

## BULLETIN

### ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES PERTES DE CHARGE DANS UNE CONDUITE FORCÉE ALIMENTÉE EN EAU BOUEUSE

par Ch. HANOCQ,

Ingénieur A. I. Lg et A. I. M.,  
Professeur à l'Université de Liège.

Une étude fort intéressante publiée dans le numéro de juin 1927 de la revue *Mechanical Engineering* nous permet aujourd'hui, en utilisant la méthode que nous avons exposée pour le calcul des pertes de charge <sup>(1)</sup> d'examiner dans quelle mesure les formules et les coefficients employés pour les fluides homogènes, peuvent s'appliquer à un fluide tenant en suspension une proportion importante de matières solides. Ayant eu l'occasion d'organiser des essais sur une assez vaste échelle en vue de déterminer les pertes de charge dans une conduite de 4" de diamètre alimentée par une pompe centrifuge, puisant une eau boueuse plus ou moins chargée, M. Gregory, professeur de mécanique à l'Université américaine de *Tulane*, a fourni sur ces essais des renseignements très complets et a fait ressortir certaines conclusions importantes, quoique à première vue contradictoires.

En poursuivant l'analyse des résultats au moyen de notre méthode, nous avons pu faire disparaître ces anomalies et tirer des déductions précises en ce qui concerne le calcul des pertes de charge dans le cas particulier d'eaux boueuses.

Les essais ont été faits sur une conduite en fonte d'un développement total de 112 m. 50 avec des teneurs en poids de matières en suspension variant de 0 à 35 %, les poids spécifiques étant respectivement de

1000	à	0 %
1130	à	18 %6
1175	à	23 %4
1225	à	29 %05
1255	à	32 %5
1285	à	35 %3

Les essais effectués sur la conduite neuve avec de l'eau propre, ont montré que les pertes de charge étaient légèrement plus élevées que

<sup>(1)</sup> Voir *Revue Universelle des Mines*, 1<sup>er</sup> septembre 1927, 7<sup>e</sup> série, t. XV, n<sup>o</sup> 5.

celles qui seraient calculées au moyen de la formule proposée par nous (1).

Résultat inattendu, après que cette conduite eût été mise en service avec de l'eau boueuse, les pertes de charge se sont trouvées réduites à celles que l'on observait dans un tuyau lisse. C'est ainsi que les essais effectués avec de l'eau légèrement trouble et de densité pratiquement égale à l'unité ont donné des valeurs qui concordent exactement avec celles déduites de notre formule

$$10^3 \beta = \frac{271,8}{\sqrt[3]{\alpha}} + 3,4$$

applicable aux tuyaux lisses.

Ces résultats à première vue invraisemblables peuvent s'expliquer en admettant que le dépôt sur les parois du tuyau, d'un réseau tenu de matières en suspension a eu pour effet de transformer la surface rugueuse du tuyau, en une surface pratiquement lisse.

Nous avons déjà été amené à faire une observation analogue dans le cas du pompage des huiles de pétrole : la formule applicable aux tuyaux en fer doit être remplacée par celle des tuyaux lisses lorsque le fluide utilisé est relativement très visqueux et adhère parfaitement aux parois (2).

Une autre constatation inattendue est la suivante : pour une certaine valeur du coefficient de Reynolds variable avec la teneur de matières en suspension, le coefficient  $10^3\beta$  qui fixe la perte de charge, se trouve être strictement égal à celui observé dans une conduite à paroi lisse parcourue par de l'eau propre.

En d'autres termes, à partir d'une certaine valeur de  $\alpha_c$  critique, l'écoulement tourbillonnaire s'établit, et la perte de charge n'est plus influencée à partir de ce moment par la présence des matières en suspension.

Cette conclusion ne pourrait vraisemblablement pas être généralisée ; nous ne pouvons la tenir pour vraie à défaut d'une vérification dans des conditions plus générales, que pour des matières en suspension très ténues et pour des teneurs ne dépassant pas 35 % en chiffres ronds.

On sait que la perte de charge en mètres de fluide débité est donnée par la formule

$$h = 10^4 \beta \frac{w^2}{a} L.$$

Pour utiliser cette formule nous avons dû transformer les différences de pressions indiquées par l'auteur, en mètres d'eau pure, en hauteur

(1) Voir *Revue Universelle des Mines*, 1<sup>er</sup> février 1922, 6<sup>e</sup> série, t. XII, n° 3.

