

Contribution à l'étude du lavage des charbons au cyclone Driessen

R. TILLE

Assistant à l'Université Libre de Bruxelles.

Travail effectué au Laboratoire de Préparation Mécanique des Charbons et Minerais de l'Université Libre de Bruxelles,
sous la direction des Professeurs W. BOURGEOIS et I. de MAGNEE (*).

« The cyclone can be characterised by saying
that a static washing effect is attained with the help
of dynamic forces ».

(M. G. Driessen.)

SAMENVATTING

Het artikel vangt aan met enkele beschouwingen aangaande de wasmiddelen van grote dichtheid en de voorstelling van de doelmatigheid van de apparaten. Vervolgens beschrijft de auteur de proeven uitgevoerd op een experimentele cycloon van 75 mm doormeter.

Deze proeven hebben hem er toe gebracht als fundamentele parameters de verhouding tussen de openingen van de cycloon en de dichtheid van het wasmiddel bij de injectie te kiezen.

De studie van deze veranderlijken laat toe op een geschikte wijze de karakteristieken van de « underflow » en « overflow » van het apparaat te bepalen.

Tot besluit steunt de auteur zich op de vorige resultaten om de optimum bedrijfsvoorwaarden van de was-cycloon te bepalen. Ingeval van gebruik van magnetisch medium, toont de proef dat de zone van bevredigende werking tamelijk nauw is.

RESUME

L'article débute par quelques notions concernant les pulpes denses et la représentation de l'efficacité des installations de lavage des charbons. Ensuite, l'auteur relate les essais effectués sur un cyclone expérimental de 75 mm de diamètre.

Ces essais l'ont conduit à considérer comme paramètres fondamentaux, le rapport des diamètres des orifices du cyclone et la densité de la pulpe à l'injection.

L'étude de ces variables permet de définir commodément les caractéristiques des écoulements d'« underflow » et d'« overflow » de l'appareil.

En conclusion, l'auteur se base sur les résultats précédents pour préciser les conditions de fonctionnement optimum du cyclone laveur. Dans le cas de l'utilisation de médium à la magnétite, l'expérience montre que la zone de marche satisfaisante est assez étroite.

INTRODUCTION

Nous pensons que le principe du cyclone est trop connu pour nous étendre, outre mesure, sur sa description. Le cyclone laveur, tel qu'il est utilisé actuellement, résulte de la fusion de deux techni-

ques : celle de la centrifugation et celle du lavage aux liqueurs denses.

L'étude du cyclone dépoussiéreur et épaisseur, menée depuis longtemps dans différents pays, devait conduire à la mise au point du lavage aux liqueurs

(*) Ce travail a pu être réalisé grâce à l'appui financier d'INICHAR.

denses bénéficiant des forces centrifuges énormes qui règnent dans le cyclone.

Il faut bien avouer que la dynamique des pulpes est peu connue et que, par conséquent, il est impossible actuellement de mettre en équation le mouvement des particules de charbon qui se déplacent sur les flancs du cône; néanmoins, on peut dire grosso-modo que la paroi est revêtue d'un lit de lavage et que le cyclone est parcouru par deux tourbillons.

Le premier, autour de l'axe, entraîne par l'overflow les particules de densité plus faible avec une partie du médium.

Le second, sur la paroi conique, entraîne vers la pointe la plus grande partie du médium épaissi et les schistes.

Toutes les études théoriques effectuées à ce sujet donnèrent des résultats assez décevants à cause de la complexité des phénomènes dont le cyclone est le siège. Mais, à vrai dire, la connaissance parfaite du mouvement des pulpes dans un champ rotationnel, apporterait peu de renseignements vraiment utiles du point de vue lavage des charbons.

Que le problème puisse tenter les mécaniciens, quoi de plus naturel? Nous pensons pourtant que la question n'est pas près d'être résolue. Dans ces conditions, l'étude du cyclone ne peut porter que sur des bilans de matière et sur des coefficients d'efficacité empiriques.

C'est à l'ingénieur hollandais M. G. Driessen que revient l'honneur d'avoir donné au cyclone sa place dans l'atelier de préparation mécanique; il fut le premier à en exposer les avantages tant au point de vue du lavage des charbons que de l'épaississement des pulpes.

Nous verrons plus loin que le cyclone laveur est prêt à s'intégrer dans les installations de traitement des charbons par liqueurs denses et que les problèmes restant à résoudre sont des problèmes de récupération des médiums.

Pour tous renseignements au sujet de l'historique de la question, nous renvoyons à la bibliographie (I, II, III, IV et V).

LES PULPES DENSES

Mesure de leurs caractéristiques physiques.

Les procédés de sink and float utilisent des médiums formés d'un matériau mis en suspension dans l'eau. Comme on ne connaît pas de méthode d'étude exhaustive des pulpes, on se contente de les définir par les coefficients simples, repris ci-dessous.

1) Nature du matériau utilisé.

La définition de la substance formant la suspension va donner immédiatement les limites d'utilisation de la pulpe correspondante. Dans le tableau suivant, nous résumons les expériences faites à ce sujet (VI).

Matériau	Densité δ	Densité max. d'utilisation de la pulpe
Quartz	2,65	1,38
Magnétite	5,18	2,08
Ferrosilicium à 15 % ...	6,80	2,50
Galène	7,50	2,50
Plomb	11,50	3,90

Il est évident qu'avec tel matériau donné, on pourra préparer des suspensions plus denses que celles définies ci-dessus, mais la viscosité de l'ensemble devient prohibitive.

2) Coefficients caractérisant la teneur en solide des pulpes.

a) La densité apparente d . Nous l'employons généralement.

b) La teneur en solide (en % en poids) x .

Si δ est la densité du matériau, il existe entre x , d et δ la relation :

$$x = \frac{d - 1}{d} \cdot \frac{\delta}{\delta - 1}$$

c) La teneur en solide (en % du volume) X . On a de même :

$$X = \frac{d - 1}{\delta - 1}$$

3) Granulométrie du médium.

Les courbes granulométriques sont dressées par tamisage pour les grains supérieurs à 74 μ et par décantation pour les autres. Pour être précis, il faudrait présenter la courbe granulométrique jusqu'aux grains de 5 μ mais, en réalité, comme un médium tend à se polluer après un certain temps d'utilisation et que les fines contiennent une partie de minerai broyé, on se contente généralement de donner le pourcentage en poids de grains de dimensions inférieures à 200 mesh Tyler. Le médium à la magnétite que nous avons utilisé était caractérisé par 75 %, passant à ce tamis.

4) Courbes de décantation.

Une suspension de densité d_0 , connue est versée dans une burette et on repère le mouvement de la zone décantée et du sommet de la zone épaissie au fond du tube. Cette mesure peut parfois devenir délicate si le médium de départ est très dilué.

On représente les résultats graphiquement en portant le temps en abscisses et les niveaux considérés, en ordonnées. Si l'on travaille avec des densités d_0 variables, mais dans les mêmes conditions expérimentales pour tous les autres facteurs, la densité du produit tassé au fond de l'éprouvette atteint asymptotiquement la valeur d_M constante. Cette valeur est de 3,0 pour le médium de nos essais.

