

Transport hydraulique des matériaux solides en conduite

Études expérimentales
pour les cendres de la centrale Arrighi

The hydraulic transportation of solids in pipes :
Experimental studies for the Arrighi power plant ash

PAR R. DURAND

INGÉNIEUR AUX ÉTABLISSEMENTS NEYRPIC

English synopsis, p. 354.

On utilise fréquemment des installations permettant le transport hydraulique de matériaux solides pour les dragages, le remblayage des mines, le transport de déblais ou de minerais.

Généralement, les matériaux sont aspirés par une pompe après mélange avec de l'eau et refoulés dans une conduite en charge. De telles installations posent toute une série de problèmes délicats très divers, que nous n'aborderons pas dans notre exposé. Nous n'examinerons ici que les conditions d'écoulement des mixtures dans des conduites horizontales et de section circulaire.

Devant la difficulté d'interprétation des mesures faites sur des conduites industrielles, il a paru nécessaire d'entreprendre des études sur modèle. Depuis le début du siècle, de tels essais ont été effectués par divers expérimentateurs, en particulier Miss BLATCH, GREGORY, HOWARD, O'BRIEN et FOLSON, SIEGFRIED. Nous avons nous-mêmes étudié au Laboratoire des Établisse-

ments Neyrpic, depuis 1948, le transport hydraulique en conduite de nombreux matériaux (schlamm, fines, graviers, galets, suies).

Pour limiter notre sujet, nous parlerons ici spécialement des essais relatifs au transport des suies de la centrale Arrighi, effectués pour le compte du Groupe de Production Thermique de la Région Parisienne de l'E.D.F.

Il s'agissait de refouler dans un champ d'épandage les eaux des dépoussiéreurs hydrauliques de fumées de cette centrale. Le débit à évacuer par la conduite était variable avec le nombre de chaudières et de dépoussiéreurs en service. Il importait donc de choisir aussi exactement que possible la vitesse minima de refoulement correspondant à une seule unité.

Si cette vitesse est prise trop faible, on risque des obstructions. Si elle est prise trop forte, la puissance demandée aux pompes risque d'être inutilement majorée dans une proportion importante lorsque toutes les chaudières fonctionnent.

Parallèlement, l'installation de pompage doit alors être surdimensionnée et les vitesses périphériques des roues augmentées, d'où accroissement des phénomènes d'usure.

Il fut décidé de rechercher la vitesse minima admissible par des essais sur une installation de laboratoire en circuit fermé, à échelle grandeur, avec des cendres provenant de la centrale elle-même.

La concentration initialement envisagée était de 40 gr/l. Par la suite, les essais ont été poursuivis jusqu'à 300 gr/l.

Le problème de la stabilité des dépôts dans les conduites inclinées en cas de déclenchement accidentel, et celui du pouvoir abrasif des cendres ont également été examinés, mais ne seront pas abordés ici.

Il faut préciser que cette étude a été effectuée dans un but pratique bien déterminé; elle a cependant permis de dégager quelques remarques intéressantes de caractère plus général.

Avant d'exposer ces résultats, il nous a paru utile d'indiquer quelques précisions sur l'utilisation et la validité des modèles de laboratoire pour de telles études et de rappeler les notions de concentration de transport et de concentration spatiale.

I. — Validité des essais sur modèle et notions de concentration

Le but d'une étude systématique sur modèle des conditions de refoulement hydraulique d'un matériau est d'essayer de dégager les lois qui relient les grandeurs caractéristiques de l'écoulement (diamètre de la conduite, débit, pertes de charge, concentration) aux grandeurs caractéristiques du matériau, mesurables grâce à des essais physiques simples. Une étude préliminaire de ces caractéristiques physiques est donc nécessaire. Nous considérons habituellement :

- les dimensions et la forme des grains,
- leur densité absolue,
- la densité apparente et l'indice de vide des dépôts pour divers tassements,
- les vitesses d'entraînement,
- la vitesse de chute pour des particules isolées et le coefficient de traînée.

Par ailleurs, il y a intérêt à opérer avec méthode et à utiliser systématiquement des matériaux tamisés. Mais ce triage est également nécessaire de par la conception des modèles. En effet, pour éviter des frais de préparation et de manutention des matériaux prohibitifs, on est obligé,

en laboratoire, d'opérer en circuit fermé, alors que les installations réelles sont évidemment en circuit ouvert, puisque leur but est de transporter des déblais.

Considérons alors, par exemple, un matériau fin aisément transporté en suspension à une vitesse donnée, dans une tuyauterie. Introduisons en faible pourcentage un matériau plus gros qui, à la même vitesse, soit difficilement transporté et demeure en dépôt ou en charriage. Dans un modèle en circuit fermé, le dépôt de gros grains restera de peu d'importance. Mais en circuit ouvert, on injectera constamment à l'entrée ces matériaux; ils finiront par s'accumuler à la longue dans la conduite et par modifier complètement le régime de l'écoulement. Il s'agit là d'un exemple-type. Pour un matériau à granulométrie étendue, l'analyse d'un prélèvement effectué à la sortie montrera une variation continue de la composition avec la vitesse. Il devient donc impossible de travailler de façon précise avec un produit non trié.

La granulométrie des cendres étudiées était comprise entre 2 et 100 μ . Un triage aurait donc été nécessaire. Il n'a malheureusement pu être effectué, car il aurait entraîné des frais de préparation des produits trop considérables, en multipliant par ailleurs le nombre des essais. Nous verrons par la suite que malgré le soin apporté aux mesures, c'est cette absence de triage qui enlève tout caractère précis aux conclusions théoriques déduites de ces essais. C'est pourquoi nous devons reprendre prochainement des expériences avec des sables fins soigneusement tamisés dans le cadre d'une étude générale en cours pour les Ponts et Chaussées de Nantes.