(2) Voir *Annales de l'Association des Ingénieurs sortis des Ecoles spéciales de Gand*, 5<sup>e</sup> série, t. XVII, 1<sup>er</sup> fascicule, 1927.

d'eau à la densité du fluide utilisé lors de l'essai. En portant en abscisse  $\alpha$  fourni par la formule

$$\alpha = \frac{10 \delta w d}{\mu}$$

( $\mu$  étant la viscosité de l'eau propre à la température indiquée,  $\delta$  le poids spécifique du mélange) nous avons pu déduire des essais les courbes de  $10^3\beta$  de la fig. 1, la courbe correspondant à 0% étant exactement celle déduite de nos formules pour le tuyau lisse, c'est-à-dire :

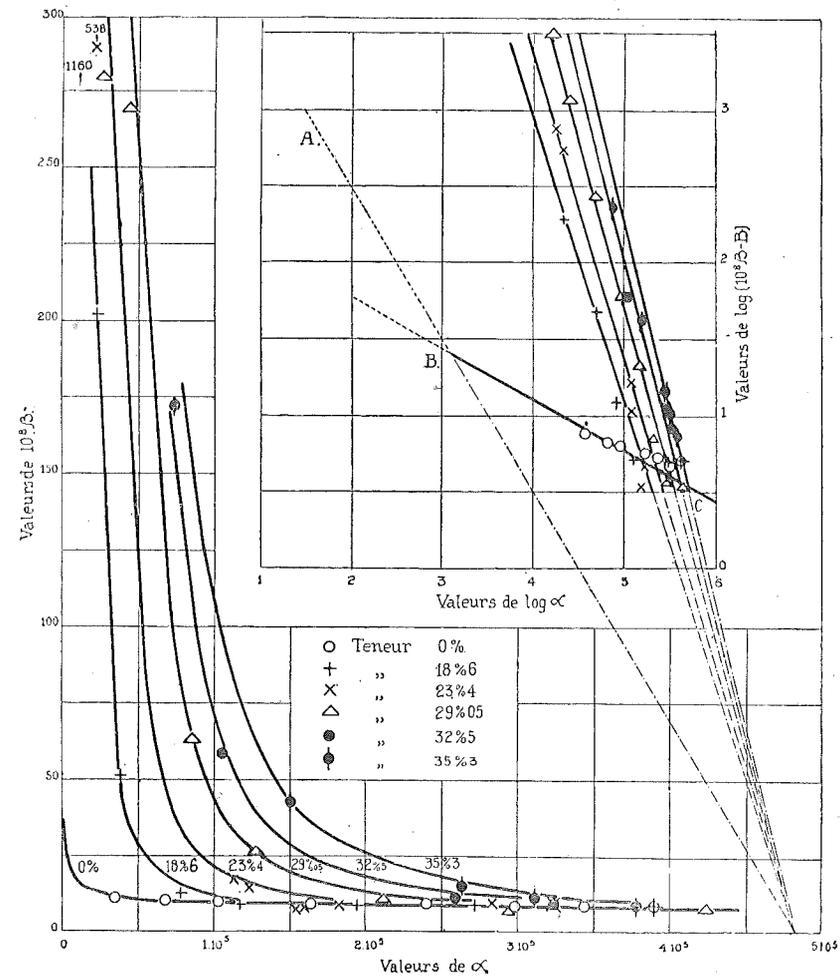


Fig. 1.

$$10^8 \beta = \frac{271,8}{\sqrt{\alpha}} + 3,4.$$

De ces courbes nous avons pu déduire l'ordonnée de l'asymptote, 3,4, à la courbe commune, puis calculer

$$\log (10^8 \beta - 3,4).$$

En portant ces valeurs en ordonnées, les  $\log \alpha$  en abscisses, nous avons obtenu la courbe BC de la fig. 1 qui montre qu'à partir d'une certaine valeur de  $\alpha_c$  variable avec la teneur, le régime change complètement.