A propos des courbes de décantation, nous voudrions émettre quelques considérations sur les lits

de lavage; ce qui suit est valable aussi bien pour le sink and float dans un bac statique que pour le traitement au cyclone.

Si, à un instant t , on représente la variation de densité le long d'un lit de pulpe en décantation, on trouve l'allure de la figure 1. La courbe présente deux paliers dont le premier correspond à la zone en décantation proprement dite et le second, à la zone en tassement. Sur une assez grande hauteur, la densité du médium reste constante et vaut d_0 . La partie tassée a une densité proche de d_M . Au cours du temps, seule la position des paliers C et D varie, les verticales A et B restant inchangées.

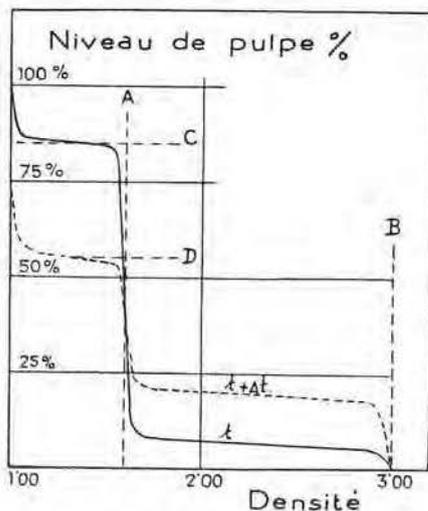


Fig. 1. — Courbes de décantation.

On peut en déduire que, si des particules de charbon sont placées sur un lit de magnétite de densité d_0 , cette densité se trouve maintenue, s'il y a décantation du lit.

5) Les mesures de viscosité.

Pour mesurer la viscosité des suspensions denses, on utilise un appareil spécial, nommé consistomètre.

Un agitateur de laiton maintient une turbulence suffisante dans un réservoir pendant que l'on mesure le temps d'écoulement d'une certaine quantité de matière par un tube fin. Entre la viscosité et le temps d'écoulement T , il existe la relation :

$$\eta = k \cdot T \cdot d_0 \quad (1)$$

la constante k est déterminée par étalonnage au moyen de solutions de glucose dans l'eau.

L'utilisation de la formule (1) conduit à des résultats approchés et repose sur les deux hypothèses suivantes :

- 1) L'écoulement est laminaire et l'on peut négliger l'énergie cinétique résiduelle.
- 2) La viscosité ne dépend pas de la vitesse d'écoulement.

Ceci revient à supposer que la matière se comporte comme une substance fluide visqueuse et non plastique. (Rappelons qu'une substance est dite plastique quand la déformation est fonction à la fois de la sollicitation et de sa vitesse d'application.)

Quel que soit le domaine de validité des hypothèses précédentes, le coefficient ainsi défini peut rendre des services dans la comparaison des médiums et l'étude de leur comportement physique macroscopique.

Pour obtenir des mesures de viscosité reproductibles, il est nécessaire de suivre des normes bien précises dans la construction et l'utilisation des consistomètres. Nous renvoyons, à ce sujet, aux ouvrages spécialisés (VI et VII).

Définition de l'efficacité d'une épuration des charbons.

La question de la représentation des résultats d'une épuration fut longtemps controversée, chaque expérimentateur ayant pris l'habitude de définir ses propres coefficients, ce qui rendait la comparaison de leur essais assez délicate et très aléatoire.

Ces dernières années, sous l'impulsion de K.F. Tromp et à la suite des travaux du Cerchar en France (VIII, IX, X et XI), est apparu un nouveau système, très élégant, permettant de définir les caractéristiques d'un essai avec beaucoup de précision.

Nous reprenons ci-dessous les principales conclusions des travaux français.

1) Courbe caractéristique du produit traité (courbe de lavabilité).

La définition des courbes de lavabilité est connue depuis longtemps et nous n'y reviendrons pas. Remarquons simplement que, lors du lavage par liquide dense, la densité des particules de charbon apparaît comme paramètre fondamental. Il faut donc porter en diagramme les poids cumulés en fonction des densités, et non pas des teneurs en cendres. Cette seconde courbe est très utile pour le calcul des bilans économiques, mais sans intérêt pour ce qui nous occupe.

2) Courbe caractéristique de l'épuration (courbe de partage).

La courbe de partage donne, en abscisses, les densités et, en ordonnées, la proportion du poids de la tranche élémentaire de densités comprises entre d et $d + \Delta d$, qui passe dans les schistes. (Les pourcentages s'entendent par rapport au brut.) Pour chaque lavage, on peut donc dessiner une courbe comme celle de la figure 2.

On appelle densité de partage, et on note d_p , la densité qui correspond à l'ordonnée 50 %.

L'écart probable moyen est défini comme suit :

$$E_{pm} = 0,5 A'B'$$

On objectera que le dessin de la courbe de partage est délicat à cause de l'imprécision existant sur la position des points expérimentaux; c'est la raison pour laquelle il est utile d'anamorphoser ces courbes en droites, comme le préconisait d'ailleurs déjà M. Terra en 1959. Le tracé de la droite moyenne se faisant avec précision, il est facile de lire les valeurs de d_p et de E_{pm} .

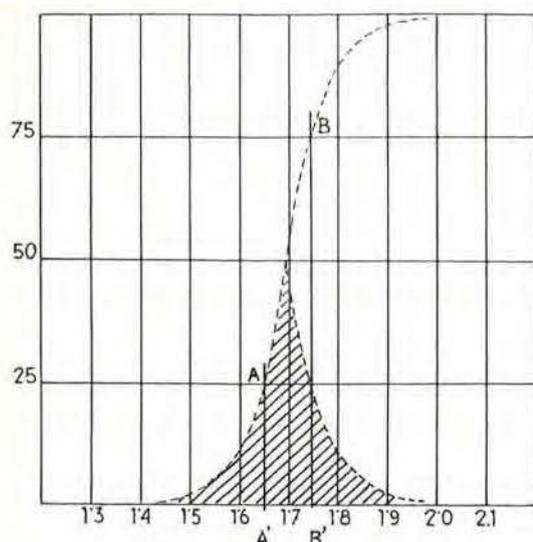


Fig. 2. — Courbe de partage.

Cette anamorphose se fait en portant, en ordonnées, la fonction de Gauss :

$$y = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (2)$$

et, en abscisses, une fonction qui vaut :
 log (d - 1) pour les bacs à piston,
 log d pour les tables pneumatiques,
 d pour le cas du cyclone.

Dans ces deux premiers cas, la loi de partage est dite logarithmico-normale et, dans le troisième, simplement normale.

Des études, faites en France, ont montré que la courbe de partage ne dépend pas du charbon traité, du moins dans la zone de réglage convenable de l'appareil laveur. Cette constatation fut faite, notamment par M. G. Driessen et P. Belugou, au sujet du cyclone; c'est dire tout l'intérêt qui s'attache à ce mode de représentation.

Remarques.

1. — On trouvera dans les anciennes publications la notion d'écart probable remplacée par celle de « surface de Tromp »; c'est la surface hachurée dessinée sur la figure 2.