NOTIONS DE CONCENTRATION

Deux concentrations peuvent être définies, dont le rapport constitue un paramètre fondamental pour les études d'écoulement de mixtures en conduites.

a) *Concentration de transport*. — La concentration de transport, que nous désignerons par C_T , est celle de la mixture recueillie à la sortie de l'installation. C'est elle qui intéresse directement l'exploitant et que l'on considère d'ordinaire quand on ne précise pas davantage. Elle est obtenue par prélèvements.

Nous l'exprimerons en grammes par litre. C'est alors le rapport du débit solide de produit séché au débit total de mixture.

b) *Concentration spatiale*. — Considérons un cas-limite qui nous permettra de mieux saisir d'emblée cette notion.

Soit une conduite partiellement remplie par

un dépôt uniforme de matériaux. Si la vitesse de l'eau dans la conduite est insuffisante pour entraîner ces matériaux, il est évident que la concentration de transport sera nulle. Et cependant, pour un tronçon de conduite compris entre deux sections normales à l'axe, la concentration moyenne n'est pas nulle. Cette concentration, que nous appellerons concentration spatiale et que nous désignerons par C_s , peut encore être définie de la même façon si l'écoulement est capable d'entraîner les matériaux. Pour la matérialiser, il suffit de stopper brusquement l'écoulement et de laisser déposer les matériaux. C'est d'ailleurs la méthode de mesure la plus simple en laboratoire. Nous voyons aussi que la concentration spatiale en volume apparent représenterait exactement le pourcentage d'obstruction de la conduite en cas de disjonction brutale des pompes sur une installation de refoulement.

Nous exprimerons par la suite cette concentration en grammes par litre. Pour un matériau donné, la correspondance entre ces deux expressions de la concentration spatiale peut être facilement déterminée.

Nous n'avons, jusqu'à présent, envisagé qu'un cas limite simple où l'hétérogénéité de la mixture jouait pleinement puisque le fluide était incapable d'entraîner les éléments solides. Un autre cas limite intéressant est celui d'un écoulement à très grande vitesse. L'effet de la différence de densité entre les particules solides et le fluide tendra à devenir insensible; autrement dit, la vitesse moyenne de chute des particules dans le fluide deviendra négligeable par rapport à la vitesse moyenne de l'écoulement. Dans ce cas, la concentration de transport tend à s'identifier à la concentration spatiale. Leur rapport, que nous désignerons par α , tend vers l'unité.

Nous voyons que $0 < \alpha < 1$ pour une conduite horizontale.

Ces deux concentrations peuvent se définir mathématiquement d'une manière analogue à celle présentée par M. HALBRONN; ces considérations permettent de montrer que :

$$\alpha = \frac{C_T}{C_s} = \frac{V_m}{U}$$

avec V_m , vitesse moyenne des matériaux,

et U , vitesse moyenne de l'écoulement.

Le paramètre α caractérise ainsi un glissement moyen des matériaux par rapport au fluide.

Ce glissement moyen ne résulte pas forcément d'un glissement local des grains par rapport au fluide, comme c'est d'ailleurs le cas dans le premier exemple choisi.

Nous avons en effet établi que $\alpha = \frac{V_m}{U}$, en

supposant qu'il n'existait nulle part un tel glissement local.

Remarquons que α est proportionnel au rapport entre l'intégrale du produit $uc_s d\sigma$ et le produit des intégrales de $ud\sigma$ et $c_s d\sigma$, suivant la même aire Σ . Or, u et c_s varient différemment dans l'aire Σ . La vitesse u se distribue symétriquement par rapport à l'axe de la conduite. Par contre, si la conduite est horizontale, la concentration croît constamment depuis la génératrice supérieure jusqu'à la génératrice inférieure. Il n'est donc pas étonnant que l'intégrale du produit uc_s diffère du produit des intégrales des deux grandeurs u et c_s . On peut dire encore de façon plus intuitive que la région voisine de la génératrice inférieure étant une région de faible vitesse et de concentration maxima, les matériaux doivent, en moyenne, progresser plus lentement que l'eau.

En définitive, le glissement moyen des grains par rapport au fluide, caractérisé par le rapport α , peut avoir deux causes :

- la divergence entre les courbes de répartition des vitesses et des concentrations dans une section normale à l'axe de la conduite,
- un glissement local réel des grains par rapport au fluide.

UTILISATION DU PARAMÈTRE α

Si, connaissant C_T et C_s pour un écoulement de mixture en régime établi, on représente graphiquement la variation du rapport α en fonction de la vitesse moyenne, la courbe obtenue

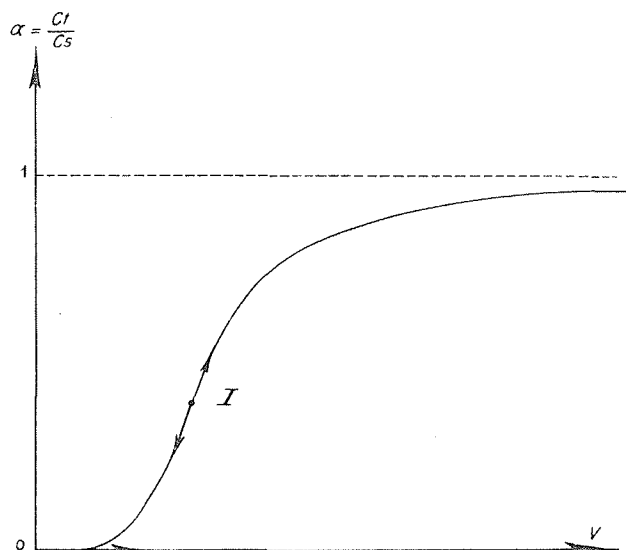


FIG. 1. — VARIATION DE α EN FONCTION DE LA VITESSE MOYENNE DE L'ÉCOULEMENT.

passera par l'origine et sera asymptote à la droite $\alpha = 1$ pour une vitesse infinie.