Admettant qu'à partir de cette valeur  $\alpha_c$  la formule applicable est la formule du régime laminaire

$$10^8 \beta = \frac{a}{\alpha^n}$$

nous avons calculé  $\log 10^8 \beta$  et porté les résultats en ordonnées.

Comme la courbe pointillée AB représente la loi du régime laminaire pour l'eau propre on peut admettre qu'à mesure que la teneur diminue, l'inclinaison de la droite représentant la loi de variation de  $\log 10^8 \beta$  diminue pour se rapprocher de la droite pointillée. Nous proposons à défaut de mieux et en reconnaissant que les données sont insuffisantes pour obtenir d'une façon relativement sûre l'allure de la courbe, la loi de variation de  $\alpha_c$  en fonction de la teneur de matières en suspension représentée par la courbe de la fig. 2.

Il en résulte que pour les valeurs inférieures à  $\alpha_c$  la formule à appliquer est celle du régime laminaire, soit

$$10^8 \beta = \frac{a}{\alpha^n}$$

les coefficients  $a$  et  $n$  étant donnés par les courbes de la fig. 2. ( $a$  est donné par  $\log a$ ). On voit que pour les teneurs de 18 % à 30 % la valeur moyenne de  $n$  est égale à 2, alors que pour l'eau propre

$$n = 1; \quad 10^8 \beta = \frac{a}{\alpha}$$

Ceci explique l'allure des courbes des pertes de charge tracées par l'auteur qui montre que celles-ci sont indépendantes de la vitesse en dessous d'une certaine valeur de  $\alpha$  variable avec la teneur en matières solides.

En effet, si dans la formule de la perte de charge

$$h = 10^4 \beta \frac{m^2}{d}$$

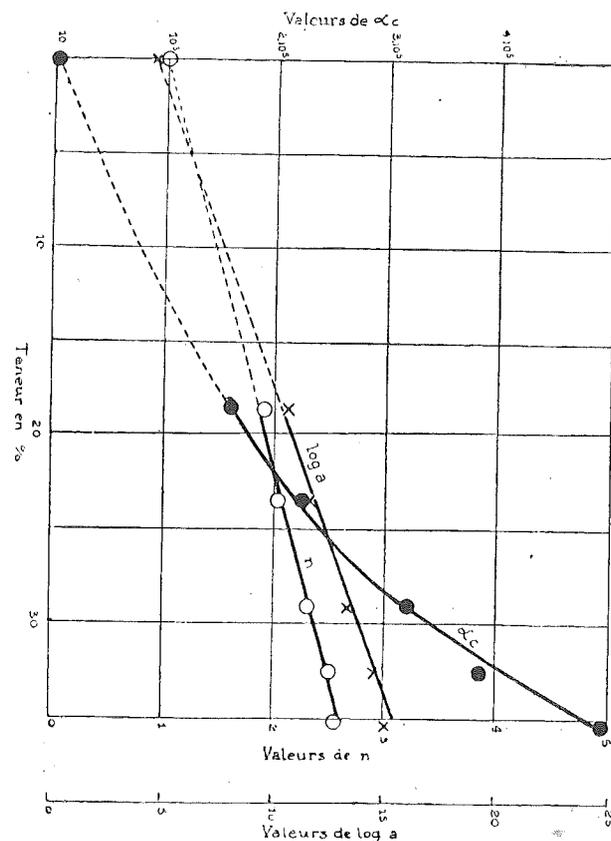


Fig. 2.

nous introduisons la valeur trouvée

$$10^8 \beta = \frac{a}{\alpha^n}$$

applicable en dessous de la vitesse critique, nous aurons

$$h = 10^{-4} \frac{a}{\left(\frac{10 \delta d}{\mu}\right)^n w^n} \cdot \frac{w^2}{d}$$

ce qui fournira pour  $n = 2$  une valeur de  $h =$  constante, quelle que soit la vitesse, du moment où la vitesse critique n'est pas dépassée. Cette conclusion n'est vraie évidemment que pour les teneurs entre 18 et 30 % pour lesquelles la valeur moyenne de  $n$  reste égale à  $n = 2$ .

