ÉTUDE HYDRAULIQUE DE HUIT REVÊTEMENTS INTÉRIEURS DE CONDUITES FORCÉES

par L. LEVIN

Chef du Département Recherches de la Société B.V.S., Grenoble
Chargé de cours à l'Ecole
Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne

1. — Exposé du problème

Entre les années 1930 et 1935 a été développée la théorie basée sur la mécanique du mouvement turbulent fondée par L. Prandtl et Th. Karman. L'application de cette théorie à l'écoulement dans les conduites forcées a été effectuée par de nombreux hydrauliciens, dont les plus connus seraient ceux ayant fourni un outil de travail aux bureaux d'étude, à savoir : Colebrook [1] qui a donné en 1938-1939 une formule portant son nom et Moody [2] présentant en 1944 cette formule sous forme d'un abaque fort répandu depuis lors.

Le problème des pertes de charge dans les conduites forcées apparaissait ainsi comme résolu durant une à deux décennies; en effet, les mesures industrielles *in situ* effectuées sur des ouvrages relativement rugueux, sous des nombres de Reynolds ne dépassant pas 10^7 , se logeaient assez correctement sur l'abaque de Moody [3 et 4, par exemple].

Cette optique a commencé à évoluer avec l'accroissement, d'une part, des diamètres des conduites forcées, d'autre part, des vitesses et par conséquent des nombres de Reynolds (atteignant 10^8), mais surtout avec l'apparition des revêtements plastiques (vinyle, polyuréthane, araldite...) caractérisés par des rugosités relatives extrêmement faibles, inférieures à $5 \cdot 10^{-6}$. De nombreux hydrauliciens ont trouvé des courbes expérimentales presque confondues avec ou même traversant celle des « conduites lisses », courbe limite suivant la théorie de Prandtl-Karman, s'exprimant par des formules logarithmiques.

Des réserves de caractère théorique concernant les for-

mules logarithmiques ont été formulées dès 1938 [5] par l'hydrodynamicien très connu Goldstein. D'autres se sont exprimés dans le même sens [6] en 1947. Blench, se basant sur la « théorie du régime » [7 et 8], a contesté la validité des formules logarithmiques; passant au stade de l'expérimentation, il a prouvé que le régime hydrauliquement lisse est beaucoup plus proche de la formule de Blasius [9] que de la formule logarithmique.

D'autres expériences, très nombreuses, sont venues depuis lors contester la théorie de Prandtl-Karman [par exemple 10, 11, 12], au point que la sous-commission des conduites forcées et galeries de la Commission U.S.A. des Ouvrages hydrauliques a conclu en 1965 à l'inapplicabilité des formules logarithmiques pour les grandes conduites forcées modernes : la perte de charge réelle est nettement inférieure à celle calculée par les formules logarithmiques [13]. La limite inférieure des courbes expérimentales serait bien plus proche de la courbe de Blasius (droite en coordonnées logarithmiques) que la courbe de Prandtl-Karman.

Dans ces conditions, la Société B.V.S. à Grenoble a décidé de reprendre le problème à la base et d'effectuer des essais précis concernant les huit types de revêtement qu'elle fait appliquer le plus souvent sur les conduites forcées qu'elle construit en France et dans de nombreux pays étrangers.

De plus, si l'influence de l'âge du revêtement bitumineux sur la perte de charge est très mal connue, elle est totalement inconnue pour les revêtements en matière plastique. Electricité de France, REH Alpes-Nord, ayant choisi un revêtement polyuréthane dans le but de réduire les pertes de charges dans l'importante conduite forcée du Mont-

Cenis, nous avons décidé d'expérimenter cette matière dans notre conduite d'essai durant deux ans, à raison d'un essai tous les deux mois.

Le présent article rend compte de tous ces problèmes.

2. — Rappel succinct des théories existantes

Notre article paru en 1966 [14] traite en détail ce problème. Nous nous contenterons simplement ici de reprendre les conclusions essentielles des théories existantes.

Si on se limite à l'étude du seul régime turbulent, on peut distinguer trois zones (fig. 6 à 13).

a) RÉGIME TURBULENT PLEINEMENT RUGUEUX.

Pour les conduites relativement rugueuses, le coefficient λ de la formule universelle de perte de charge linéaire (*) ne dépend que de la rugosité relative ε/D de la conduite. Ici vaut la formule de Prandtl-Nikuradse :

$$\lambda = \frac{1}{(2 \log \varepsilon/3,7 D)^2} \quad (1)$$

L'expérience ne contredit pas franchement cette formule. Elle vaudrait pour les nombres de Reynolds :

$$\mathcal{R} > \mathcal{R}'' = \frac{200 D}{\varepsilon \sqrt{\lambda}} \quad (2)$$

formule due à Moody [2], alors que Altschoul [15] donne une formule plus simple :

$$\mathcal{R}'' = \frac{560}{\varepsilon/D} \quad (3)$$

Nous pensons que la formule (3) justifierait son emploi grâce à sa simplicité, l'excessive précision n'étant pas ici de mise, de toute façon.

b) RÉGIME TURBULENT HYDRAULIQUEMENT LISSE.