Plus précisément, si les grains ont des dimensions non nulles, c'est-à-dire si l'on peut définir une vitesse critique d'entraînement, cette courbe sera tangente à l'axe des abscisses vers l'origine (fig. 1).

Elle présentera donc nécessairement au moins une tangente d'inflexion. Considérons les points de fonctionnement de l'installation situés sur cette courbe au voisinage du point d'inflexion. Une faible diminution de la vitesse moyenne de l'écoulement entraînera une diminution importante de α , c'est-à-dire une tendance marquée à l'obstruction de la conduite. Les régimes correspondants seront donc à éviter.

On voit que la connaissance expérimentale de la courbe $\alpha = f(V)$ pour un matériau donné pourra fournir des indications précieuses sur la stabilité de l'écoulement aux différentes vitesses.

La distinction entre concentration de transport et concentration spatiale permet encore de se rendre clairement compte qu'une conduite de volume total V , transportant une mixture à la concentration C_T , contient davantage de matériaux que ce que l'on pourrait penser a priori, même s'il n'y a nulle part formation d'un dépôt immobile.

Le stockage apparent est $V \times C_T$ et le stockage

réel VC_S . Il y a donc en quelque sorte un sur-stockage égal à :

$$V(C_S - C_T) = V(1 - \alpha) C_S$$

Remarquons enfin que, s'il est aisé de définir la concentration spatiale dans une conduite ou dans un canal dont le fond et les berges sont constitués par des parois inaffouillables, il n'en est malheureusement pas de même pour la plupart des rivières naturelles. Le lit étant constitué généralement par une couche d'alluvions, il n'existe pas de niveau de référence absolu permettant de définir C_S . Les écoulements en conduite, forcement limités par les parois de l'installation, sont les seuls à pouvoir être systématiquement caractérisés par le paramètre α .

II. — Description de l'installation d'essais et des méthodes de mesure

L'installation est montée en circuit fermé. Elle comporte une tour de mélange d'une capacité de 8 m³ dans laquelle aspire une pompe spéciale à déblais de la maison Bergeron. Cette pompe refoule ensuite dans une tuyauterie de 253 mm de diamètre moyen comportant deux alignements droits horizontaux de 120 m de longueur chacun. La pompe est entraînée par un moteur Diesel qui permet de faire varier la vitesse de

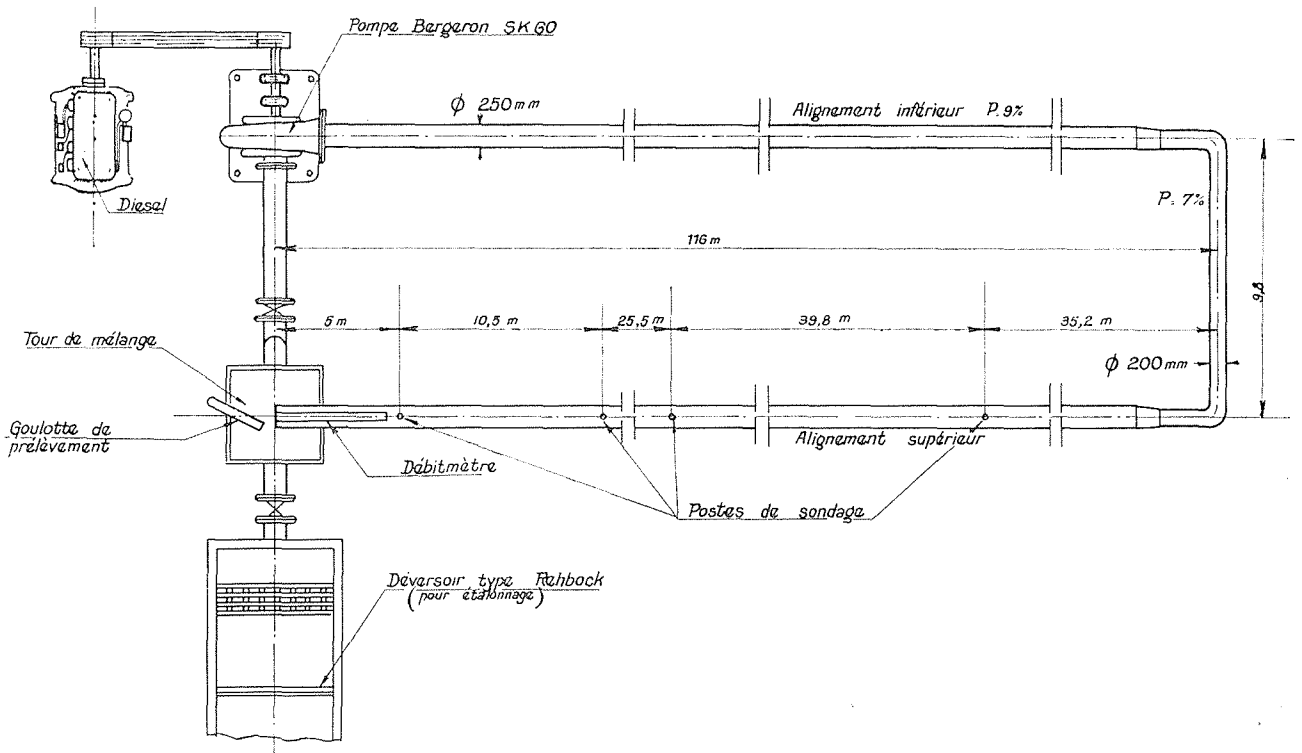


FIG. 2. — SCHÉMA DE L'INSTALLATION D'ESSAIS.

rotation de la pompe avec une stabilité suffisante (fig. 2).