On peut montrer que, si la courbe de répartition est normale, il existe, entre la « surface de Tromp S » et l'écart probable, la relation :

$$S = 1,185 E_{pm}$$

L'unité de surface est un rectangle qui a, comme côtés respectifs, l'unité des abscisses et l'unité des ordonnées.

2. — Outre les deux paramètres E et d_p , certains auteurs utilisent également un autre coefficient appelé Imperfection et défini comme suit :

$$I = \frac{E_{pm}}{d_p - 1} \quad (5)$$

Ce coefficient serait caractéristique de l'installation d'épuration utilisée. En d'autres termes, un même appareil, lavant des charbons à des densités de partage différentes, donnerait un réseau de courbes logarithmico-normales, définies par un coefficient I constant. En réalité, le coefficient qu'il faudrait envisager, dépend de la forme d'anamorphose des courbes de partage, ce qui rend assez aléatoire la comparaison des efficacités de différents appareils.

3. — Efficacité économique de l'épuration :

Soit L, le poids en % de lavé à c % de cendres, donné par le lavage réel et, soit L', le poids en % de lavé à c % de cendres, qui serait donné par un lavage parfait.

On appelle rendement organique, le rapport :

$$\frac{L}{L'}$$

Il a un grand intérêt pour l'appréciation des performances économiques d'un laivoir, mais peu de valeur pour comparer des essais expérimentaux faits à petite échelle sur un nouveau procédé, aussi nous sommes-nous borné à la comparaison des densités de partage et des écarts probables.

Travaux du Laboratoire des Staatsmijnen de Hollande.

La plus grande partie des résultats obtenus en Hollande fut publiée par M. G. Driessen (II). Les Hollandais utilisaient des pulpes très variées comme le loess, la barytine et les pyrites grillées.

Dès le début, les essais menés avec des cyclones de 200 et de 350 mm furent encourageants; à titre d'exemple, le tableau suivant donne quelques caractéristiques des tests préparatoires et, afin d'avoir un terme de comparaison précis, nous avons transformé en écarts probables les « surfaces de Tromp ».

Résultats obtenus avec un cyclone de 200 mm (médium : pyrites grillées) (II, page 8)

Densité des pulpes	Densité de partage	Ecart probable
1,54	1,90	0,071
1,40	1,79	0,055
1,51	1,65	0,067
1,24	1,55	0,045
1,19	1,47	0,042

Driessen a également étudié la variation de rendement organique avec l'écart probable; il fit remarquer que la précision de coupure importait surtout à de basses densités de partage et que, conséquemment, le cyclone se justifiait pour la prépara-

Pour ce qui concerne la définition des rendements de lavage, nous renvoyons au substantiel rapport d'Inchar sur les travaux de la Conférence Internationale de Paris en 1950 - XII.

tion des charbons très purs. L'appareil installé à la mine Maurits traite les granulométries comprises entre 0,5 et 8 mm, avec un bon rendement. La raison de criblage est donc d'environ 15 sans que l'efficacité du lavage en soit diminuée.

Les articles de Driessen ne donnent aucun renseignement sur la variation des « surfaces de Tromp » en fonction du réglage des orifices; vraisemblablement, seuls les meilleurs résultats se trouvent consignés dans les publications, tous les tâtonnements étant passés sous silence.

Travaux entrepris en France par le Cerchar (XII, XIII et XIV).

Les essais effectués en France, aux laboratoires de Villers-St-Paul ainsi qu'à Göttelborn, permirent d'éclairer d'une façon plus précise certains aspects du comportement du cyclone laveur.

L'étude porta successivement sur un cyclone de 150 mm, puis sur une installation semi-industrielle avec cyclone de 350 mm. Les médiums choisis étaient le schiste ou la barytine.

Après que l'on eut débrouillé l'influence d'une série de paramètres et réalisé des performances se rapprochant de celles obtenues par Driessen, un plan pilote fut installé au lavoir Rousseau du groupe de Valenciennes. L'unité permettra, vraisemblablement, de tirer au clair certains points concernant la récupération des médiums ainsi que le prix de revient.

Les imperfections de lavage I sont de l'ordre de 0,04 à 0,06 et le rendement organique devient très proche de 100 %. Les ingénieurs du Cerchar estiment qu'il est possible de traiter au cyclone les produits de granulométries comprises entre 0 et 25 mm, mais que la présence de très grosses particules gêne le lavage des fines; il est donc préférable d'utiliser deux cyclones en parallèle pour laver séparément le 0-10 et le 10-25 mm.

CONCLUSIONS

Les extraits de publications qui précèdent nous montrent qu'il existe, actuellement, deux tendances concernant le réglage du cyclone laveur :

Ecole Française :

Selon les techniciens du Cerchar, pour un médium à la barytine ou au schiste, les résultats les plus intéressants sont obtenus lorsque la densité de partage est très proche de la densité du médium injecté. Dans ces conditions, le cyclone ne travaille plus en épaisseur, c'est-à-dire que les densités apparentes des produits de l'overflow et de l'underflow sont voisines. Le médium utilisé pour ces essais avait une finesse telle que 95 % du produit passait au tamis de 300 mesh Tyler.

Ecole Hollandaise :

Les Staatsmijnen obtinrent de très bons résultats, même avec des cyclones travaillant encore légèrement en épaisseur; nous renvoyons au tableau que nous avons repris, lors de la relation de leurs essais.

Il est utile de préciser, à cet égard, que ces chiffres ont trait à un matériau pour médium de densité plus haute que celle de la barytine.

Essais faits à l'Université Libre de Bruxelles.

Le laboratoire de Préparation Mécanique des Charbons et Minerais de l'Université dispose d'un cyclone (Fig. 5). Les suspensions denses sont introduites dans un cylindre à parois épaisses, que l'on voit surmontant le cyclone. La pression nécessaire à la mise en charge est fournie par un compresseur débitant dans un réservoir pour assurer le volant indispensable.



Fig. 5. — Cyclone du Laboratoire de l'Université Libre de Bruxelles.

On peut, à son gré, faire varier l'orifice de pointe ainsi que le diamètre du diaphragme commandant l'écoulement de l'overflow.

Pour nos essais, nous disposons des ajutages suivants :

Pointe (diamètre) :	5,1	6,8	8,6	9,2	mm
Diaphragme » :	8,3	9,8	13,0	15,8	mm

Le diamètre de la partie cylindrique du cyclone est de 75 mm et l'angle au sommet, de 24°.

Notre Laboratoire sera bientôt doté d'une nouvelle unité, travaillant en circuit fermé, dont l'injection de pulpe se fera par une pompe à sable Allis-Chalmers et qui nous permettra d'étudier l'influence de certains paramètres tels que : diamètre du cyclone, diamètre de l'orifice d'injection, forme du diaphragme, etc..., toutes caractéristiques restées constantes lors de nos essais.

Le charbon utilisé nous fut fourni par les Charbonnages d'Hensies-Pommerœul, Unis de l'Ouest de Mons, Marihaye et des Liégeois en Campine (Zwartberg). Nous remercions tout particulièrement les Charbonnages de Bonne-Espérance à Lambusart, à qui nous devons notre approvisionnement en magnétite broyée.