Ce régime est exprimé par la courbe limite inférieure de l'abaque de Moody. Le coefficient λ ne dépend que du nombre de Reynolds.

La formule logarithmique de Prandtl-Nikuradse s'écrit :

$$\lambda = \frac{1}{\left(2 \log \frac{\mathcal{R} \sqrt{\lambda}}{2,5}\right)^2} \quad (4)$$

Cette formule vaut pour les nombres de Reynolds [15]

$$\mathcal{R} < \mathcal{R}' = \frac{23}{\varepsilon/D} \quad (5)$$

La formule (4) est fortement mise en doute par de nombreux résultats expérimentaux conduisant à des coefficients

λ très inférieurs à ceux issus de cette formule. La vieille formule de Blasius [9] paraît mieux convenir. Elle s'écrit :

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{\mathcal{R}}} = \sqrt[4]{100 \mathcal{R}} \quad (6)$$

On ne connaît pas de courbe expérimentale ayant franchi la limite exprimée par la formule (6). Quelques résultats expérimentaux l'atteignent.

c) RÉGIME TURBULENT DE TRANSITION.

Ce régime couvre la zone intermédiaire où :

$$\mathcal{R}' < \mathcal{R} < \mathcal{R}''$$

caractérisant la rugosité des conduites forcées industrielles; elle est donc pour nous, et de loin, la plus importante.

Le coefficient λ dépend des deux nombres $\mathcal{R}$ et ε/D . La formule de Colebrook, proposée en 1939, s'écrit [1] :

$$\lambda = \frac{1}{\left[2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 D} + \frac{2,5}{\mathcal{R} \sqrt{\lambda}}\right)\right]^2} \quad (7)$$

L'abaque de Moody est calculé à partir de (7). En calcul direct, l'équation (7), étant implicite, est laborieuse dans l'emploi. Altschoul [15] a proposé la formule explicite suivante :

$$\lambda = \frac{1}{\left(1,8 \log \frac{\mathcal{R}}{10} \cdot \frac{\varepsilon}{D} + 7\right)^2} \quad (8)$$

Les formules (7) et (8) donnent des résultats ne différant pas sensiblement entre eux.

**

Tous ces résultats sont graphiquement exprimés en toile de fond sur les figures 5 à 12. Les courbes expérimentales, dont la méthode d'investigation et la précision sont décrites ci-après, sont portées en surimpression sur l'abaque de Moody.

1/ Coquille inférieure d'un élément de 2 m de conduite d'essai. Remarquer les joints d'étanchéité.
Lower half of a 2-metre test-pipe element showing seals.

2/ Deux coquilles d'un élément de conduite d'essai.
Two halves of a test-pipe element.

3/ Vue d'ensemble de la conduite d'essai avec les batteries des piézomètres.
Overall view of test-pipe showing piezometer positions.

4/ Mesure du volume, en vue de calcul du diamètre, d'un élément de conduite (placé verticalement au deuxième plan).
Volume measurement for diameter determination carried out on a vertical pipe element visible in the background.

(*) La perte de charge par frottement linéaire ΔH d'une longueur L de conduite forcée de diamètre D , parcourue par un courant fluide de vitesse moyenne V est donné par la formule dite universelle :

$$\Delta H = \lambda \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

/1

2/

/3

4/

3. — Dispositif expérimental

La conduite d'essai, proprement dite, longue de 20 m, est entièrement usinée; son diamètre intérieur est exécuté à 10 μ près. Les éléments ont 2 m de longueur, chaque tuyau étant composé de deux coquilles, une supérieure, l'autre inférieure. Des joints ronds en caoutchouc, logés dans des gorges, sont prévus aussi bien entre les coquilles (fig. 1) qu'entre les éléments de tuyau (fig. 2).

L'indéformabilité des tuyaux est assurée grâce à des brides d'extrémité et des plats de renforcement (épaisseur : 20 mm) soudés aux deux coquilles sur leur diamètre horizontal. Le diamètre des tuyaux assemblés est de l'ordre de 210 mm. Son *diamètre effectif, après revêtement*, est déterminé d'une façon précise, par jaugeage, après chaque essai (fig. 4). L'élément, posé debout et muni d'un joint plein étanche à la base, est rempli d'eau jusqu'à affleurement. La hauteur de l'élément et le volume de l'eau y contenue sont mesurés avec grande précision. Il est facile alors, à partir de ces données, de calculer le diamètre avec un écart maximal de :

$$(dD/D)_{\max i} = 0,2 \%$$

Après la série d'essais relative à un revêtement donné, la conduite est sablée très soigneusement et un nouveau revêtement est appliqué.