MESURE DE DÉBIT

A l'extrémité aval de la conduite est installé un ajutage convergent en forme de sifflet. Un manomètre enregistreur peut suivre les indications d'une prise de pression. L'appareil est étalonné en eau claire grâce à un débitmètre du type Rehbock. Il y a lieu de tenir compte d'une correction de densité de la mixture, d'après la valeur de la concentration de transport.

MESURE DE LA CONCENTRATION DE TRANSPORT

Une goulotte mobile autour d'un axe vertical vient capter le jet qui sort du débitmètre pendant quelques instants. La mixture prélevée est recueillie dans une capacité jaugée. Après mesure du volume V de ce prélèvement, on filtre la mixture à travers un sac que l'on sèche ensuite à l'étuve à infra-rouges. Le poids P de matières séchées permet de connaître la concentration de transport en grammes par litre.

$$C_T = \frac{P}{V}$$

La mesure est systématiquement répétée trois fois pour chaque essai et la dispersion du résultat est faible.

MESURE DE LA CONCENTRATION SPATIALE

La concentration spatiale moyenne rapportée à l'ensemble de la section est mesurée directement par lecture de la hauteur du dépôt après stockage de l'écoulement. Le pourcentage d'obstruction de la conduite donne la concentration spatiale moyenne en volume apparent. Pour avoir la correspondance avec la concentration en poids, une étude complémentaire sur le tassement des dépôts de suies a été nécessaire. Cette étude a montré qu'au bout de vingt minutes la vitesse de tassement du dépôt devenait très faible et que sa concentration était alors de 535 gr/l.

La hauteur du dépôt fut donc mesurée vingt minutes après arrêt de l'installation grâce à l'immersion d'une pointe de mesure très simple, constituée par un fil de cuivre émaillé de bobinage de moteur, dénudé sur sa section terminale (voir fig. 3). Il suffit de mesurer la résistance de la sonde ainsi constituée par rapport à la masse avec un ohmmètre de série. Le champ étant centré au voisinage de l'extrémité du fil, la résistance varie brusquement au voisinage du dépôt et permet ainsi d'en apprécier la hauteur sans

perturbation en approchant doucement la sonde. La précision est alors celle du dispositif servant à la mesure du déplacement.

La concentration spatiale locale est mesurée grâce à des sondes électriques à plaques décrites dans l'article de M. HALBRONN. Ces sondes, mises au point pour l'étude du refoulement des mixtures, se sont avérées par la suite insuffisantes pour l'étude des émulsions air-eau. Le problème est alors beaucoup plus délicat à cause de l'écart énorme entre les masses spécifiques de l'air et de l'eau.

Au contraire, dans le cas de particules minérales solides en suspension, le principal ennui pro-

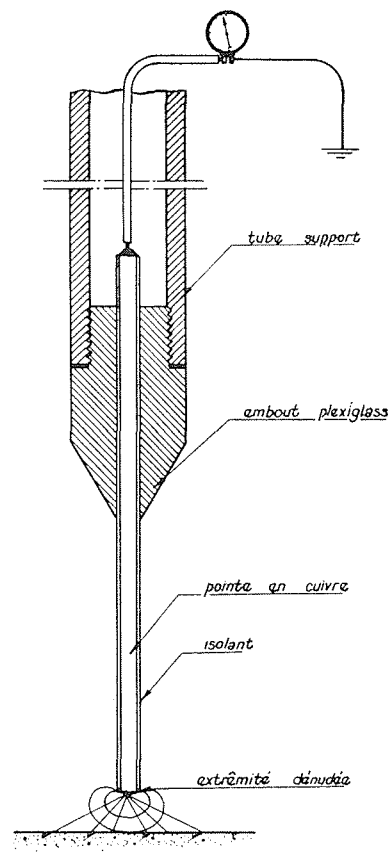


FIG. 3.

vient de la variation de la résistance R_0 de la sonde avec la teneur en sels dissous. Dans notre cas particulier, cette valeur est fonction de la concentration spatiale dans l'ensemble du modèle.

La résistance R_0 était mesurée pendant les temps d'arrêt nécessités par la mesure du dépôt. On a d'ailleurs constaté que R_0 variait peu d'un essai à l'autre.

Il était en outre nécessaire d'apprécier expérimentalement l'importance de la correction à apporter du fait de la distorsion des lignes de

champ au voisinage des particules isolantes en suspension. La correction de lord RAYLEIGH n'était pas directement applicable du fait que les particules ne sont pas de forme sphérique. Des essais complémentaires ont donc été effectués dans une cuve cubique en plexiglass dont deux parois opposées étaient recouvertes intérieurement par des électrodes en acier inoxydable. Cette cuve pouvait être agitée violemment par un procédé mécanique assurant la mise en suspension de la mixture. Une courbe d'étalonnage a ainsi pu être tracée.

Il faut encore remarquer que des particules de charbons ou de cendres se comportent comme un isolant dans l'eau chargée de sels minéraux dissous. Par contre, pour des particules métalliques, l'effet est contraire. D'ailleurs, les mesures électriques de concentration n'ont pu être effectuées pour la seconde tranche d'essais, car les cendres étudiées contenaient une trop forte proportion d'oxyde de fer. Ces particules étant de densité nettement plus grande, se répartissaient différemment suivant la verticale et auraient nécessité un prélèvement et une analyse chimique à chaque niveau.

