dans le chapitre précédant, nous aideront à définir et à calculer les paramètres d'un hydrocyclone; l'organigramme présenté ci-dessous nous permettra de sélectionner l'hydrocyclone et les performances par les formules de Krebs-Mular-Jull.

Les paramètres ainsi sélectionnés sont :

- a) Le point de coupure et la capacité d'un cyclone de diamètre connu.*
- b) La détermination du diamètre du cyclone recherché pour donner le point de coupure voulu.*

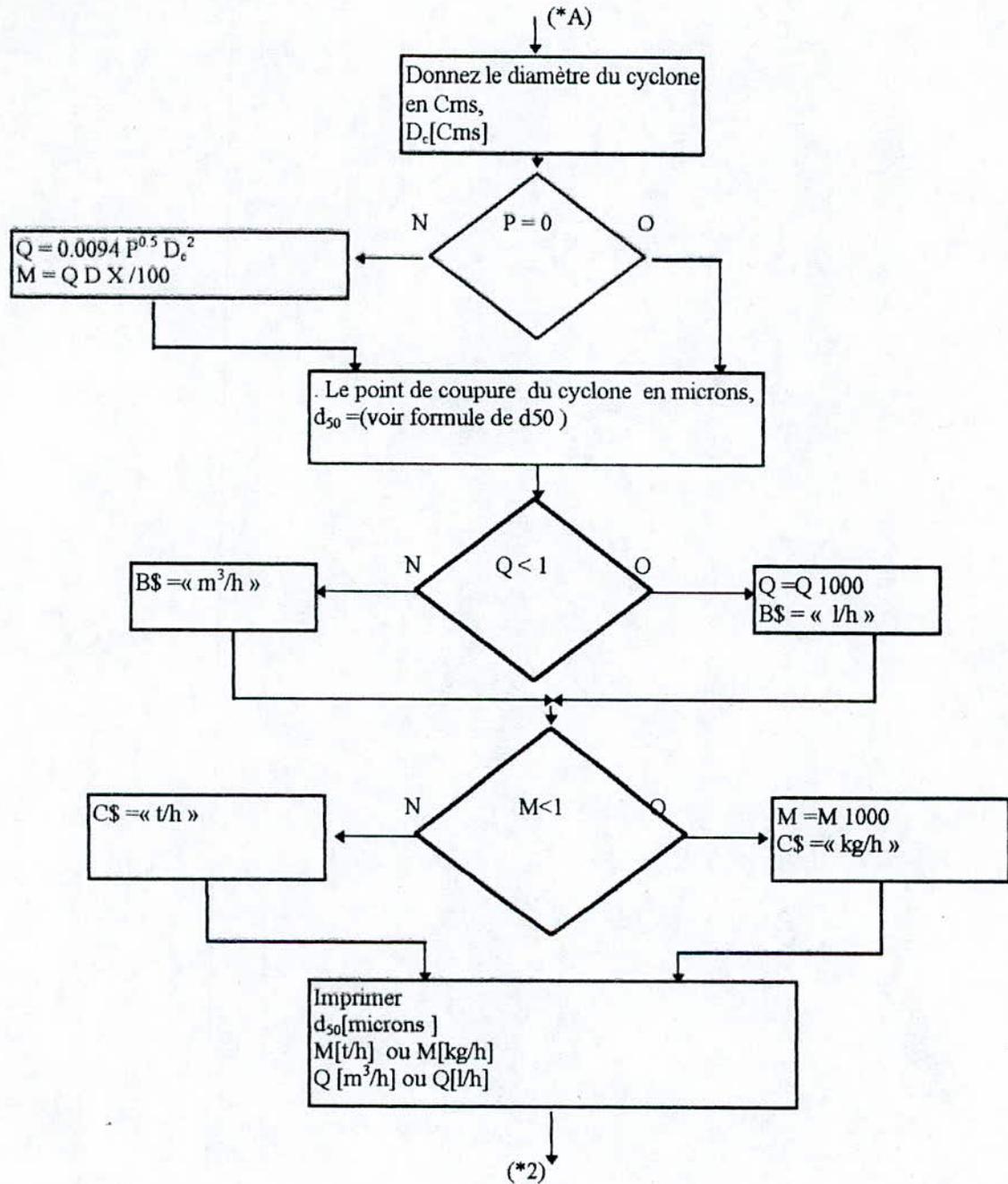
III.2.7.2 L'organigramme

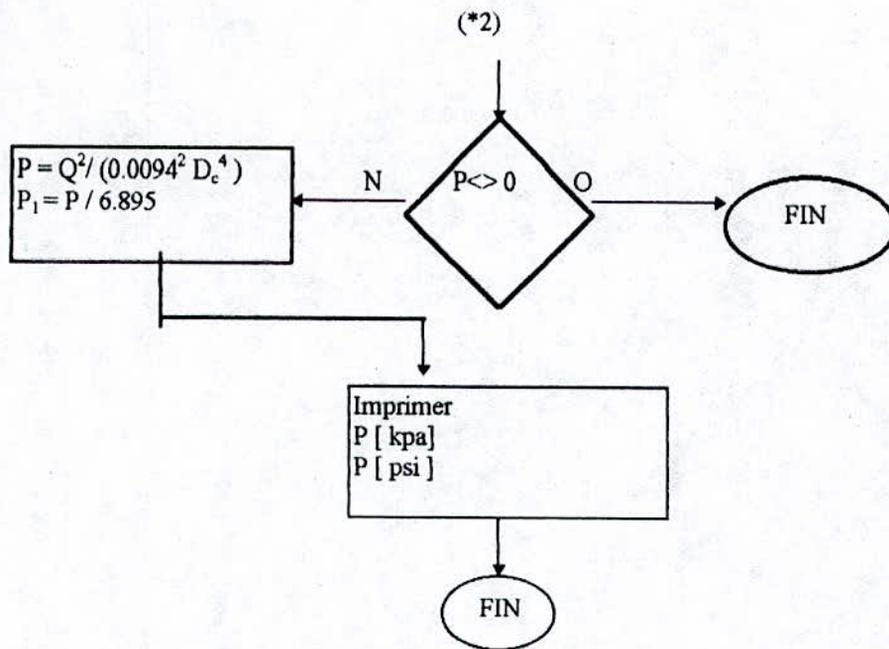