Chaque élément de tuyau comporte quatre prises de pression, par groupe de deux, placées sur le diamètre incliné de 45° sur la verticale (fig. 3). La conduite entière dispose ainsi de quarante prises de pression placées tous les mètres sur vingt abscisses. Chaque section fournit deux lectures de pression. Les prises de pression sont reliées aux piézo-

mètres fixés sur trois tableaux rigoureusement verticaux (fig. 3).

La correspondance de lectures entre deux tableaux consécutifs s'effectue grâce à une prise reliée simultanément aux deux tableaux.

La température de l'eau est mesurée au moyen d'un thermomètre à 0,1° près.

Le débit traversant la conduite est réglé au moyen d'une vanne installée sur la conduite de fuite ramenant l'eau dans le réservoir général du laboratoire. La circulation s'effectue en circuit fermé, une pompe, puisant dans le réservoir général et refoulant le débit dans un réservoir supérieur, maintenant une charge constante sur le laboratoire. Ce réservoir alimente la conduite d'amenée de la conduite d'essai.

Le débit d'eau est mesuré avec une précision de 0,8 à 1 %, au moyen d'une tuyère normalisée, installée suivant les règles AFNOR sur la conduite d'amenée. Pour les essais de vieillissement du revêtement de polyuréthane, cette conduite comportait de plus un débitmètre électromagnétique qui, lui aussi, fournit le débit à ± 1 % environ. Avec les deux appareils, on peut donc considérer que le débit a été mesuré avec un écart maximal de :

$$(dQ/Q)_{\max i} = 0,7 \%$$

Le tableau 1 indique les caractéristiques essentielles des huit revêtements essayés : composition approchée, mode et température d'application, nombre de couches et épaisseur finale.

La géométrie de la rugosité du revêtement a été relevée par M. Perrat, chef du Laboratoire de métrologie de l'INSA à Lyon. Le tableau 2 indique les résultats.

Tableau 1

Caractéristiques essentielles des revêtements appliqués

N°	DÉNOMINATION	COMPOSITION APPROCHÉE	DENSITÉ	PRÉPARATION DES SURFACES PAR GRENAILLAGE	APPLICATION	TEMPÉRATURE APPROCHÉE °C	OBSERVATIONS <i>n</i> = nombre de couches <i>e</i> = épaisseur finale
1	Bitume liquide...	Bitume naturel (gélsonite)	1,1	SA 2	au pistolet classique	température ambiante	<i>n</i> = 2 <i>e</i> = 0,4 mm
2	Email bitumineux.	Brai de houille	1,5	SA 2	à la brosse	180-200 °C	<i>n</i> = 1 <i>e</i> = 2 à 2,5 mm
3	Email bitumineux.	Brai de houille	1,5	SA 2	à la palette	180-200 °C	<i>n</i> = 1 <i>e</i> = 2 à 2,5 mm
4	Email bitumineux.	Brai de houille	1,5	SA 2	lissé à la flamme (torche propane)	180-200 °C	<i>n</i> = 1 <i>e</i> = 2 à 2,5 mm
5	Polyuréthane. . . .	Epoxy + polyuréthane		SA 3	au pistolet airless	température ambiante	<i>n</i> = 5 <i>e</i> = 0,15 à 0,2 mm
6	Vinyle.	Résine acétochlorurée de polyvinyle ou de polychlorure de vinyle.		SA 3	au pistolet airless	température ambiante	<i>n</i> = 5 <i>e</i> = 0,1 à 0,15 mm
7	Vinyle sur métallisation au zinc : <i>e</i> = 80 μ	Résine acétochlorurée de polyvinyle ou de polychlorure de vinyle.		SA 3	au pistolet airless	température ambiante	<i>n</i> = 5 <i>e</i> = 0,1 à 0,15 mm
8	Araldite.	Résine époxy		SA 3	au pistolet airless	température ambiante	<i>n</i> = 3 <i>e</i> = 0,15 à 0,2 mm

Tableau 2*Etat de surface des revêtements étudiés*

N°	NOM	R. A. (*) microns	R. M. (**) microns	MACROGÉOMÉTRIE	OBSERVATIONS
1	Bitume liquide.....	3 à 4	10 à 15	très tourmentée 50 μ sur 0,3 mm	On note des « aiguilles » de 30 μ . Surface lisse avec toutefois des « aiguilles » de 30 μ .
2	Email à la brosse.....	20 à 30	> 100	50 μ sur 2 mm	
3	Email à la palette.....	15 à 20	> 100	50 μ sur 3 mm	
4	Email lissé flamme.....	12 à 15	100	50 μ sur 3 mm	
5	Polyuréthane.	2,3 à 4,4	20 à 25	50 μ sur 5 mm	
6	Vinyle.	3,3 à 4,2	10 à 20	50 μ sur 5 mm	
7	Vinyle sur métallisation....	3 à 4,4	10 à 20	40 μ sur 5 mm	
8	Araldite.	2,5 à 2,8	3 à 4	« Vagues » de 10 à 20 μ sur 2,5 mm	

(*) R. A. = Rugosité arithmétique, c'est-à-dire écart moyen par rapport à la ligne moyenne sur $l = 0,75$ mm.(**) R. M. = Rugosité maximale, c'est-à-dire écart maximal par rapport à la ligne moyenne sur $l = 0,75$ mm.