MESURE DES PERTES DE CHARGE

Nous ne nous sommes pas spécialement attachés à la mesure des pertes de charge. Les résultats des mesures montrent simplement que, pour le matériau étudié aux vitesses considérées, on peut pratiquement adopter la loi classique, à savoir que les pertes de charge sont les mêmes qu'en eau claire, à condition de les exprimer en hauteur de mixture, la densité étant celle correspondant à la concentration de transport.

CONDUITE DES ESSAIS

On introduit dans l'installation une quantité donnée de produit. On fait ensuite varier le débit de l'installation et pour chaque valeur de la vitesse moyenne réalisée, on mesure la concentration de transport et on explore la variation de la concentration spatiale locale suivant un diamètre vertical de la partie horizontale de la conduite. Après ces mesures, on débraye brusquement le moteur Diesel, ce qui stoppe l'écoulement. Vingt minutes après, on effectue la mesure de la hauteur de dépôt. On obtient ainsi en première approximation des courbes à concentration spatiale moyenne constante, la variation du stockage de matériau dans la tour de mélange avec la vitesse étant faible.

Pour la détermination du rapport α pour chaque point d'essai, on a d'ailleurs utilisé la valeur expérimentale exacte de la concentration spa-

tiale déduite de la mesure de hauteur du dépôt.

Des enregistrements de la valeur de la concentration spatiale lue à la sonde électrique nous ont montré qu'après une remise en route il fallait attendre environ un quart d'heure pour stabiliser le débit solide de l'installation. On observe au début des variations importantes dues à la remise en suspension du dépôt formé à l'arrêt dans la tour de mélange. En fait, le temps nécessaire à la stabilisation de l'écoulement est fonction de la vitesse. Il y aurait d'ailleurs, sur ce sujet, matière à de nombreuses recherches dans l'esprit de la communication à l'AIRH de M. CRAYA en 1949.

III. — Caractéristiques du matériau étudié

Il y a lieu de remarquer tout d'abord que les essais ont été effectués en deux périodes distinctes avec des produits provenant du champ d'épandage des cendres d'Arrighi, produits en principe identiques, mais en fait différents.

Les densités absolues moyennes mesurées au pichnomètre étaient respectivement de 1,90 et de 2,27.

Cette différence s'explique par une variation de la teneur en oxyde de fer de 20 % à 36,5 %.

Corrélativement, le temps nécessaire à l'obtention d'un dépôt relativement stabilisé passait de 20 à 40 minutes.

Des essais d'immersion du produit dans un mélange de bromoforme et d'alcool montraient qu'une proportion en poids importante du produit avait une densité supérieure à 2,5.

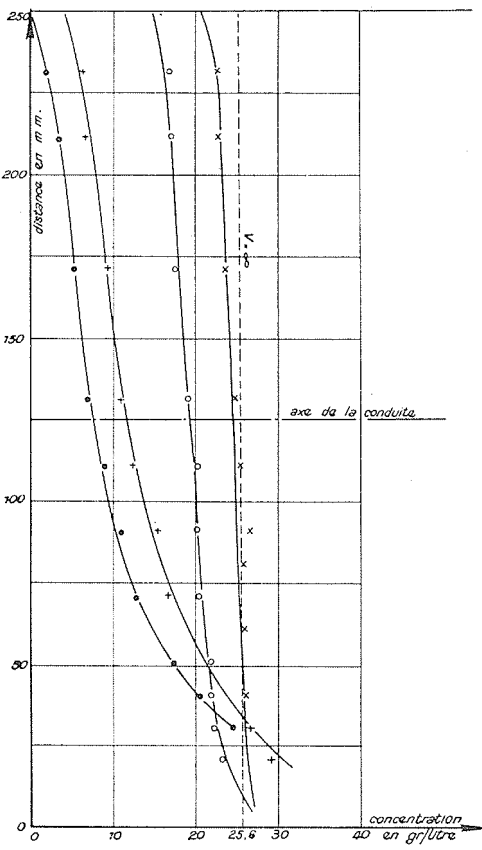
Les dimensions des particules de cendres déduites d'observation au microscope se situaient entre 2 et 100 microns. L'Electricité de France nous avait indiqué une dimension moyenne de 50 microns d'après des analyses antérieures. Des particules de cette dimension et de cette densité doivent, au point de vue vitesse de chute dans l'eau, suivre la loi de STOKES. Des essais de vitesse de chute nous ont montré que la valeur de 50 μ semblait constituer une valeur moyenne.

IV. — Résultats d'essais

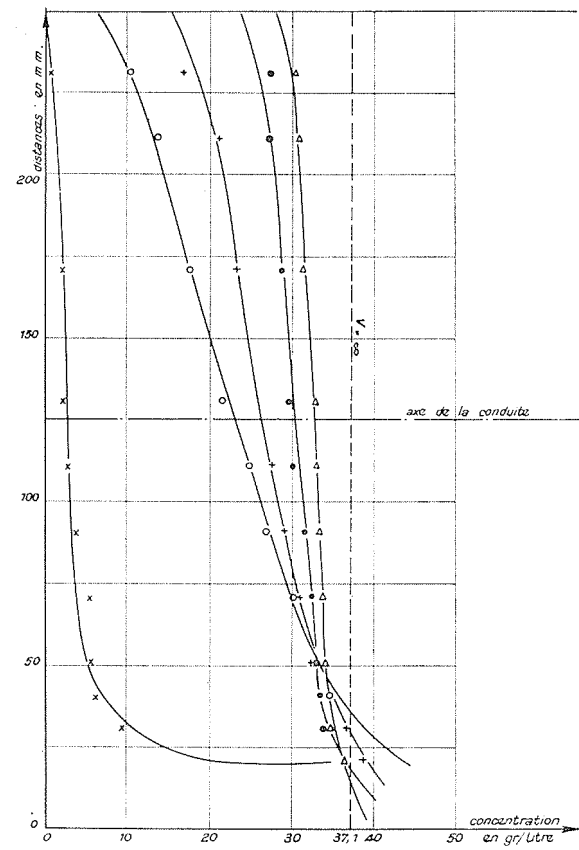
La figure 4 donne les variations de concentration spatiale suivant un diamètre vertical pour différentes vitesses.