Cette manière d'envisager l'ensemble des résultats expérimentaux, nous conduit à admettre que la présence des particules solides en suspension tend à maintenir plus longtemps le régime d'écoulement laminaire mais que ces particules, en augmentant les surfaces de friction, font croître dans des proportions extrêmement considérables, les résistances à l'écoulement et partant la perte de charge. Dès que l'écoulement tourbillonnaire s'établit, au contraire la perte de charge se maintient constamment égale à celle qui serait observée dans un tuyau lisse parcouru par un fluide ayant la viscosité de l'eau et la même densité moyenne que le mélange.

Ces résultats traduits avec notre méthode, en fonction des coefficients de *Reynolds* sont extrêmement curieux parce qu'ils témoignent que le phénomène d'écoulement d'un fluide tenant en suspension des particules ténues ne s'écarte pas essentiellement du phénomène propre à l'écoulement d'un fluide homogène, dans la région laminaire tout au moins.

Cette conclusion n'est toutefois vraie que pour des tuyaux droits.

Pour les tuyaux courbes les résultats fournis par les essais de M. Gregory montrent que les pertes, si on les compare à celles observées dans les courbes parcourues dans les mêmes conditions par de l'eau propre, croissent rapidement avec la teneur de matières en suspension. Cette différence dans les conclusions se conçoit, étant donné que la déviation des filets a pour effet de provoquer une séparation des particules du fluide lui-même, et d'amener une concentration des particules solides à la paroi extérieure. Il ne pourrait plus dès ce moment, être fait appel à des lois relativement simples pour traduire les résultats d'expérience.

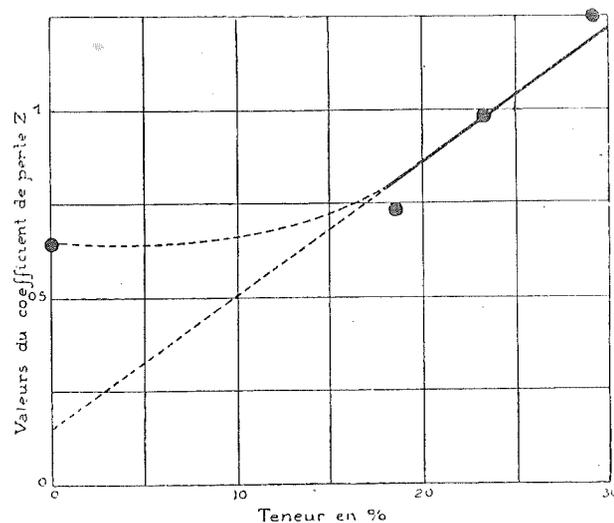
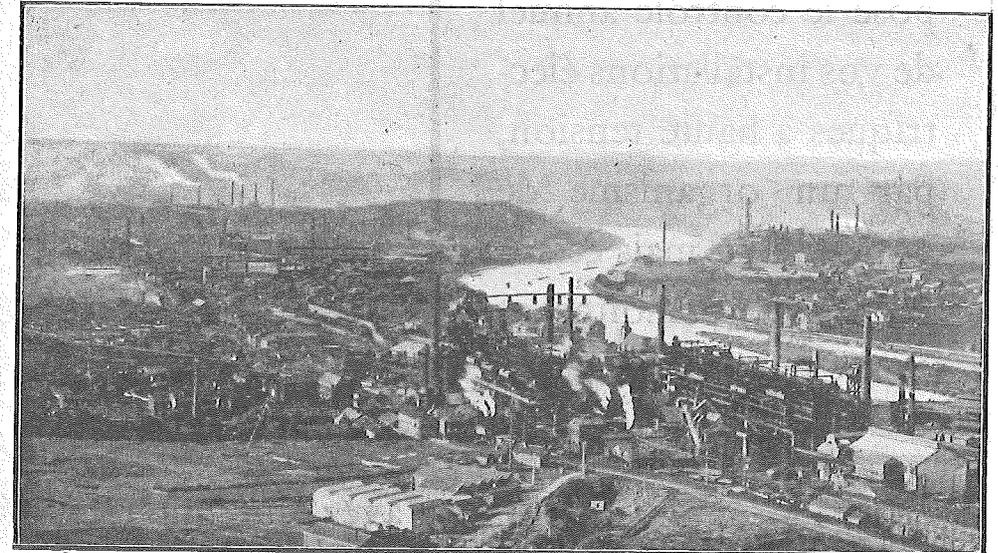


Fig. 3.