La ligne moyenne rend minimale la somme des carrés des écarts du profil par rapport à elle.

Le verre poli admet R. A. = 0,02 et R. M. = 0,2 environ.

Tableau 3*Caractéristiques physico-chimiques de l'eau mesurées durant 22 mois
(de août 1967 à avril 1969)*

COMPOSANTS OU CARACTÉRISTIQUE	FORMULE	RÉSULTATS		
		mg/l	pH	ohms/cm
Matière organique. . . .	en oxygène absorbé	0,5 à 0,9	7.2 à 8,3	2 200 à 2 800
Chlorures.	en Cl	35 à 55		
Sulfates.	en SO_3	35 à 60		
Phosphates.	en $\text{P}_2 \text{O}_5$	0		
Silice.	en Si O_2	4 à 10		
Oxyde de Fe ou Al...	en Fe 2O_3	2,5 à 10		
Sels de calcium.....	en Ca O	50 à 85		
Sels de magnésium....	en Mg O	5 à 14		
Azote ammoniacal....	en NH_3	0		
Azote nitreux.....	en $\text{N}_2 \text{O}_3$	0		
Azote nitrique.....	en $\text{N}_2 \text{O}_5$	traces		
Extrait sec à 100 °....	en $\text{CO}_3 \text{ Ca}$ en pH	120 à 280	7.2 à 8,3	2 200 à 2 800
Alcalinité.		100 à 140		
Résistivité.		8,5 à 10,5		
Oxygène libre.....				

NOTA : L'eau du réservoir est renouvelée tous les 4 mois à partir de la nappe phréatique du Drac.

Tableau 4

Revêtement : Bitume à froid appliqué au pistolet
 $D = 209,5 \text{ mm}$, $S = 344,7 \text{ cm}^2$

ESSAI N°	Q (l/s)	TEMPÉRATURE (°)	ν (cm ² /s)	V (m/s)	$\mathcal{R}$	$\Delta H/L = I$	λ
12	210,5	20°	0,010 55	6,165	1,22 10 ⁶	0,136	0,014 68
13	176,3	23,25°	0,009 7	5,17	1,11 10 ⁶	0,095	0,014 63
14	152,2	22,75°	0,009 8	4,46	9,53 10 ⁵	0,073	0,015 14
15	124,7	23,25°	0,009 7	3,65	7,88 10 ⁵	0,049	0,015 09
16	98,8	24°	0,009 55	2,90	6,36 10 ⁵	0,030	0,014 68
17	75,6	24°	0,009 55	2,21	4,85 10 ⁵	0,018 5	0,015 5
18	50,4	24,25°	0,009 5	1,475	3,25 10 ⁵	0,008 5	0,016 04
19	12,2	23,75°	0,009 6	0,358	7,81 10 ⁴	0,000 9	0,018 78
20	18,5	24,25°	0,009 5	0,543	1,19 10 ⁵	0,001 3	0,018 85
21	27,7	24,25°	0,009 5	0,812	1,79 10 ⁵	0,002 9	0,018 03
22	39	24,5°	0,009 45	1,14	2,53 10 ⁵	0,005 2	0,016 43
23	224,9	24,75°	0,009 4	6,60	1,47 10 ⁶	0,155	0,014 63
24	252,3	25,5°	0,009 2	7,40	1,685 10 ⁶	0,193	0,014 44
25	12,5	21,5°	0,010 12	0,366	7,57 10 ⁴	0,000 6	0,018 37
26	24	22°	0,010 03	0,703	1,468 10 ⁵	0,002 2	0,018 29

5/ Exemple de dépouillement des pentes pour le revêtement en bitume à froid appliqué au pistolet.

Sample slope calculation for cold bitumen spray-coating.

Pour les essais de vieillissement du polyuréthane, on a effectué des analyses physico-chimiques mensuelles de l'eau du réservoir. Ces analyses chimiques ont été confiées au Laboratoire municipal de la ville de Grenoble. Les analyses physiques étaient effectuées par le laboratoire de la Faculté de Médecine de Grenoble. Le tableau 3 contient les résultats principaux de ces analyses.