Nous rappellerons brièvement qu'en supposant, suivant SCHMIDT, O'BRIEN et ROUSE :

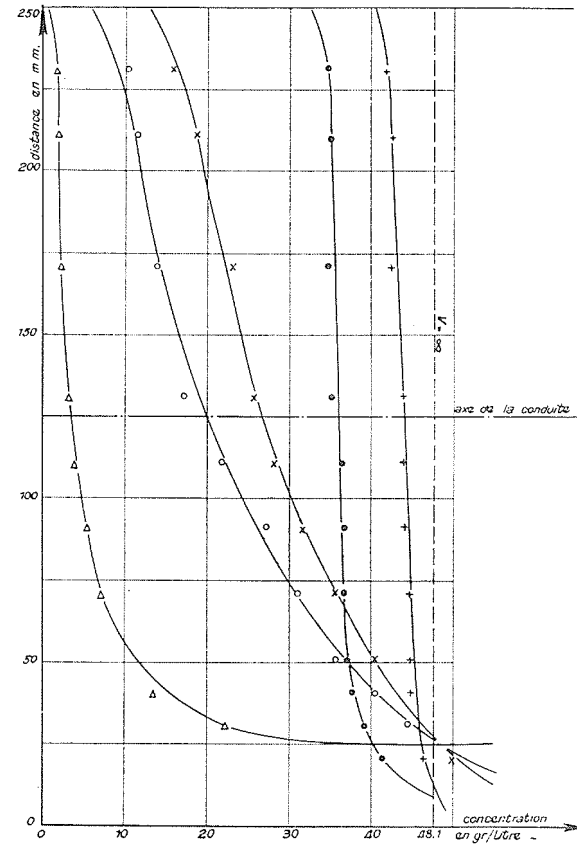
1° Que l'écoulement est à deux dimensions,



1^{ère} SERIE D'ESSAIS
 Concentration spatiale moyenne 25,6
 Valeur de la vitesse
 x - V = 1,84
 o - V = 1,00
 + - V = 0,40
 ● - V = 0,28



2^{ème} SERIE D'ESSAIS
 Concentration spatiale moyenne 37,1
 Valeur de la vitesse
 Δ - V = 1,88
 ● - V = 1,02
 + - V = 0,60
 o - V = 0,35
 x - V = 0,16



3^{ème} SERIE D'ESSAIS
 Concentration spatiale moyenne 48,1
 Valeur de la vitesse
 + - V = 2,52
 ● - V = 1,43
 x - V = 0,45
 o - V = 0,29
 Δ - V = 0,177

FIG. 4

Répartition des concentrations suivant un diamètre vertical

2° Que le coefficient de diffusion des matières en suspension ε_s est égal au coefficient de transport des quantités de mouvement ε_m de BOUSSINESQ,

3° Que la distribution des vitesses suit une loi logarithmique suivant les considérations de VON KARMAN,

la répartition des concentrations C suivant l'altitude y dans un canal de hauteur D, en fonction de la valeur C_a de la concentration à la distance a du fond est la suivante :

$$\frac{C}{C_a} = \frac{\left(\frac{D}{y} - 1\right)^z}{\left(\frac{D}{a} - 1\right)^z} \quad (1)$$

avec :

$$Z = \frac{WC}{KV\sqrt{g}}$$

où :

W est la vitesse de chute de particules dans l'eau,

C le coefficient de CHEZY,

V la vitesse moyenne de l'écoulement,

K la constante universelle de VON KARMAN qui a, en première approximation, la valeur de 0,4.

M. DANIEL, dans une première communication à l'A.I.R.H., admettait l'application de cette formule au cas des conduites. M. CARRY, reprenant les calculs de MM. SAUVAGE de SAINT-MARC et TIMAR, donnaient les équations exactes dans ce cas particulier. Malheureusement, une incertitude demeure, celle de la loi de variation du coefficient ε suivant un diamètre dans une conduite.

C'est pourquoi, étant donné par ailleurs l'imprécision de nos essais due à l'hétérogénéité du produit étudié, nous nous sommes contentés de la relation simple ci-dessus.

On peut remarquer, comme VANONI, qu'en coordonnées logarithmiques, cette relation devient :

$$\log C = Z \log \left(\frac{D}{y} - 1 \right) + \text{Cste} \quad (2)$$

En portant en coordonnées logarithmiques C en fonction de $\left(\frac{D}{y} - 1\right)$, on doit donc obtenir des droites de pente égale à Z. C'est bien ce que montre la figure 5 pour les mesures correspondant à des vitesses moyennes supérieures à 0,40 m/s, ce qui confirme la validité d'une formule du type de l'équation (1). La pente Z_1 de