# Soc. A<sup>me</sup> OUGRÉE-MARIHAYE, à Ougrée

Charbonnages — Hauts Fourneaux — Fonderies — Aciéries — Laminoirs — Ponts et Charpentes  
Charbons et Coke — Ciments — Broyage de Scories THOMAS sous le contrôle des Laboratoires  
d'analyses de l'Etat.



ACIERS THOMAS, SIEMENS-MARTIN, ACIERS ÉLECTRIQUES SPÉCIAUX

## Tôles fortes de 5 à 32 mm. d'épaisseur et plus fortes à convenir

Tôles fines en acier doux Thomas, recuites en vase clos, convenant spécialement pour la galvanisation et l'émaillage ; Tôles spéciales pour carrosserie ; — Tôles Dynamo avec pertes maxima garanties de 3w6, 2w6 et 1w6. — Tôles étréées, tôles découpées une ou deux fois ; Epaisseurs de 0,3 à 1,5 mm. ; largeur maximum 1,00 m., en longueurs variables suivant épaisseurs et jusqu'à 3,00 m. maximum.

### FEUILLARDS ET BANDES A TUBES

de 25 à 110 m/m × 1,00 à 4 m/m. en rouleaux de 75' et 150 kilogr. en une seule longueur.

Rails, Eclisses, Traverses, Bandages, Essieux, Pièces martelées, Blocs pour matrices d'estampage, Poutrelles, Barres U, Aciers marchands et profilés, Barres à béton : Unies et crénelées, Lames de ressorts, Aciers pour fleurets de mines et canons de fusils, Verges pour Tréfileries, Aciers pour Automobiles, Piquets de clôture, Palplanches, Poutres rivées, Charpentes et Ponts.

### CHAUFFAGE AU CHARBON PULVÉRISÉ

Centrales de pulvérisation QUIGLEY, Appareils individuels REX ou WAUTHIER

Moulins à rouleaux REMA, Sécheurs verticaux RÉOL

TRANSPORT PNEUMATIQUE des charbons, ciments etc...

Monopole exclusif des ventes :  
Société Commerciale de Belgique — OUGRÉE

Adresse télégraphique :  
So cobelge-Ougrée

1

L'Arrêté Royal du 10 février 1927 vous impose le contrôle annuel de vos installations électriques à haute tension, par un organisme de votre choix, mais étranger à votre personnel.

2

Vous avez un intérêt essentiel à confier ce contrôle à un organisme uniquement technique et notoirement indépendant. Vous choisirez donc le.....



**Bureau d'Études Industrielles Fernand COURTOY**

SOCIÉTÉ COOPÉRATIVE

43, Rue des Colonies, Bruxelles

3

171 R 24

Mentionnez la R. U. M. en écrivant aux annonceurs

La figure 3 donne la valeur du coefficient  $z$  de la formule classique des pertes supplémentaires dues à une courbe

$$h = z \frac{w^2}{2g};$$

Cette courbe tracée en fonction de la teneur en % montre que le coefficient  $z$  est proportionnel à la teneur à partir de 18%. Pour la perte observée avec de l'eau trouble mais non chargée, l'auteur a obtenu le chiffre 0,64 indiqué sur l'axe des ordonnées. Ce chiffre très élevé s'explique difficilement alors que celui indiqué généralement

dans les formulaires pour une courbe à 90° et un rapport  $\frac{d}{r}$  correspondant, est égal à 0,15. Si ce dernier chiffre devait être considéré comme le chiffre vrai pour l'eau propre et le tuyau propre, nous devrions conclure que le coefficient  $z$  croît proportionnellement à la teneur; l'absence de points entre 0 et 18% ne nous permet pas de nous faire une opinion à cet égard.

Cette conclusion, en ce qui concerne l'accroissement des pertes avec la teneur, est confirmée par les chiffres observés pour la hauteur manométrique fournie par la pompe pendant des essais sur la tuyauterie.