Le cyclone de l'Université a déjà fait l'objet d'une publication (XV).

Nous avons essayé avec notre installation de mettre en évidence l'influence des différentes variables qui définissent le fonctionnement du cyclone laveur; toutes nos mesures furent faites en tenant compte de la note du Cerchar concernant la représentation des résultats d'une épuration. C'est dire que notre but pour cette première étude fut des plus modestes.

D'autre part, la question de la similitude n'étant pas encore tranchée pour le fonctionnement du cyclone, nos résultats ne sont peut-être pas généralisables aux plus grandes installations; malgré tout, nous pensons que l'allure des phénomènes se trouvera conservée et que les rendements pourront être améliorés si l'on passe au cyclone de plus grand diamètre. C'est du moins ce qu'ont démontré des essais très complets faits à l'étranger.

Nature du médium.

Tous nos essais de lavage des charbons furent faits en utilisant la magnétite comme médium; l'étude des autres suspensions: loess, schiste, barytine, etc..., fut complètement négligée. Notre choix a été dicté par deux raisons:

1) Les procédés modernes de lavage par sink and float (Link-Belt, Cyanamid, Humboldt, Wemco, etc...) utilisent uniquement la magnétite pour la composition de leurs médiums. C'est en effet, avec le ferrosilicium, plus coûteux, le seul matériau susceptible de régénération complète par le passage au séparateur magnétique.

Les substances telles que le schiste ou la barytine voient leurs propriétés gravifiques évoluer d'une façon continue à cause de la pollution par les schlamms, la viscosité augmentant de plus en plus pour une même densité de séparation.

Les cyclones laveurs étant destinés à être branchés sur des installations de lavage par liqueurs denses déjà existantes, il en résulte que l'utilisation du même médium permettra une heureuse unification des lavoirs modernes.

2) L'application la plus intéressante du cyclone laveur est évidemment le traitement des plus fines granulométries (0-10 mm); il faut donc songer à faire les séparations médium-schiste et médium-charbon autrement que par tamisage. La magnétite s'impose donc encore.

Différents constructeurs, comme Frazer and Chalmers d'Angleterre et Western Machinery Co d'Amérique, mettent au point, à l'heure actuelle, de petites installations de récupération et de régénération des médiums magnétiques. L'Université de Bruxelles vient de faire l'acquisition d'un groupe de ce type pour le Laboratoire de Préparation Mécanique.

Nous ne prétendons pas que les essais qui furent menés en utilisant d'autres médiums ont été faits en pure perte; ils donnent des renseignements précieux sur la dynamique du cyclone. Toutes les raisons que nous avons exposées ci-dessus font néanmoins apparaître que la préférence doit être donnée à l'étude des suspensions magnétiques.

Dans les pages qui suivent, nous montrerons que certaines des conclusions obtenues en France concordent avec celles de nos expériences alors que d'autres, par contre, sont totalement différentes

La marche en similitude de cyclones semblables.

Dans notre petite installation, le débit de charbon peut atteindre de 0,2 à 0,5 t/h avec une dilution de 10 % environ. Il est difficile de définir exactement la notion de similitude de marche de deux cyclones.

Considérons des cyclones traitant la même pulpe; il nous semble assez logique de prendre, comme critère, la variation selon le rayon du cône de l'accélération appliquée à une particule de masse unitaire. Nous écrivons:

$$\frac{\Delta\gamma'}{\Delta r'} = \frac{\Delta\gamma''}{\Delta r''} = C^{te} \tag{4}$$

$\Delta\gamma$: variation de l'accélération quand le rayon varie de Δr . Si le rapport de similitude est k , la constance du rapport (4) exige que l'on ait pour les deux cyclones caractérisés par les indices ' et ''

$$\gamma' = k \cdot \gamma''$$

puisque

$$r' = k \cdot r''$$

ou

$$\frac{v'^2}{r'} = k \cdot \frac{v''^2}{r''}$$

et

$$v' = k \cdot v''$$

ce qui entraîne entre les débits

$$Q' = k^3 \cdot Q''$$

En prenant les chiffres fournis par le Cerchar et Driessen, on peut dresser le petit tableau suivant:

Diamètre du cyclone	Débit du charbon	Origine
75 mm	0,25 t/h	U.L.B.
150 »	2,00 »	Cerchar (XII)
200 »	3,5 »	Driessen (II)
350 »	25,— »	Cerchar (XII)
500 »	70,— »	Cerchar (XII)

On vérifiera facilement que le débit de charbon brut est proportionnel au cube du diamètre du cyclone.

Bien que le calcul précité doive être considéré comme un schéma, il semble licite d'adopter l'accélération du champ de force comme une variable fondamentale.

La répartition des débits.

Nos premiers essais eurent pour résultat de faire apparaître une relation existant entre le rapport des débits volumétriques Q_1/Q_2 et le rapport des diamètres des orifices; cela ne donne aucun renseignement immédiat sur l'efficacité du lavage, mais permet de se faire une idée sur la répartition du médium dans le cas des installations industrielles.

Avant de décrire les premiers résultats expérimentaux, nous voudrions attirer immédiatement l'attention sur les limites d'application de nos formules.

l'underflow d'un cyclone surchargé. La viscosité du médium est telle que la nappe fluide a complètement disparu pour faire place à un jet cylindrique épais.

Il existe, bien entendu, toute une gamme d'écoulements entre ces deux extrêmes, la décharge hésitant parfois entre la forme en nappe et la forme cylindrique. Nos formules ne sont valables que pour l'écoulement strictement tourbillonnaire.

Ce domaine est suffisamment étendu pour couvrir le cas de toutes les applications industrielles.

Si l'on porte, sur un diagramme bilogarithmique,



Fig. 4 et 5. — Ecoulement normal et écoulement d'un cyclone surchargé.

La figure 4 représente un cyclone en fonctionnement normal. La nappe de l'underflow prend appui sur la périphérie de l'orifice de pointe et son angle est supérieur à celui du cyclone. L'écoulement de ce type se produit toutes les fois que le cyclone n'est pas surchargé; l'axe du cône est occupé par un filet d'air.

La figure 5 montre, d'autre part, l'écoulement de

le rapport Q_1/Q_2 en fonction de D_1/D_2 , on obtient la figure 6.

La dispersion des résultats s'explique facilement si l'on songe à la difficulté de mesurer des volumes de pulpes importants dans des bacs préalablement gradués.