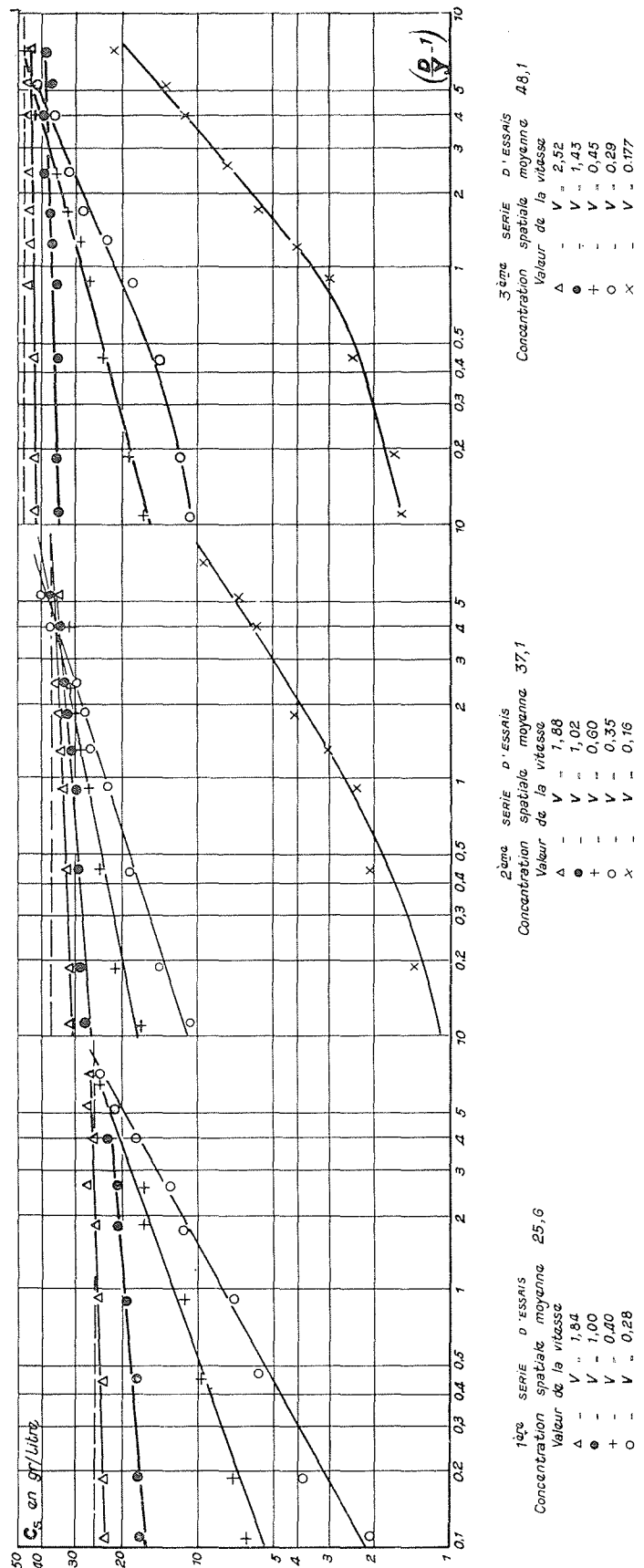


Fig. 5. — RÉPARTITION DES CONCENTRATIONS EN COORDONNÉES LOGARITHMIQUES

$$\log C = Z \log \left(\frac{D}{y} - 1 \right) + \text{Const.}$$

ces droites donne une valeur expérimentale de que l'on peut comparer à la valeur théorique Z_0 calculée en admettant que la vitesse de chute W est celle des particules de densité absolue 1,9 et de diamètre 50μ auxquelles la loi de STOKES est applicable, et que le coefficient de perte de charge λ a pour valeur, d'après des essais en eau claire = 0,017, à la vitesse de 1 m/s.

On peut alors admettre que :

$$Z_0 = \frac{7,07 W}{V\sqrt{\lambda}}$$

La figure n° 6 donne la variation de $\frac{Z_1}{Z_0}$ en

fonction de la vitesse moyenne V . On voit que, pour des vitesses supérieures à 1,4 m/s, la valeur de $\frac{Z_1}{Z_0}$ est voisine de 1. En admettant que la valeur de la constante de VON KARMAN est de 0,4 (valeur qui, d'après certains auteurs, semble exacte à seulement 5 % près), il semble, d'après la figure 6, que le diamètre moyen des particules de cendres d'ARRIGHI soit de 52μ au lieu de 50μ . Bien entendu, ce chiffre n'est indiqué que pour donner une idée de la valeur du recouplement obtenu. Pour des vitesses inférieures à 1,4 m/s, $\frac{Z_1}{Z_0}$ augmente et pour des vitesses inférieures à 0,4 m/s on ne peut plus définir Z_1 . On peut incriminer l'hétérogénéité de la mixture étudiée.

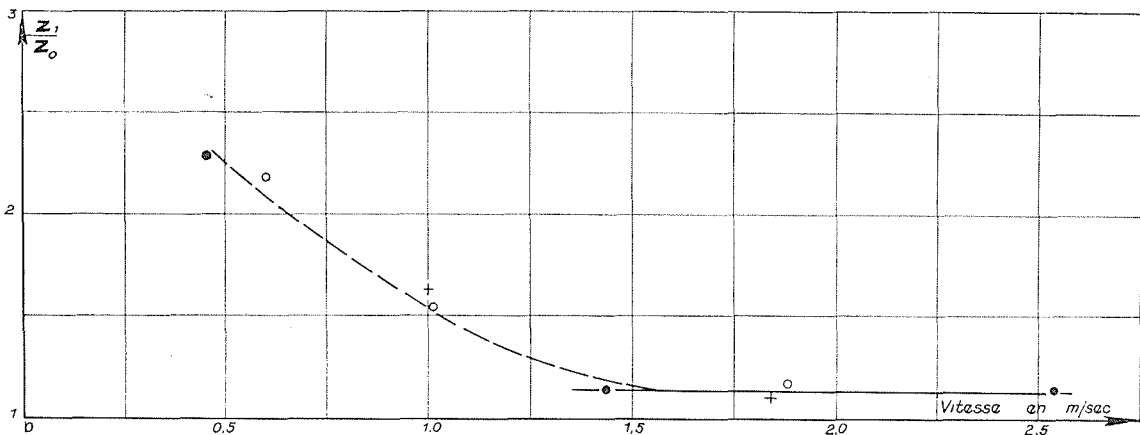


FIG. 6.