4. — Méthode expérimentale

Le but de chaque essai est de déterminer le coefficient λ de la formule universelle en mesurant :

- la pente de la ligne d'énergie $I = \Delta H/L$ (fig. 5);
- le diamètre D de la conduite;
- le débit d'eau Q lié à la vitesse moyenne par :

$$V = 4 Q / \pi D^2$$

La formule universelle peut donc s'écrire :

$$\lambda = \frac{2 g \pi^2}{16} \frac{ID^5}{Q^2} \quad (9)$$

L'écart relatif maximal du coefficient λ est par conséquent :

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = 5 \frac{dD}{D} + 2 \frac{dQ}{Q} + \frac{dI}{I} \quad (10)$$

Nous avons vu au chapitre précédent que :

$$dD/D = 0,2 \% \quad \text{et} \quad dQ/Q = 0,7 \% \text{ à } 1,1 \%$$

(La première valeur pour les forts débits, la seconde pour les faibles.)

Quant à la pente I, elle est obtenue de la façon suivante : les pressions lues aux quarante prises de pression sont portées, en fonction de l'abscisse sur un graphique. La droite passant par les points expérimentaux correspond à leur plus petit écart quadratique. La précision de la pente I peut être évaluée, dans ces conditions, à :

$$dI/I = 0,5 \% \text{ pour les faibles pentes,}$$

et :

$$dI/I = 6 \% \text{ pour les fortes pentes.}$$

La précision du coefficient λ s'établit ainsi, conformément à (10) :

$$d\lambda/\lambda = 5,0,2 + 2,1,1 + 0,5 = 3,7 \%$$

pour les faibles R ;

$$d\lambda/\lambda = 5,0,2 + 2,0,7 + 6 = 8,4 \%$$

pour les forts R .

Chaque point expérimental de λ est porté sur les graphiques; il est accompagné de deux rectangles ombrés, vers le haut et vers le bas de la valeur :

$$\pm \Delta\lambda = \varepsilon\lambda$$

ε étant l'écart ci-dessus défini, élevé pour les grands nombres R , plus faible pour les petits nombres R . Les points correspondant aux nombres moyens de R sont affectés d'une précision variant linéairement en fonction de R (fig. 6 à 13).

6/ Bitume à froid - $\epsilon = 0,042 \text{ mm (42 } \mu\text{)}$.

Cold bitumen. $\epsilon = 0.042 \text{ mm (42 } \mu\text{)}$.

5. — Résultats

Les résultats d'essais seront exposés dans l'ordre des revêtements admettant des coefficients λ décroissants, c'est-à-dire :

- 1 - bitume à froid;
- 2 - émail appliqué à la brosse;
- 3 - émail appliqué à la palette;
- 4 - émail lissé à la torche - propane;
- 5 - polyuréthane appliqué au pistolet airless;
- 6 - vinyle appliqué au pistolet airless;
- 7 - vinyle appliqué sur couche de métallisation;
- 8 - araldite appliquée au pistolet airless.

Notons de suite que d'une part les revêtements nos 1 et 2 et, d'autre part, les revêtements nos 5, 6 et 7 sont pratiquement équivalents du point de vue perte de charge.

5.1. Bitume à froid.

Les caractéristiques détaillées de ce revêtement sont explicitées dans le tableau 1.

La figure 5 reproduit, à petite échelle, quatre essais caractéristiques (dans l'ordre croissant des débits et pentes, du plus petit au plus grand) des quinze essais effectués pour ce revêtement. Chaque droite de cette figure porte le n° de l'essai, le débit, la pente et l'écart maximal. Les deux dernières valeurs ont été déterminées à partir de graphiques dont l'échelle des pressions était 1 et celle des longueurs 1/10.

Le tableau 4 comprend les conditions et résultats des quinze essais relatifs à ce revêtement.

La figure 6 représente le résultat essentiel de notre étude, soit la courbe $\lambda(R)$ sur fond de l'abaque de Moody. Chaque point expérimental porte le « rectangle d'écart ». On voit que la courbe expérimentale peut valablement se confondre avec la courbe $\varepsilon/D = 0,0002$ mm environ, soit une rugosité absolue de : $\varepsilon = 0,0002 \times 210 = 0,042$ mm.

7/Email industriel à la brosse. $\varepsilon = 0,04$ mm env. (40 μ env.).

Industrial enamel applied by brush. $\varepsilon = 0.04$ mm approx. (40 μ).

5.2 Email appliqué à la brosse.

Les caractéristiques sont portées dans le tableau 1.

La figure 7 porte le résultat des quatorze points d'essai avec leurs « rectangles d'écart ». La courbe expérimentale ne se confond pas cette fois-ci avec une courbe de Moody. Au contraire, la première coupe les courbes théoriques et a tendance à devenir parallèle à la courbe limite des « tuyaux lisses ». Des résultats analogues ont été déjà publiés à maintes reprises.

Du moment que la courbe expérimentale ne se confond pas avec une courbe de Moody, on est du coup privé du support théorique permettant de calculer la rugosité absolue. En cherchant un ordre de grandeur, on peut consentir à assimiler la courbe expérimentale à celle correspondant d'après l'abaque à :

$$\varepsilon/D = 0,0002$$

soit encore :

$$\varepsilon = 0,04 \text{ mm environ}$$

5.3 Email appliqué à la palette.

Ses caractéristiques sont portées dans le tableau 1.