Ce diagramme nous permet d'affirmer que, dans le domaine du travail courant au cyclone, le rap-

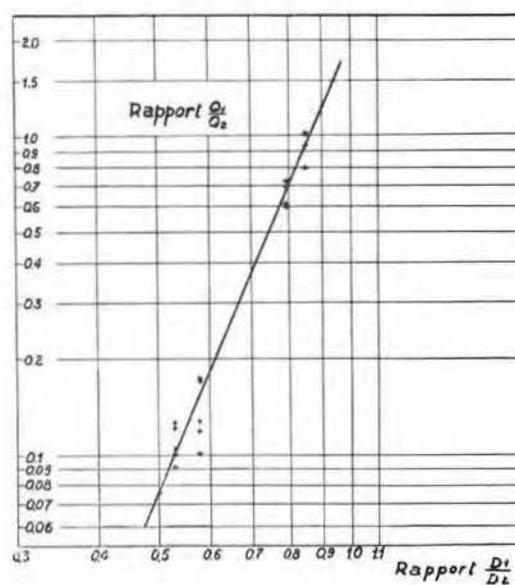
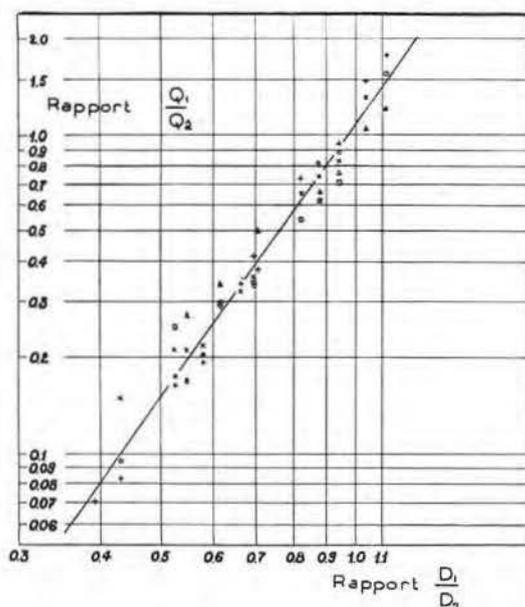


Fig. 6 et 6bis. — Loi de répartition des débits. - Cyclone U.L.B. et cyclone Shaurock Miac.

port Q_1/Q_2 ne dépend pas de la densité du médium d'alimentation; il ne varie qu'avec le rapport des diamètres des orifices. La pente de la droite correspond à l'exposant 5.

Nous écrivons donc :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = k \cdot \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^5 \quad (5)$$

La décharge inférieure de notre cyclone étant libre et le diaphragme surmonté d'un coude et d'un morceau de tuyau, nous considérons le coefficient k comme un coefficient de contraction qui affecte le diamètre D_2 ;

$$\text{soit : } \frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{D_1}{\alpha D_2} \right)^5 \quad (6)$$

avec $\alpha = 0,96$.

Nous ne prétendons pas que, pour tous les cyclones industriels, les formules précitées restent valides; il suffit, en effet, que la conicité des ajutages de pointes ne soit pas rigoureusement constante pour voir intervenir des phénomènes perturbateurs dont il est difficile de prévoir les effets. Quoi qu'il en soit, il sera toujours possible, croyons-nous, d'établir une équation caractéristique du genre de celles indiquées ci-dessus.

Dans le même ordre d'idées, nous voudrions citer les résultats d'une belle étude due à T. Frazer, R. L. Sutherland et F. F. Giese (XVI).

Les auteurs travaillaient sur l'installation de la mine Shamrock à Kayford (West Virginia, U.S.A.). Un cyclone de 350 mm y traite des eaux schlammeuses tenant de 6 à 15 % de solides.

Le but de l'étude était de déterminer le diamètre minimum des particules pouvant être récupérées à l'underflow. Bien que les débits volumétriques n'aient pas été notés systématiquement, on peut en calculer le rapport en fonction des teneurs en solide par la formule :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{x_0 - x_2}{x_1 - x_0} \cdot \frac{1 - x_1 \frac{\delta - 1}{\delta}}{1 - x_2 \frac{\delta - 1}{\delta}}$$

Ce calcul permet de dessiner le diagramme de la figure 6 bis, représentation en tout point semblable à la nôtre.

Les constantes de la droite ne sont pas les mêmes, mais la loi parabolique semble se maintenir.

Nous avons représenté à la figure suivante (Figure 7) le rapport des débits pondéraux en fonction de la densité d_0 pour différents rapports de D_1/D_2 . L'allure de ces courbes est toujours identique, la

courbe commence à croître linéairement, passe par un maximum et diminue ensuite.

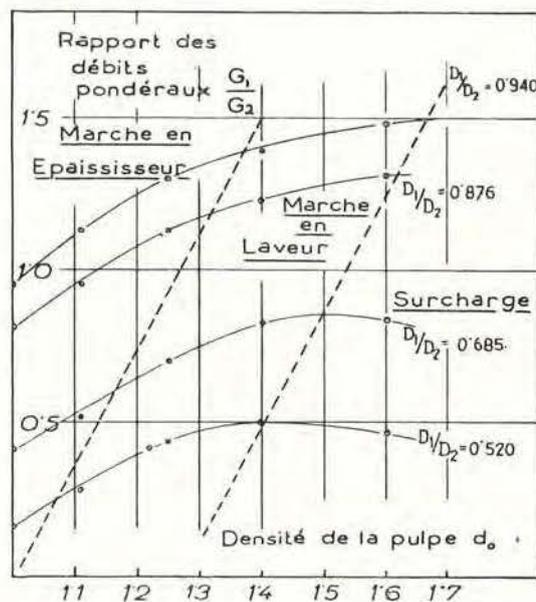


Fig. 7. — Variation du rapport des débits pondéraux.

La position du maximum dépend du rapport des orifices.

Tous nos essais furent faits à la pression d'injection de 1,6 kg/cm², le volume du réservoir d'air comprimé de notre installation ne permettant pas de faire des essais systématiques dans une gamme de pression suffisamment grande. Nous croyons — sans toutefois pouvoir apporter de démonstration définitive — que le rapport des débits volumétriques est quasi indépendant de la pression d'injection.

Au cours de différents essais de lavage des charbons, l'examen des produits de l'underflow nous conduisit à différentes représentations essentielles quant au fonctionnement du cyclone.

La figure 8 montre la variation de la densité de l'underflow en fonction de D_1/D_2 , pour différentes

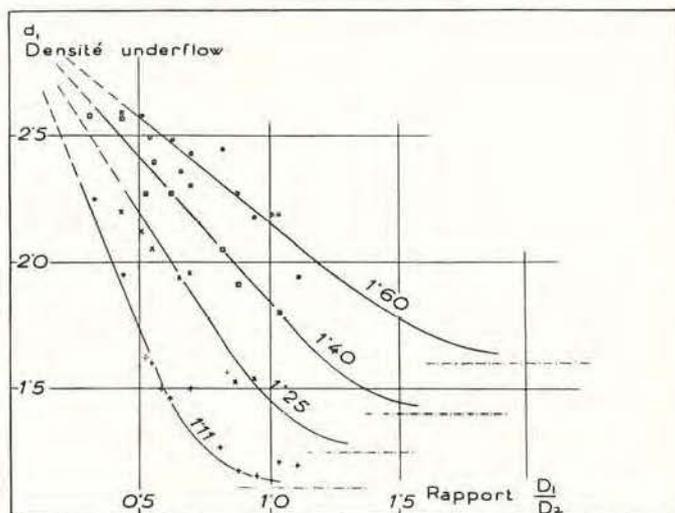


Fig. 8. — Variation de la densité de l'underflow avec le rapport des diamètres des orifices et la densité du médium injecté.

valeurs de d_o . La variation de d_1 est d'autant plus rapide que d_o est plus réduite; pour des valeurs basses de D_1/D_2 , d_1 tend vers une constante qui peut être prise égale à d_M définie plus haut. Si D_1/D_2 est suffisamment élevé, d_1 tend vers d_o .