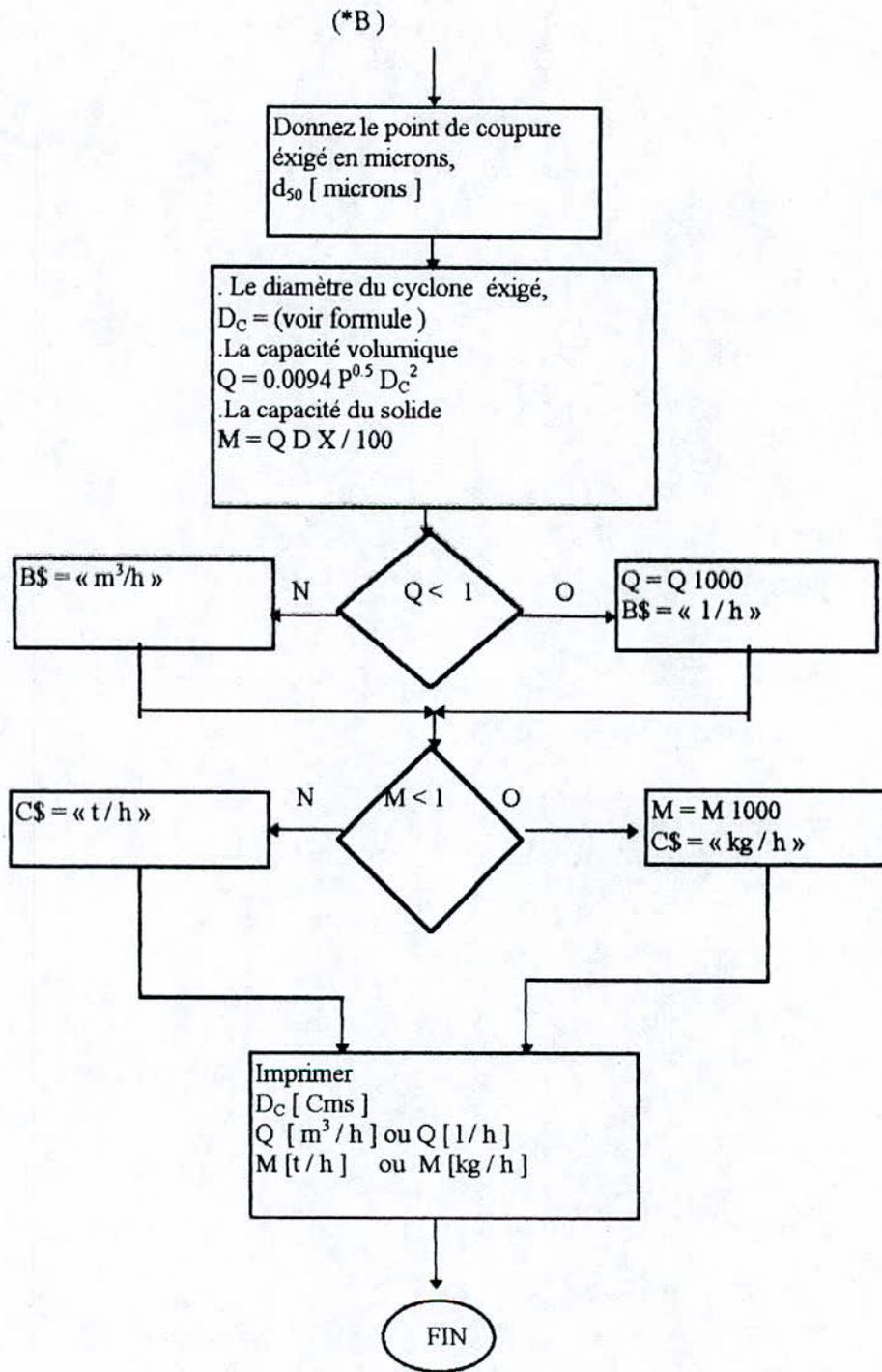
Remarque sur la lettre A et B

A: Détermination du point de coupure et la capacité d'un hydrocyclone standard de diamètre connu.

B: Détermination du diamètre d'un hydrocyclone nécessaire de donner le point de coupure exigé.