La figure 8 donne les points expérimentaux. Il s'en dégage la même conclusion que pour l'email appliqué à la brosse, c'est-à-dire non-coïncidence de la courbe expérimentale avec les courbes théoriques.

Les points expérimentaux correspondant aux grands nombres de Reynolds étant situés plus bas que les points similaires des deux revêtements précédents, on peut présumer que la rugosité absolue de ce revêtement est plus faible que celle des revêtements précédents; on peut proposer : $\varepsilon = 0,03$ à $0,035$ mm.

5.4 Email lissé à la torche-propane.

Le tableau 1 en donne les caractéristiques.

La figure 9 montre que les points expérimentaux se logent assez correctement sur la courbe de l'abaque cotée $\varepsilon/D = 0,00006$, soit : $\varepsilon = 0,012$ mm.

8/ Email à la palette. $\varepsilon = 0,030$ mm env. (30μ environ).

Palette-applied enamel. $\varepsilon = \text{approx. } 0.03 \text{ mm } (30 \mu)$.

9/Email à chaud (lissé à la flamme). $\varepsilon = 0,012 \text{ mm}$ (12μ).
 Flame-smoothed enamel. $\varepsilon = 0.012 \text{ mm}$ (12μ).

5.5 Commentaires concernant les résultats des quatre revêtements bitumineux.

a) Les quatre résultats ci-dessus peuvent paraître surprenants après analyse des chiffres du tableau 2. En effet, le bitume liquide admet des rugosités arithmétique (R.A.) et maximale (R.M.) nettement inférieures à celles des trois autres revêtements, sa « rugosité hydraulique » étant, au contraire, supérieure à celles des trois émaux. Or, il convient de se rappeler qu'en hydraulique, où la « particule » n'est point microscopique, c'est la *macrogéométrie* qui prédomine. Si on se reporte à cette colonne du tableau 2, on voit nettement la différence. Si on note pour le bitume à froid une « bosse » tous les 0,3 mm, il faut respectivement des distances de 2 et 3 mm pour retrouver une telle « bosse » sur les émaux « à la brosse » et « à la palette ». Pour l'émail lissé à la flamme, la macrogéométrie n'est pas plus tourmentée que pour l'émail « à la palette », mais de plus il jouit d'une R.A. et d'une R.M. plus favorables, circon-

tance certes secondaire, mais apportant quand même un certain bénéfice.

b) Il est connu depuis fort longtemps que les revêtements bitumineux ne résistent que médiocrement aux épreuves de l'âge. Il n'est pas rare de voir un émail décupler et même plus sa rugosité après six mois seulement de fonctionnement [13, 14, 16, 17, 18]. Cette dégradation est fonction de multiples facteurs physico-chimiques que nous avons décrits plus en détail dans [14].

Par contre, la tenue dans le temps des revêtements en matière plastique (polyuréthane, vinyle, araldite) paraît, d'après les maigres renseignements que nous possédons à ce jour, nettement meilleure.

Nous avons nous-même expérimenté à ce point de vue le polyuréthane; l'opinion ci-dessus s'est pleinement confirmée, comme on peut le voir par la lecture du paragraphe 5.8 ci-après.

10/ Polyuréthane. $\epsilon = 0,002 \text{ mm}$ (2μ).

Polyurethane. $\epsilon = 0.002 \text{ mm}$ (2μ).

5.6 Polyuréthane et vinyle.

Le tableau 1 donne les caractéristiques physiques, et le tableau 2 celles des rugosités du polyuréthane, du vinyle et du vinyle sur métallisation.

Les figures 10, 11 et 12 en donnent les résultats hydrauliques.

Les dix-neuf points expérimentaux du polyuréthane permettent de tracer une courbe se confondant pratiquement avec la courbe des « tuyaux lisses » de Prandtl-Nikuradse. La dispersion des points est assez faible.

La comparaison des figures 10 et 11 montre que le vinyle place ses treize points expérimentaux sur la même courbe que le polyuréthane.

La figure 12, ayant trait au vinyle sur métallisation, conduit à la même conclusion, sauf en ce qui concerne la dispersion des points, qui est relativement importante ici. On a multiplié les essais (27) pour améliorer la précision.

En définitive, on peut conclure que les trois revêtements accusent la même rugosité hydraulique, les plaçant sur la

courbe des « tuyaux lisses ». Ce fait interdit tout calcul, basé sur la théorie, de la rugosité absolue.

L'analyse du tableau 2 confirme la conclusion ci-dessus. En effet, les revêtements sont plus rugueux que le verre.