L'interprétation mathématique des courbes précédentes est facile. Si le diamètre de la pointe est assez grand, l'overflow ne contient plus que de l'eau, c'est-à-dire que le cyclone travaille avec un rendement d'épaississement de 100 %.

Dans ces conditions, les deux équations, vérifiées à priori :

$$\begin{aligned} Q_1 \cdot d_1 + Q_2 \cdot d_2 &= Q_o \cdot d_o \\ Q_1 + Q_2 &= Q_o \end{aligned}$$

combinées à l'équation expérimentale (6), permettent d'écrire :

$$d_1 = d_o + (d_o - 1) \left(\frac{\alpha D_2}{D_1} \right)^3 \quad (7)$$

Conformément aux expériences faites et représentées ci-dessus, nous poserons que, pour les petites valeurs de D_1/D_2 , d_1 varie linéairement en décroissant à partir de d_M .

Comme équation représentative, nous choisirons la droite, issue du point $(0, d_M)$ et tangente à la courbe (7) en un point que nous appellerons point critique.

$$\left(\frac{D_1}{D_2} \right)_{cr} = \alpha \left[\frac{4 (d_o - 1)}{d_M - d_o} \right]^{1/3} \quad (8)$$

$$d_1 = d_M - f(d_o) \frac{D_1}{\alpha D_2}$$

avec $f(d_o)$ fonction de d_o seule

$$f(d_o) = 3 (d_o - 1) \cdot \left[\frac{d_M - d_o}{4 (d_o - 1)} \right]^{3/4} \quad (9)$$

Nous verrons plus loin l'utilité de ces formules pour le réglage du cyclone laveur.

Forme de la courbe de partage et conséquences à en tirer au point de vue du réglage.

Nous indiquons, dans le tableau ci-après, les caractéristiques d'un essai effectué avec un produit des Charbonnages de Marihay.

Essai 1.

Dilution du charbon en poids	10 %
Densité de la pulpe à l'injection	...	1,5 kg/l
Rapport des diamètres D_1/D_2	= ...	0,695
Pression d'injection	1,6 kg/cm ²
Rendement pondéral en lavé	70 %
Granulométrie du produit brut	...	1,50 à 0,10 mm

Tableau des résultats pour les grains de 1,50 à 0,52 mm.

Dens.	Lavé %	Lavé % brut	Schiste %	Schiste % brut	Brut rec.	Brut réel	u
1,30	52,60	22,80			22,80	22,20	0
1,40	50,40	35,30			35,30	30,60	0
1,50	9,14	6,59	0,20	0,09	6,48	5,42	1,59
1,60	5,57	5,76	0,49	0,15	5,91	5,70	5,84
1,70	2,17	1,52	1,63	0,49	2,01	3,02	24,40
1,80	0,48	0,54	6,87	2,06	2,40	2,50	86,00
1,90	0,07	0,04	11,55	5,46	5,51	1,92	98,70
2,00			9,55	2,80	2,80	2,28	100.—
2,10			15,72	4,72	4,72	4,10	
			55,80	16,15	16,15	15,50	

La courbe de partage, construite à partir de ces chiffres, montre que l'épuration est très bien faite (Fig. 9, courbe A). Si l'on dispose, en ordonnées, les valeurs de la fonction de Gauss, la courbe précédente s'anamorphose en une droite.

de dimensions 0,50 à 0,28 mm (courbe B). Les deux courbes représentatives sont à peu près confondues.

Essais II et III (Charbons d'Hensies-Pommerœul).

Dilution du charbon en poids 7 %

Densité de la pulpe à l'injection ... 1,5 kg/l

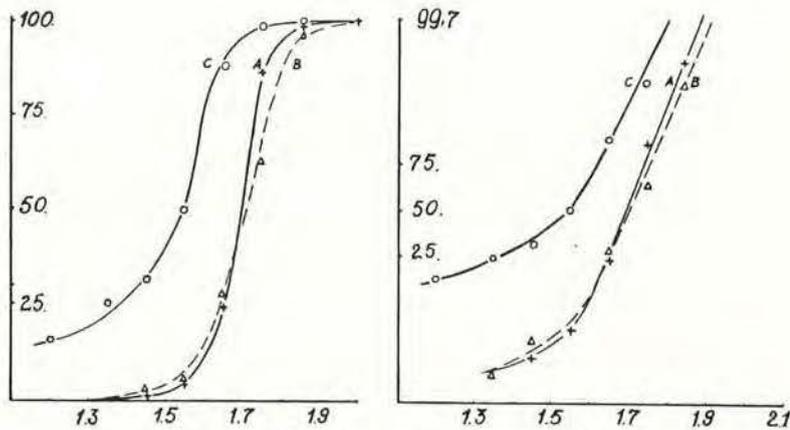


Fig. 9. — Courbes de partage (charbons de Marihay).

Cette anamorphose permet de lire avec précision les valeurs des coefficients caractéristiques :

$$d_p = 1,695$$

$$E_{pm} = 0,038.$$

A titre indicatif, nous donnons encore sur la même figure la courbe de partage pour le charbon

Rapport des diamètres $D_1/D_2 = \dots 0,955$

Pressions d'injection :