III.2.7.3 Le programme

```
10 REM calcul des hydrocyclones par les formules de krebs-mular-jull
20 REM b.a.wills 30 novembre 1986
30 PRINT : PRINT : PRINT TAB(7); "calcul des hydrocyclones "
40 PRINT TAB(7); "*****"
50 PRINT : PRINT : PRINT "A. determination du point de coupure (et"
60 PRINT "la capacité) d'un cyclone standard de diamètre ": PRINT "connu"
70 PRINT : PRINT : PRINT "B.determination du diamètre du cyclone"
80 PRINT "nécessaire pour donner le point de coupure exigé"
90 PRINT : PRINT : PRINT : INPUT "insérer a, ou b ", a$
100 PRINT : PRINT "insérer les données d'alimentation suivantes:"
110 PRINT : PRINT : INPUT "la gravité spécifique du solide sec, kg/l ", s
120 PRINT : PRINT "le % du solide d'alimentation en poids"
130 INPUT "(si on connaît seulement la densité de slurry, insérer 0) ", x
140 IF x <> 0 THEN d = 100 * s / ((100 * s) + x - (x * s)): GOTO 170
150 PRINT : PRINT : INPUT "la densité de slurry, kg/l ", d
160 x = 100 * s * (d - 1) / (d * (s - 1))
170 v = x * d / s
180 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT "insérer la pression d'alimentation du cyclone en kpa"
190 PRINT "(1 psi=6.895 kpa). si, dans la case de "
200 PRINT "l'opération du cyclone (calcul de A),"
210 PRINT "la pression n'est pas connue, insérer 0, et"
220 PRINT "ensuite insérer le taux du débit d'alimentation volumétrique. si"
230 PRINT "il n'est pas connu, insérer 0, ensuite insérer"
240 PRINT "le taux du débit d'alimentation massique du solide sec."
250 PRINT : PRINT : PRINT : INPUT "insérer la pression d'alimentation du cyclone, kpa ", p
260 IF p <> 0 THEN 310
270 PRINT : PRINT : INPUT "insérer le taux du débit d'alimentation, cu.m/h ", q
280 IF q <> 0 THEN m = q * d * x / 100: GOTO 310
290 PRINT : PRINT : INPUT "insérer le taux du débit d'alimentation massique, t/h ", m
300 q = 100 * m / (x * d)
310 IF a$ = "B" THEN 450
320 REM calcul de A
330 PRINT : INPUT "diamètre du cyclone, cms ", dc
340 IF p = 0 THEN 370
350 q = .0094 * (p ^ .5) * dc * dc
360 m = q * d * x / 100
370 d50 = .77 * (dc ^ 1.875) * EXP(-.301 + (.0945 * v) - (.00356 * v * v) + (.0000684 * v * v * v)) / ((q ^ .6) * ((s - 1) ^ .5))
380 PRINT : PRINT : GOSUB 520
390 GOSUB 580
400 IF p <> 0 THEN END
410 p = (q ^ 2) / ((.0094 ^ 2) * (dc ^ 4))
420 p1 = p / 6.895
430 PRINT "la pression du cyclone est "; p; " kpa"
440 PRINT " ("; p1; " psi)": END
450 REM calcul de B
460 INPUT "le point de coupure exigé, microns ", d50
470 dc = (d50 ^ 1.481) * ((s - 1) ^ .741) * (.0094 ^ .889) * (p ^ .444) / ((.77 ^ 1.481) * (EXP(-.301 + (.0945 * v) - (.00356 * v * v) + (.0000684 * v * v * v)) ^ 1.481))
480 q = .0094 * (p ^ .5) * dc * dc
490 m = q * d * x / 100
500 PRINT : PRINT : PRINT : GOSUB 520
510 GOSUB 640: END
520 REM subroutine
530 IF q < 1 THEN q = q * 1000: b$ = "litres/h": GOTO 550
540 b$ = "cu.m/h"
```

```
550 IF m < 1 THEN m = 1000 * m: c$ = "kg/h": GOTO 570
560 c$ = "t/h"
570 RETURN
580 REM subroutine
590 w% = 13159: REM sets 2 decimal places
600 PRINT : PRINT "le point de coupure du cyclone est "; d50; "microns"
610 PRINT : PRINT "le taux du debit massique est "; m; c$
620 PRINT : PRINT "le taux du debit volumétrique est "; q; b$
630 RETURN
640 REM subroutine
650 w% = 13159: REM sets 2 decimal places
660 PRINT : PRINT "le diamètre du cyclone exigé est "; dc; "cms"
670 PRINT : PRINT : PRINT "la capacité volumétrique est "; q; b$
680 PRINT : PRINT : PRINT "la capacité du solide est "; m; c$: RETURN
```