Pour ce dernier, on admet généralement, sans en avoir la preuve expérimentale que $\epsilon = 0,001 \text{ mm}$. Nous pensons que l'on peut adopter, en première approximation, pour le polyuréthane, le vinyle (avec ou sans métallisation préalable) $\epsilon = 0,002$ à $0,003 \text{ mm}$.

A noter enfin que les essais effectués à Fort-Randall (U.S.A.) pour $R = 1,5 \cdot 10^7$ environ, fournissent un point expérimental parfaitement placé sur notre courbe de la figure 11. De même, des essais préliminaires effectués par la Division Technique Générale (D.T.G.) de l'Electricité de France sur un tronçon de la conduite forcée du Mont-Cenis confirment la valeur de λ obtenue en laboratoire. Des mesures plus complètes, et durant plusieurs années, sont prévues sur cette conduite. Elles feront l'objet d'une publication par les organismes intéressés.

5.7 Araldite.

Les tableaux 1 et 2 en donnent les caractéristiques.

Les vingt-deux points expérimentaux sont portés sur la figure 13. On constate tout d'abord que les points se situent nettement plus bas que ceux afférents aux trois revêtements précédents. La courbe expérimentale est beaucoup plus proche de la droite de Blasius que de la courbe de Prandtl-Nikuradse.

Ce résultat est étayé par deux autres :

a) Les R.A., R.M. et « macrogéométrie » de l'araldite sont très nettement inférieures à celles des trois revêtements précédents (tableau 2).

b) La D.T.G. (E.d.F.) a effectué en mai 1964, en juin 1966 et en août 1967, avec la précision et la prudence scientifique qui lui sont coutumières, des essais de perte de charge sur la conduite industrielle des Saucés ($D = 2,50$ m). Du fait de la faiblesse relative de la longueur d'essai de la conduite (360 m), la D.T.G. a hésité avant de

permettre la publication de ce document. Si elle s'y est décidée, c'est grâce au fait que ses résultats s'extrapolent assez bien sur ceux de nos essais, la précision restant du même ordre. Les points expérimentaux de la D.T.G., dont les R_e sont compris entre $2 \cdot 10^6$ et 10^7 , sont portés sous un signe distinctif. On voit que les résultats de la D.T.G. et les nôtres, loin d'être contradictoires, se complètent, au contraire, pour permettre de tracer une courbe jusqu'à $R_e = 10^7$.

De plus les essais de la D.T.G. révèlent pratiquement la constance de la perte de charge pendant plus de trois ans.

La rugosité absolue de l'araldite peut être estimée à $\epsilon = 0,0015$.

5.8 Tenue du polyuréthane dans le temps.

Ces essais ont duré vingt-quatre mois (avril 1967 à avril 1969), à raison d'un essai tous les deux mois. Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau (dont l'influence sur la tenue est considérable pour les revêtements bitumi-

11/Vinyle. $\epsilon = 0,002$ mm (2μ).

Vinyl. $\epsilon = 0,002$ mm (2μ).

neux) ont été mesurés périodiquement. Le tableau 3 en donne la variation, qui n'est pas excessive. On peut donc raisonner sur les moyennes. En somme c'est une eau légèrement alcaline, dure et très chlorurée. Sa résistivité est grande.

Ces essais ont montré sans ambiguïté que le coefficient λ est resté constant dans le temps; on aurait pu même dire que, les premiers six mois, il a même très légèrement diminué. Cette constance s'est montrée tellement manifeste que nous n'avons pas jugé utile d'en reproduire les points. Il suffit de regarder la courbe expérimentale de la figure 10 et de la parsemer de deux cents points expérimentaux avec une dispersion de ± 4 à 8% , le premier chiffre étant valable pour les faibles R , le second pour les forts R .

5.9 Graphique général des huit revêtements.

La figure 14 reprend, sur un même graphique, l'ensemble des essais relatés ci-dessus et les présente sous une forme

recommandable pour l'emploi. Les courbes des conduites très lisses tendent vers la courbe de Blasius et non pas vers celle de Prandtl-Nikuradse.

6. — Conclusions

1. — Les résultats basés sur les théories du mouvement turbulent de Prandtl, Karman et leurs Ecoles ne paraissent pas pouvoir s'appliquer intégralement aux conduites forcées modernes, caractérisées, d'une part, par des nombres de Reynolds considérables (atteignant 10^8), d'autre part, par des rugosités relatives très faibles.

Cette conclusion a été déjà tirée dans le passé [12, 13 et 14].

2. — L'écart le plus frappant est fourni par les courbes expérimentales se situant au-dessous de la courbe des

12/ Vinyle sur métallisation. $\epsilon = 0,002 \text{ mm}$ (2μ).

Vinyl on metallic coating. $\epsilon = 0,002 \text{ mm}$ (2μ).