(Essai II) 1,2 kg/cm²
 (Essai III) 1,8 kg/cm²

Rendements pondéraux en lavés ... 67 à 68 %

Granulométrie du produit brut ... 1,50 à 0,10 mm

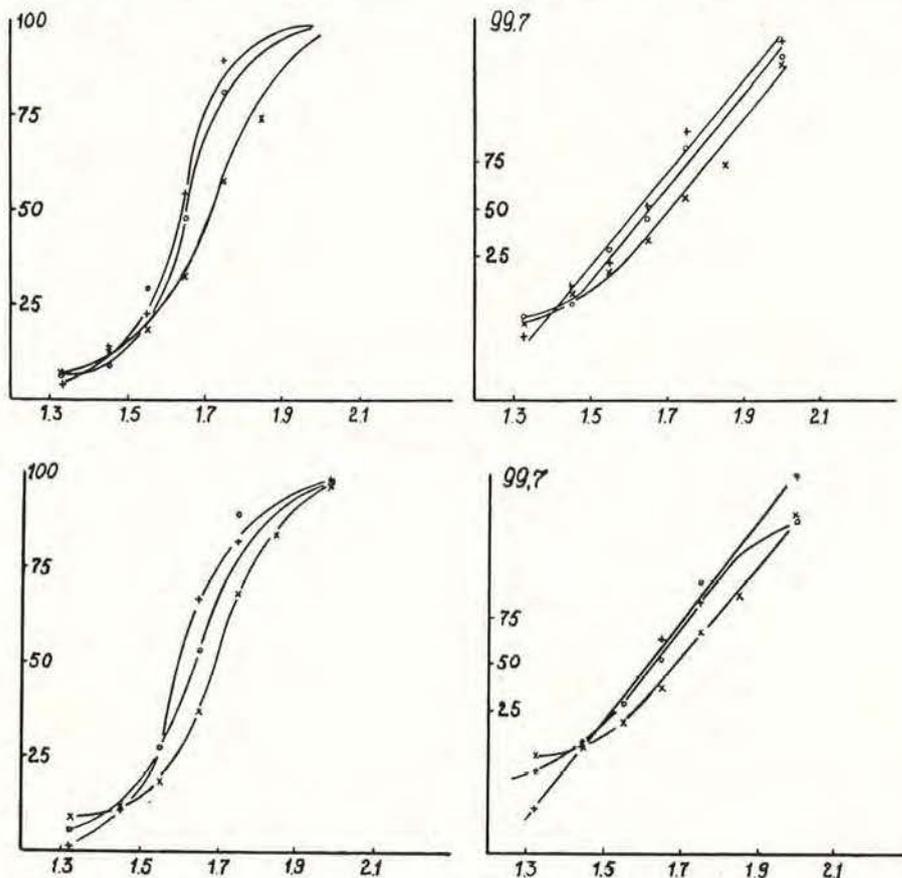


Fig. 10 et 11. — Courbes de partage (charbons d'Hensies Pommerœul).

+ Catégorie 0,52 à 1,50 mm; ○ Catégorie 0,28 à 0,52 mm; × Catégorie 0,12 à 0,28 mm.

Les calculs ne sont pas détaillés ici, mais nous indiquons aux figures 10 et 11 les courbes de partage et les courbes anamorphosées représentant ces essais; on constate que le lavage reste effectif jusqu'à des dimensions de l'ordre de 0,10 mm, soit avec un rapport de criblage de 15.

La forme des courbes de partage donne de précieuses indications sur la valeur des essais et sur la façon dont il faut régler le cyclone pour améliorer les résultats.

La courbe C de la figure 9 est relative à un essai assez mauvais: la comparaison avec la courbe de partage correcte montre qu'une trop grande partie du charbon a été entraînée dans les schistes. Le remède consiste à augmenter le diamètre du diaphragme.

La question sera reprise au paragraphe traitant de l'influence du réglage des ouvertures sur les rendements.

Variation de la densité de partage et de l'écart probable avec le rapport D_1/D_2 .

Il est parfaitement justifié de prendre les coefficients d_p et E_{pm} comme variables fondamentales pour notre étude.

Rappelons en effet que les courbes de partage ne dépendent pas du charbon traité, si elles sont bien normales ou logarithmico-normales; donc, chaque fois qu'un essai de lavage a été bien mené, ces paramètres sont univoques pour en représenter les résultats. Les rendements pondéraux, par exemple, varieront pour des charbons différents traités à la même densité de partage.

Pour comprendre le fonctionnement du cyclone laveur, il faut tenir compte de deux phénomènes dont la composition donne la clef du réglage de l'appareil:

- 1) Le lit de magnétite sépare le produit brut en deux fractions comme dans un bac statique; le

schiste tend à gagner la paroi du cyclone et le charbon se dirige vers l'axe.

- 2) Le choix des ouvertures règle les débits de matière s'écoulant par l'underflow et l'overflow.

Le réglage parfait consiste à permettre la sortie par le diaphragme de tout le produit lavé; les remarques précédentes nous feront comprendre que, si l'on fait varier le rapport D_1/D_2 de façon continue, on se trouvera successivement dans trois zones:

- a) D_1/D_2 petit. Le débit de l'underflow est trop faible pour entraîner tout le schiste préparé dans le lit de magnétite; la densité de partage est anormalement élevée et l'écart probable, inacceptable. Lavage mal fait.
- b) D_1/D_2 moyen. Le rapport des débits est tel que l'évacuation des charbons et des schistes se fait avec précision et sans égarés; la densité de partage et l'écart probable sont acceptables et le lavage, bien fait.
- c) D_1/D_2 grand. Le débit de l'overflow est trop réduit pour éliminer le charbon préparé dans le lit de magnétite; la densité de partage est anormalement basse et l'écart probable, inacceptable. Lavage mal fait.

A la limite, il existe, nous l'avons vu, un rapport D_1/D_2 tel que, pour cette valeur, toute la matière solide se trouve rejetée dans l'underflow; dans ce cas, la densité de partage est égale à l'unité. Le cyclone marche en débourbeur et, comme aucun lavage n'a lieu, nous poserons que l'écart probable est infini. Cette convention est justifiée par le fait que l'écart probable croît d'une façon continue, dès que l'on se rapproche du rapport critique.

Les deux figures 12 et 13 donnent le résultat d'essais faits sur un grand nombre de charbons; elles permettent de tirer les conclusions suivantes:

- 1) Plus la densité du médium utilisé diminue, plus le domaine de réglage de D_1/D_2 diminue également.
- 2) Le fonctionnement devient instable dès que l'on se rapproche du rapport critique des orifices, la courbe des densités de partage étant quasi verticale.

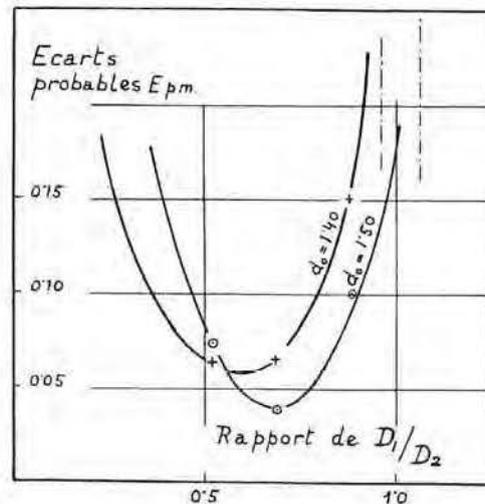
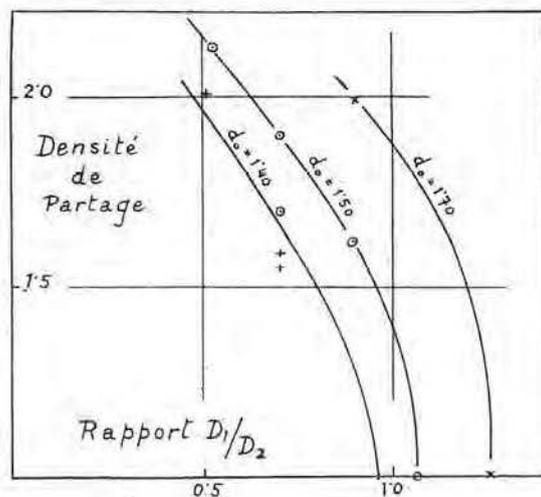


Fig. 12 et 13. — Variation de la densité de partage et de l'écart probable avec le rapport des orifices.

5) L'écart probable minimum est donné par un rapport D_1/D_2 , valant environ 0,7 fois la valeur critique.

Influence de la nature du médium.