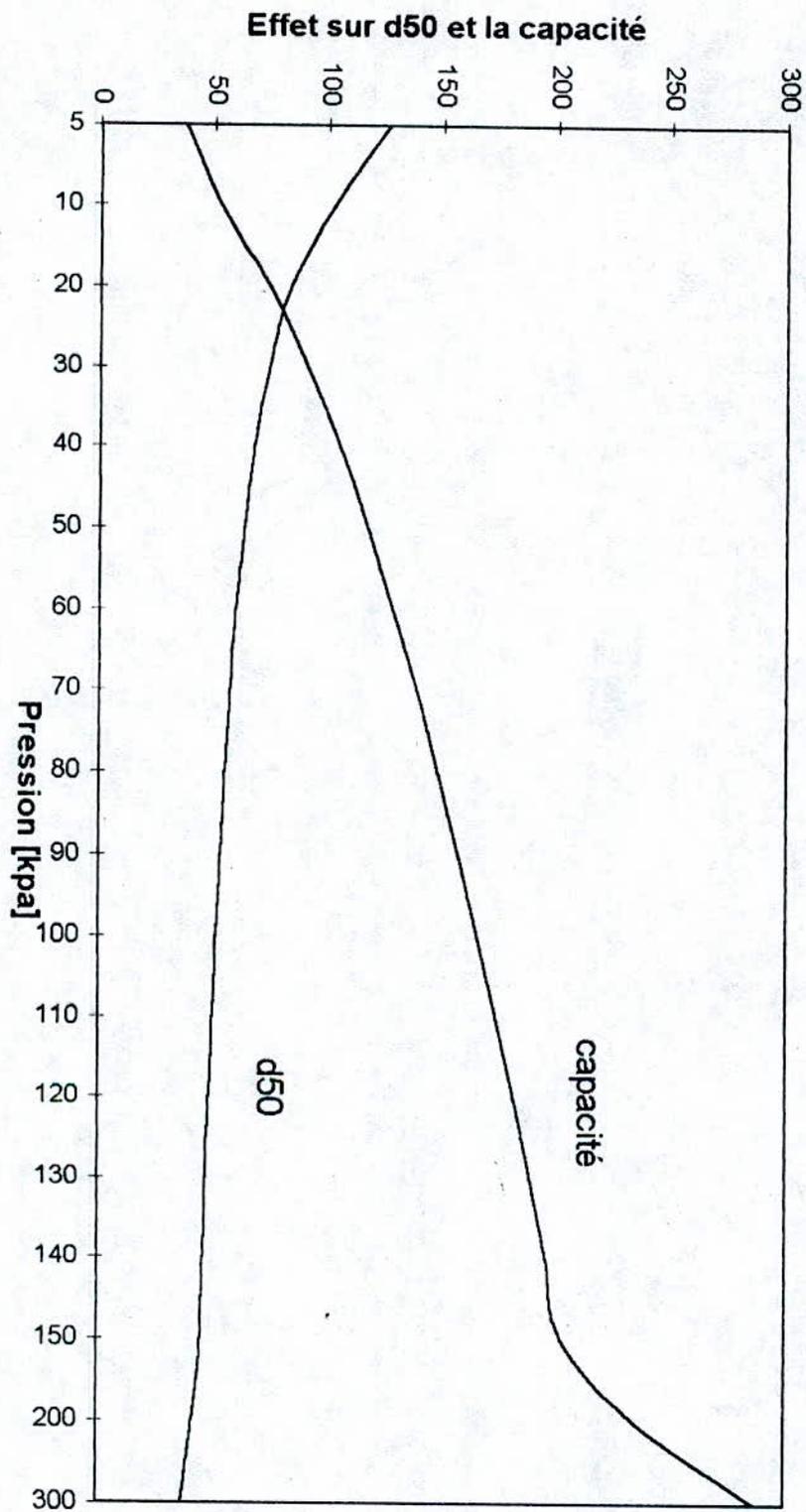
III.2.8 EFFET DE QUELQUES PARAMETRES

** Effet de la pression sur la capacité et le point de coupure de l'hydrocyclone.*

L'augmentation du débit d'alimentation, ou de la pression, accroît l'effet de la force centrifuge, les particules fines sont transportées vers la sousverse, et d_{50} est décroissante.

La figure 17 montre l'effet de la pression sur la capacité et le point de coupure de l'hydrocyclone.

FIG.17 : Effet de la pression sur la capacité et le point de coupure de l'hydrocyclone



*** Effet de la concentration du solide sur le point de coupure de l'hydrocyclone.**

La figure 18 montre que la concentration d'alimentation influe d'une manière importante sur le point de coupure, quand la densité de la pulpe est élevée.