En évaluant les hauteurs observées en mètres de fluide ayant la densité moyenne du liquide pompé, nous avons pu calculer la hauteur manométrique en fonction du débit, la vitesse périphérique restant constante. La courbe 1 (fig. 4) se rapporte à l'eau propre, la courbe 2 à une teneur de 18%6, la courbe 3 à une teneur de 23%4, la courbe 4 à une teneur de 29%05.

Pour ces trois courbes 2, 3 et 4 les points observés se groupent relativement bien sur la courbe moyenne; de plus ces courbes accusent une perte de charge rapidement croissante avec la teneur, dans les canaux de la roue et de la volute.

En effet, si la loi énoncée à propos des tuyaux droits restait vraie, pour les canaux courbes, nous devrions observer tout au moins dans la région du régime tourbillonnaire une courbe unique pour toutes les teneurs jusqu'à 29%.

Pour des teneurs au-dessus de 29% les points observés sont absolument épars et il serait impossible de les relier par une courbe continue; cela tient à ce que la séparation de plus en plus complète des particules solides lors du passage sur les aubes de la roue amène des densités locales très supérieures à la densité moyenne et que tous les raisonnements effectués pour définir ce qu'on entend par hauteur manométrique et débit moyen, cessent d'avoir une signification, à partir de ce moment.

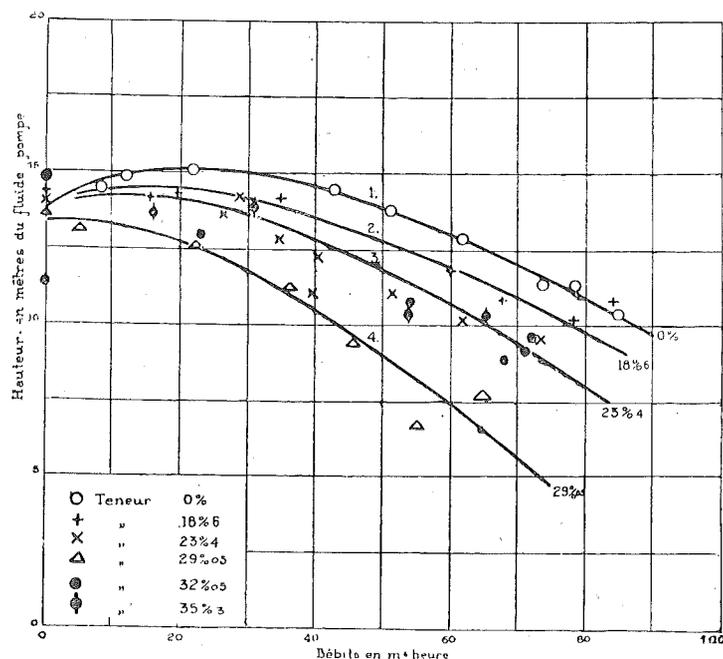


Fig. 4.

**Conclusions**

En admettant, à défaut de mieux, le diagramme de la figure 2 pour les valeurs de  $\alpha_c$ ,  $a$  et  $n$ , on voit que le calcul de la perte de charge pour l'eau boueuse contenant jusqu'à 35% de matières en suspension pourra se faire de la manière suivante :

Si  $\alpha$  est supérieur à  $\alpha_c$  on aura en mètres du fluide pompé

$$h = 10^4 \beta \frac{w^2}{d}$$

avec

$$10^3 \beta = \frac{271,8}{\sqrt[3]{\alpha}} + 3,4$$

le coefficient  $\alpha$  étant calculé pour une densité égale à celle du fluide pompé et pour une viscosité égale à celle de l'eau propre à la température donnée.

Si  $\alpha$  est inférieur à  $\alpha_c$ , on a encore

$$h = 10^4 \beta \frac{w^2}{d}$$

mais avec

$$10^3 \beta = \frac{a}{\alpha^n}$$

le coefficient  $\alpha$  étant calculé comme dans le premier cas et les coefficients  $a$  et  $n$  étant fournis par le diagramme de la figure 2.