La formule déjà utilisée (8) va nous permettre de tirer une conclusion importante pour la comparaison des médiums; nous l'avons traduite en diagramme à la figure 14.

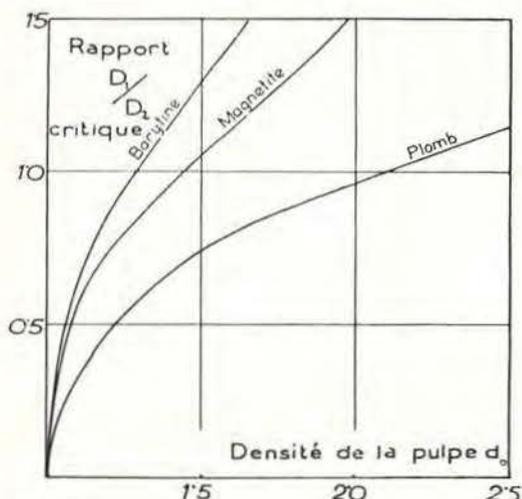


Fig. 14. — Influence de la nature du médium.

Le réglage du cyclone en appareil laveur implique, nous l'avons vu, que le rapport des diamètres reste compris entre 0 et une valeur critique qui dépend de d_p et de d_M , donc de la nature du médium utilisé. Le diagramme montre que la zone de réglage est plus resserrée pour un médium au plomb ou à la magnétite que pour un médium à la barytine.

Les techniciens français préconisent une densité d_p d'environ 1,45 et un rapport des orifices de 1; notre graphique montre qu'il nous est impossible de travailler dans les mêmes conditions car nous tombons au delà du point critique.

La marche de notre cyclone devra donc être conduite en tolérant un certain épaissement du médium parallèlement au lavage. Les diagrammes 12 et 13 montrent d'ailleurs que l'écart probable reste encore acceptable si la différence $d_p - d_o$ atteint 0,5.

CONCLUSIONS

Comme nous l'écrivions au début de cet article, nous n'avons pas la prétention d'extrapoler à toutes les installations expérimentales existantes, les résultats consignés ci-dessus; mais, nous pensons qu'il faut du moins attirer l'attention sur les trois points suivants :

1 — Les réglages du cyclone font apparaître l'existence d'une loi des débits de la forme :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = k \cdot \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^x$$

les coefficients k et x pouvant être considérés comme des constantes, dans notre cas.

2. — A partir de cette équation, il est possible de définir des éléments critiques et, notamment, un rapport $(D_1/D_2)_{cr}$ qui fixe le début de la marche du cyclone en épaisseur. Cette valeur dépend de la loi du 1. —

3. — La clef du fonctionnement du cyclone en laveur, pour des rapports d'ouvertures compris entre 0 et $(D_1/D_2)_{cr}$, est donnée par des graphiques analogues à ceux repris aux figures 12 et 13, et qui sont fondamentaux pour prédire les résultats d'un essai.

Ces diagrammes peuvent être considérés comme de véritables courbes caractéristiques du cyclone, et une étude complète doit avoir pour but de les relever avec précision.

Notations utilisées.

- α Coefficient de contraction $\alpha = 0,96$.
- γ Accélération due à la force centrifuge

$$= \frac{v^2}{r}$$
- d Densité apparente des pulpes en kg/litre.
- δ Densité du matériau utilisé pour faire des pulpes.
- d_p Densité de partage.
- D Diamètre de la pointe (D_1) ou du diaphragme (D_2), du cyclone.
- E_{pm} Écart probable moyen en kg/litre.
- G Débits pondéraux en kg/sec.
- η Viscosité apparente d'une pulpe dense.
- I Imperfection de lavage $I = \frac{E_{pm}}{d_p - 1}$ (convention Cerchar).
- k Constante — constante d'homothétie de 2 cyclones.
- L Rendement pondéral en lavé (en %). Lavage réel à c % de cendres.
- L' Idem, Lavage parfait qui donnerait aussi c % de cendres.
- Q Débit volumétrique en litres/sec.
- r Rayon quelconque dans le cyclone.
- S Surface de Tromp.
- u Ordonnée de la courbe de partage.
- v Vitesse d'une particule au rayon r du cyclone.
- x Teneur en solide des pulpes (en % en poids).
- X Teneur en solide des pulpes (en % en volume).

Indices.

- o Caractérise l'injection au cyclone.
- 1 » la pointe du cyclone.
- 2 » le diaphragme du cyclone.
- cr » les éléments critiques du cyclone.

BIBLIOGRAPHIE

- i. M. G. Driessen. — Un nouveau progrès dans le lavage des charbons par liqeurs denses. - Revue Universelle des Mines, Mai 1939.
- ii. M. G. Driessen. — The Use of Centrifugal Forces for Cleaning Fine Coal. - Journal of the Institute of Fuel, Dec. 1945.
- iii. M. G. Driessen. — The Use of Hydraulic Cyclones as Thickeners and Washers in Modern Coal Preparation. - A.I.M.E. Techn. publication, N° 2135.
- iv. M. G. Driessen. — Recent Developments in Coal Washing. - Fuel Economy Conference, Section A₂, N° 6.
- v. M. G. Driessen. — Théorie de l'écoulement dans un cyclone. - Conférence Internationale de Paris sur la préparation des Charbons.
- vi. J. M. Dalla Valle. — Micromeritics. - Pitman, New York.
- vii. F. D. De Vaney and S. M. Shelton. — Properties of Suspensions Medium for Float and Sink Concentration. - U. S. Bureau of Mines, R.I. 5469, May 1940.
- viii. K. F. Tromp. — Neue Wege für die Beurteilung der Aufbereitung von Steinkohlen. - Glückauf 1937.
- ix. A. Terra. — Essai d'une théorie de lavage. — Revue Industrie Minérale, Novembre 1938, page 585.
- x. A. Terra. — Détermination pratique de l'écart probable en densité, caractéristique de la qualité du lavage. - Revue de l'Industrie Minérale, Novembre 1939, p. 409.
- xi. P. Belugou. — Représentation pratique des résultats d'une épuration des charbons. - Cerchar. Note technique, n° 49/4, juin 1949.
- xii. Inchar. — Compte rendu de la Conférence de Paris sur la préparation des charbons. - Annales des Mines de Belgique, Sept. 1950.
- xiii. P. Belugou. — Etude du fonctionnement du cyclone épurateur. - Cerchar. Note technique N° 48/11, Décembre 1948.
- xiv. P. Belugou et S. de Chawłowski. — Etude expérimentale du cyclone épurateur. - Conf. Int. de Paris sur la préparation des charbons, E₉.
- xv. G. Burton. — Comportement des charbons fins lors des traitements au cyclone épaisseur ou séparateur. - Ibidem, E₇.
- xvi. T. Frazer, R. L. Sutherland et F. F. Giese. — Performance Tests of an Experimental Installation of Cyclone Thickeners at the Shamrock Mine. - Mining Engineering, Dec. 1949, page 439.
- xvii. P. J. Van der Walt. — A study of the application of the Cyclone Washer and its application to Witbank fine coal. - Journal of the Chemical Metallurgical and Mining Society of South Africa, August 1950, p. 19.