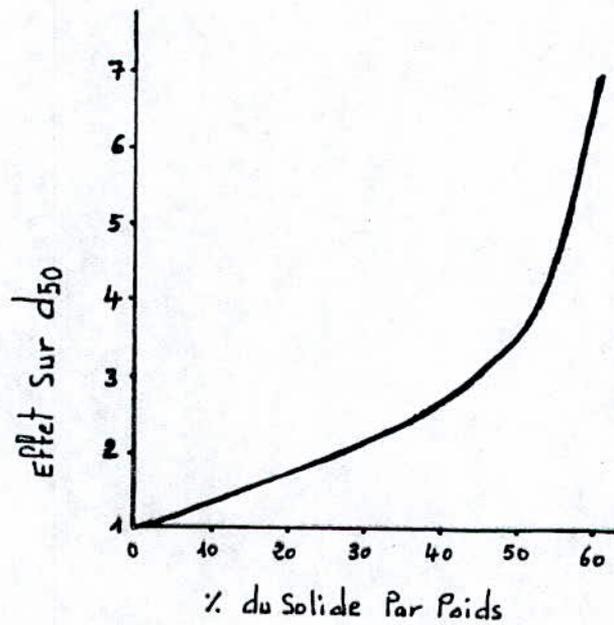


FIG.18 L'EFFET DE LA CONCENTRATION DU SOLIDE SUR LE POINT DE COUPURE DE L'HYDROCYCLONE

CONCLUSION

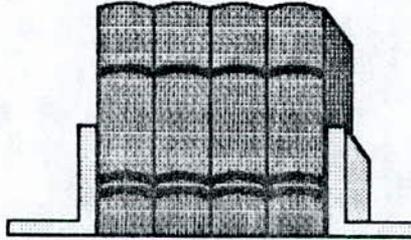
Les hydrocyclones, utilisant de grandes forces de cisaillement, permettent une séparation très fine et des précisions de coupure bien supérieures à celles des appareils traditionnels.

Les hydrocyclones ont comme caractères essentiels: la marche en continue, qui rend nécessaire une régulation de l'alimentation; les grandes accélérations centrifuges, qui favorisent de bonnes séparations avec des débits élevés malgré un temps assez court de séjour de la suspension dans le corps du cyclone. La précision de coupure peut être augmentée par un fonctionnement à plusieurs étages en série. Le domaine de coupure ne s'élève guère au-dessus de 100μ , sans subir de fortes pertes dans la précision de coupure.

Il est essentiel de tenir compte des cas fréquents, où un cyclone pourra remplacer un classificateur, qui présente les inconvénients suivants : soit encombrant (qui prend plus de place) ou trop petit (pour recevoir les débits nécessaire).

Le contrôle efficace des paramètres de travail d'un hydrocyclone nous évite un surbroyage conséquent, d'où la diminution du coût de traitement du minerai et l'usure inutile des broyeurs.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES



[1] BROUGERE, M.

Préparation mécanique des minerais (Ecole Nationale Technique des mines d'Alès)

[2] BLAZY, 1970

Valorisation des minerais (Presses Universitaires, France)

[3] WILLS, B.A, 1988

Mineral processing technology, fourth edition an introduction to the practical aspects of Ore treatment and Mineral recovery;

[4] NORMAN L. WEISS, 1985

SME Mineral processing handbook, VI, editor in Chief, New York;

[5] ZAKHVATKINE V. , 1985

Mineralurgie, université de Annaba

[6] SVAROVSKY, L. , 1984

Hydrocyclones, Holt, Rinehart & Winston Ltd, eastbourne .

[7] LYNCH, A.T, 1977

Mineral crushing and grinding circuits, VI, Elsevier Scientific Publishing Company Amsterdam - Oxford , New York;

[8] MARCEL ENTAT,

Classification hydraulique en dimensions, technique d'ingénieur A5150

[9] PIERR BLAZY,

Fragmentation (applications), Technique d'ingénieur A 5070

[10] COMMISSION BROYAGE DE L'A.N.R.T, 1965

Technique moderne de broyage, editeurs Eyrolles, Gauthier Villars, Paris

[11] REVUE DE L'INDUSTRIE MINERALE- MINE ,

Volume 53 - N°7, juillet 1971