VARIATION DU RAPPORT $\frac{Z_1}{Z_0}$ AVEC LA VITESSE MOYENNE.

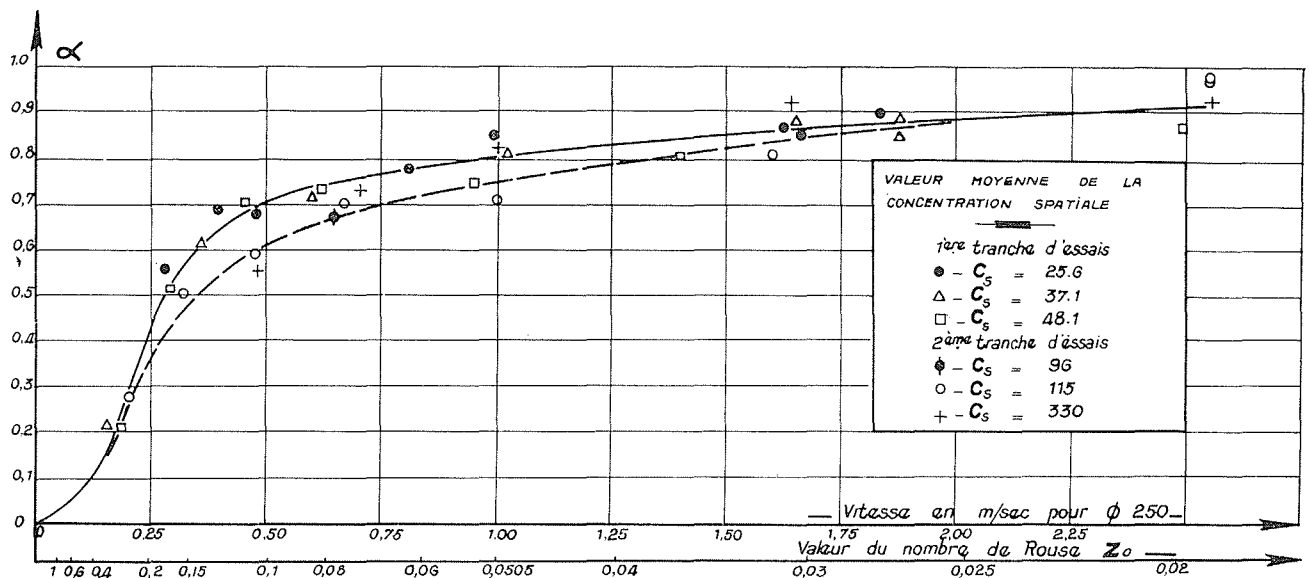


FIG. 7.

VARIATION DU RAPPORT α AVEC LA VITESSE MOYENNE.

Aux vitesses faibles, le classement des différentes particules suivant le diamètre et la densité devient suffisamment important pour que l'on ne puisse plus prévoir à priori la valeur moyenne de Z_0 . Nous allons voir d'ailleurs que la vitesse de 0,4 m/s correspond à un changement de régime net dans l'écoulement de la mixture.

ALLURE DES COURBES $\alpha = f(v)$.

La figure n° 7 donne la variation du rapport $\alpha = \frac{C_T}{C_S}$ en fonction de la vitesse moyenne de l'écoulement. C'est la détermination de cette courbe qui constituait l'objectif pratique de notre étude. Les points d'essai se groupent autour de deux courbes voisines.

Les points correspondant à la première tranche d'essai correspondent à des concentrations spatiales moyennes de 25,6; 37,1; 48,1 gr/l. Ceux correspondant à la seconde tranche correspondent à $C_S = 110$ et 330 gr/l. A notre avis, l'écart entre ces deux courbes doit être attribué à la variation de la teneur en fer du produit d'une tranche d'essais à l'autre. L'allure des deux courbes est d'ailleurs identique. Elles présentent un changement assez net de pente pour une vitesse voisine de 0,5 m/s. On conçoit alors que pour des vitesses supérieures à cette vitesse critique, une tendance à l'obstruction amenant une réduction de la vitesse de l'écoulement sera peu dangereuse. Au contraire, aux vitesses inférieures, α diminuera rapidement en tendant à la formation d'un dépôt qui, en accroissant les pertes de charge

du circuit, ne fera qu'aggraver la situation. On voit ainsi l'intérêt pratique d'une telle courbe pour le choix du point de fonctionnement d'une installation de refoulement. On peut remarquer également que cette courbe est pratiquement indépendante de la valeur absolue des concentrations, ce qui est en accord avec d'autres essais, effectués depuis. C'est également ce que laissent prévoir les communications de MM. DANIEL et CARRY. Les formules auxquelles ils aboutissent montrent en effet que la valeur absolue de la concentration n'intervient pas.

V. — Conclusion

L'hétérogénéité du matériau étudié empêche malheureusement de déduire des conclusions théoriques précises de ces essais. Nous croyons cependant avoir mis au point une méthode de travail devant permettre d'obtenir des résultats intéressants, à la fois pratiques et théoriques. Nous espérons, grâce aux essais en cours sur les sables de la Loire, obtenir des renseignements beaucoup plus précis, en particulier par l'étude systématique des conditions d'emploi de notre sonde électrique de mesure de concentration, par l'utilisation de matériaux soigneusement tamisés, et grâce au paramètre α qui constitue à la fois un élément pratique fondamental et un critère théorique intéressant du fait qu'il donne directement le glissement moyen global des particules par rapport au fluide.