13/ Araldite. $\epsilon = 0,0015 \text{ mm}$ ($1,5 \mu$). / Araldite. $\epsilon = 0,0015 \text{ mm}$ ($1,5 \mu$).

conduites, dites « lisses », limite inférieure des courbes théoriques classiques. Si les courbes expérimentales relatives aux polyuréthane et vinyle se superposent pratiquement à la courbe théorique des « conduites lisses », celle afférente à l'araldite, obtenue au laboratoire et *in situ* (E.D.F. - D.T.G.) se place nettement au-dessous de la courbe limite des « conduites lisses ».

3. — Etant donné que l'espace compris entre la courbe des « conduites lisses » et celle de Blasius a été rempli, dans le passé, par de nombreuses courbes expérimentales [3 à 8, 10 à 14], il est permis de conclure que la courbe limite de Prandtl-Nikuradse peut être franchie et que les courbes expérimentales peuvent se loger entre cette courbe et celle de Blasius.

4. — Quant aux revêtements bitumineux, généralement plus rugueux que ceux en matière plastique, leurs courbes

expérimentales se placent à l'intérieur de l'abaque de Moody. Bien que ces courbes ne suivent pas exactement les courbes théoriques, il n'est pas possible d'affirmer, étant donné la précision des mesures, qu'elles s'en écartent exagérément.

5. — Les essais de vieillissement, effectués durant deux ans, montrent que le polyuréthane se conserve bien du point de vue hydraulique, et garde non augmentées les faibles pertes de charges afférentes au revêtement neuf. Il en serait de même pour l'araldite, expérimentée par E.D.F. - D.T.G. sur la conduite des Saucés.

Cette précieuse qualité différencie très avantageusement le polyuréthane et l'araldite (peut être aussi le vinyle) par rapport aux revêtements bitumineux dont le vieillissement, de l'ordre de deux ans, se traduit toujours par des pertes d'énergie importantes [16 à 18].

14/ Abaque récapitulatif des huit revêtements / Comparison of the eight coatings.

15/ Conduite industrielle revêtue d'émail appliqué à la brosse.
Industrial pipe coated with brush-applied enamel.

16/ Conduite industrielle revêtue d'émail lissé à la palette (conduite de Montahut, $D = 2,7$ m).
Industrial pipe coated with enamel smoothed with a palette (Montahut pipe, $D = 2.7$ m).

17/ Conduite industrielle revêtue de polyuréthane.
(Conduite du Mont-Cenis, $D = 3,7$ m.)
Industrial polyurethane-coated pipe (Mont-Cenis
conduit, $D = 3.7$ m).

7. — Bibliographie

- [1] COLEBROOK (F.). — Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws. *Journ. Inst. Civ. Eng.*, London, vol. II, 1938-39.
- [2] MOODY (L.). — Friction factors for pipe flow. *Trans. A.S.M.E.*, November 1944.
- [3] BRADLEY and THOMPSON. — Friction factors for large conduits flowing full. Eng. Monogr., U.S. dep. Int., Bur of Recl., March 1951.
- [4] RÉMÉNIÉRAS (G.). — Le coefficient de perte de charge des grandes conduites. *Technique moderne, Construction*, n° 3, 1953.
- [5] GOLDSTEIN. — Modern developments in fluid Mechanics. *Clarendon Press*, 1938.
- [6] HUNSAKER and RIGHTMIRE. — Engineering application of fluid mechanics. *Mc Graw Hill*, 1947.
- [7] BLENCH. — Les formules d'écoulement et d'hydraulique pratique. *La Houille Blanche*, n° 4, 1952.
- [8] BLENCH. — Théorie de l'écoulement turbulent. *La Houille Blanche*, n° 3, 1946.
- [9] BLASIUS. — Das Ähnlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgängen in Flüssigkeiten. *Forschung Ing. Wes.*, n° 131, 1913.
- [10] HICKOW, PETERKA and ELDER. — Friction coefficient in a large tunnel; an discussion. *Trans. A.S.C.E.*, 1948.
- [11] BRADLEY and WING. — Discussion on [10]. *Trans. A.S.C.E.*, 1948.
- [12] W.E.S. — Hydraulic design of reservoir outlet structures *Engin. Manual*, 1110-2. 1602, Washington, 1963.
- [13] Factors influencing flow in large conducts. *Proceed. A.S.C.E.*, No HY 6, November 1965.
- [14] LEVIN (L.). — Difficultés du calcul des pertes de charge linéaires dans les conduites forcées. *La Houille Blanche*, N° 1, 1966.
- [15] ALTSCHOUL. — Lois essentielles du mouvement turbulent dans les conduites techniques (en russe). *Technique sanitaire*, n° 6, 1957.
- [16] MATHIEU (R.). — La protection intérieure des conduites. *Bulletin Bitumastic*, n° 5, 1939.
- [17] Report of Committee on Pipe Line Friction Coefficients and effect of age thereon, September 1935.
- [18] WILLIAMS and HAZEN. — Hydraulic Tables. *New York Editions*, 1965, 1908, 1920.