Il est possible d'utiliser des formules fournissant directement la valeur de  $10^3 \beta$  en remarquant que toutes les droites représentant le régime laminaire pour différentes teneurs, convergent vers le même point (voir fig. 1). Ce point étant caractérisé par

$$\log \alpha = 6,88, \quad \log 10^3 \beta = -2,366,$$

la relation

$$\log 10^3 \beta = \log a - n \log \alpha$$

fournira

$$\log a = 6,88 n - 2,366$$

et partant

$$\log 10^3 \beta = n (6,88 - \log \alpha) - 2,366.$$

Le coefficient  $n$  étant fourni en fonction de la teneur  $x\%$  de matières en suspension, par la loi linéaire.

$$n = 0,045 x + 1,$$

il sera possible de déduire une relation entre  $10^3 \beta$  et  $\alpha$ , qui fixera directement la valeur de  $\beta$  en fonction de  $x$  et de  $\alpha$ .

$$\lg 10^3 \beta = 0,31 x + 4,514 - (0,045 x + 1) \lg \alpha$$

Groupés sous cette forme, les résultats des essais très complets effectués par M. Gregory présentent un intérêt général qui n'échappera à personne, étant donné qu'on peut les considérer, à notre avis, comme valables dans toutes les applications, quelle que soit la nature des particules solides entrant en jeu, tout au moins si elles ont des dimensions assez faibles pour se maintenir en suspension même à faible vitesse.

## SOMMAIRE :

Mémoires :	Pages
SCHLAG, Alb. — Mesure du débit dans une conduite forcée ( <i>à suivre</i> ).....	p. 109
CAMPUS, F. — Rapport relatif au V <sup>e</sup> Congrès International de la Route, à Milan ( <i>suite et à suivre</i> ) .....	p. 125
<b>Bulletin :</b>	
HANOCQ, Ch. — Etude expérimentale des pertes de charge dans une conduite forcée alimentée en eau boueuse .....	p. 135
Revue des Périodiques techniques .....	p. 144 à 156

SOCIÉTÉ ANONYME

JOHN COCKERILL

SERAING (Belgique)

MINES, MÉTALLURGIE, CONSTRUCTIONS MÉCANIQUES  
CONSTRUCTIONS NAVALES, ARTILLERIEFontes — Lingots — Blooms — Larges plats — Cornières — Barres en T et U —  
Tôles — Aciers pour armes — Aciers spéciaux — Acier électrique — Rails et Acces-  
soirs — Ressorts — Pièces de forge des plus grandes dimensions — Roues — Essieux —  
Bandages — Trains montés.

CHAUDIÈRES — PONTS — TOITURES MÉTALLIQUES — CHARPENTES

Machines diverses — Pompes — Grues — Moteurs et machines soufflantes à gaz —  
Machines d'extraction, d'épuisement — Ventilateurs de mines — Machines de lami-  
noirs — Appareils de fabriques de fer, d'aciéries et de hauts fourneaux. — Locomo-  
tives — Turbines Parsons — Moteurs DieselPaquebots — Cargo boats — Sternwheels — Dragueurs — Barges — Canots automo-  
biles — Baleinières — Pirogues.

Canons — Munitions — Affûts — Coupoles cuirassées

CIMENT HYDRAULIQUE

521 R 24

Mentionnez la R. U. M. en écrivant aux annonceurs

## REVUE UNIVERSELLE DES MINES

DE LA

MÉTALLURGIE, DES TRAVAUX PUBLICS  
DES SCIENCES ET DES ARTS APPLIQUÉS A L'INDUSTRIEAnnuaire de l'Association des Ingénieurs sortis de l'École de Liège. (A. I. Lg.)  
paraissant le 1<sup>er</sup> et le 15 de chaque mois

Revue publiée sous la direction du Comité Scientifique de l'A. I. Lg.

Sommaire: Voir 4<sup>me</sup> page de la couvertureABONNEMENT } Belgique et Congo Belge: Un an 125 francs  
Etranger: ..... Un an 150 francs  
Le numéro: 10 francs.

RÉDACTION ET ADMINISTRATION: 16, Quai des Etats-Unis, Liège

Imprimerie H. VAILLANT-CARMANNE, 4, Place St-Michel, Liège. — 903.

Vannes à Eau  
Vannes à Gaz

les plus robustes

C<sup>ie</sup> G<sup>le</sup> des CONDUITES d'EAU

LIÈGE

LIVRAISON RAPIDE

Mentionnez la R. U. M. en écrivant aux annonceurs