Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 96 (1970)
Heft: 21

Artikel: Calcul hydraulique des canalisations dites "à parois lisses"
Autor: Bruschin, J.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-70875

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

532.542

O. F. 4

Communications du Laboratoire d'hydraulique de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne
Directeur : M. le professeur D. Bonnard

Calcul hydraulique des canalisations dites « à parois lisses »

par J. BRUSCHIN, chef de section

Les progrès de la technologie de fabrication des tuyaux en matériaux traditionnels et l'apparition de techniques nouvelles liées à la production des tuyaux en matières synthétiques, appellent une réévaluation parallèle des méthodes de calcul, conduisant, comme nous le montrerons, à abandonner la formule bien connue de Strickler pour les calculs des tuyaux de fabrication industrielle.

1. Lois de pertes de charge

Si l'on calcule l'effort tangentiel moyen à la paroi τ_o produit par l'écoulement d'un fluide visqueux dans une canalisation ou un lit, on obtient l'expression :

$$\tau_o = \gamma R J \tag{1}$$

avec :

γ = poids spécifique du fluide ;
R = rayon hydraulique ;
J = perte de charge par unité de longueur.

Cette relation peut être écrite sous la forme :

$$\frac{\tau_o}{\rho} = g R J \tag{2}$$

$\gamma = \rho g$, ρ = masse spécifique du fluide,

et l'on remarque que dimensionnellement :

$$\left| \frac{\tau_o}{\rho} \right| = \left| v \right|^2 \qquad v = \text{vitesse}$$

d'où la notation :

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} \tag{3}$$

v_* étant appelée la *vitesse de cisaillement*.

Le bon sens et des considérations dimensionnelles indiquent que la seule relation possible entre v (vitesse moyenne de l'écoulement) et v_* est du type :

$$v \sim v_* \tag{4}$$

ou

$$\frac{v}{v_*} = f \tag{5}$$

avec f une fonction de paramètres sans dimensions.

En 1768, Antoine Chézy, ingénieur de la ville de Paris, proposa la relation :

$$\frac{v}{v_*} = \text{cte}$$

sous la forme, déduite de (2) :

$$\frac{v^2}{RJ} = C^2 \quad \text{d'où} \quad v = C\sqrt{RJ} \tag{6}$$

On peut observer que $C = f\sqrt{g}$ ce qui confère des dimensions au coefficient C. Or, on ne tarda pas à constater que C varie avec les dimensions des tuyaux et Gauckler (1868) puis Hagen (1881) proposèrent la relation :

$$C \sim R^{1/6} \tag{7}$$

qui conduisit à la formule attribuée par Flamant à Manning (1891) :

$$v = \frac{R^{2/3} J^{1/2}}{n} \tag{8}$$

n = coefficient de rugosité

connue en Europe sous la forme employée par Strickler (1923) :

$$v = K R^{2/3} J^{1/2} \tag{9}$$

avec

$$K = \frac{1}{n}$$

D'autre part, l'analyse dimensionnelle livre pour les canalisations cylindriques de section circulaire :

$$J = \lambda \frac{v^2}{2g D} \tag{10}$$

ou

$$v = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}\sqrt{RJ} \tag{11}$$

λ = coefficient de perte de charge sans dimensions ;
D = diamètre intérieur de la canalisation avec la relation $D = 4R$;

formule proposée en 1845 par Weissbach.

On constate que :

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \text{ et que } f \sim \frac{1}{\sqrt{\lambda}}$$

Des progrès décisifs en ce domaine furent accomplis sous l'impulsion de l'école de Göttingen : Prandtl, Blasius et Nikuradse et par les chercheurs anglais Colebrook et White.

En effet, c'est en 1932 et 1933 que Nikuradse publia les résultats de ses essais sur tuyaux à rugosité artificielle uniforme (grains de sable calibrés collés aux parois) complétés de 1937 à 1939 par les essais sur tuyaux à rugosité non uniforme et tuyaux industriels de Colebrook et White qui proposèrent la relation :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3{,}7D} + \frac{2{,}51}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \tag{12}$$

ε ou k = rugosité absolue équivalente (dimension des aspérités d'un tuyau à rugosité uniforme produisant la même perte de charge, toutes autres conditions inchangées). Cette notion a été introduite pour pouvoir profiter directement des résultats expérimentaux obtenus par Nikuradse ;

$Re = \frac{vD}{\nu}$, nombre de Reynolds ;

ν = viscosité cinématique du fluide.

En nous souvenant que $f \sim \frac{1}{\sqrt{\lambda}}$ on constate que

$$f \text{ ou } \lambda = f\left(\frac{\varepsilon}{D}, Re\right) \qquad (13)$$

ce qui vérifie la proposition initiale posée sous (5). Le rapport ε/D est défini comme la rugosité relative des parois.

La fonction (12) n'est qu'une combinaison astucieuse et correspondant aux faits expérimentaux, des lois trouvées par voie théorique (à partir de la théorie générale de la couche limite) et expérimentale par Prandtl et Nikuradse, soit :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \frac{Re\sqrt{\lambda}}{2{,}51} \qquad (14)$$ lorsque $\frac{\varepsilon}{D}$ très petit devant Re^{-1} (Prandtl)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \frac{3{,}7D}{\varepsilon} \qquad (15)$$ lorsque Re^{-1} petit devant $\frac{\varepsilon}{D}$ (Nikuradse)

où seuls les coefficients numériques sont expérimentaux [1]. De (10) et (14) on obtient la loi des pertes de charge dans les tuyaux dits lisses (se comportant comme si $\varepsilon = 0$), de (10) et (15) celle des tuyaux dits rugueux. De (10) et (12) on obtient une loi valable pour l'ensemble du domaine des écoulements turbulents y compris la zone de transition entre (14) et (15) — lorsque Re^{-1} et ε/D sont des valeurs comparables — qui s'écrit pour les tuyaux cylindriques circulaires :

$$v = -2\sqrt{2g}\ \sqrt{DJ}\ \log\left[\frac{\varepsilon}{3{,}7D} + \frac{2{,}51\,\nu}{D\sqrt{2g}\ \sqrt{DJ}}\right] \qquad (16)$$

Cette loi, aboutissement de près de deux cents ans de recherches, paraît singulièrement compliquée, comparée aux formes proposées par Chézy ou par Gauckler (Manning-Strickler), mais elle est autrement plus intéressante par sa généralité et par ses fondements théoriques et expérimentaux.

2. Les tuyaux « lisses » — un cas particulier ?

Si, dans le domaine des tuyaux « rugueux », la loi de Manning-Strickler donne des résultats comparables à ceux obtenus de (16), il n'en sera pas de même dans les zones lisses et de transition où son utilisation est en contradiction avec la théorie et les faits d'expérience. Or, il se trouve que la quasi-totalité des tuyaux produits industriellement de nos jours sont, dans les conditions courantes d'utilisation, des tuyaux dits lisses, c'est-à-dire se situant au point de vue hydraulique en zone lisse ou de transition, la notion de « tuyau lisse » s'étant, à la faveur des circonstances, quelque peu généralisée.

La forme rébarbative de la loi de Colebrook-White transcrite en (16), qui a constitué pendant longtemps un obstacle pour beaucoup, a fait récemment l'objet d'une tabulation rendant son emploi extrêmement aisé [1]. L'entrée des abaques se fait à partir de grandeurs communément employées par les ingénieurs : v, D, J en % et Q (débit).

D'autre part, de nombreux essais exécutés un peu partout dans le monde, dont ceux du Laboratoire d'hydraulique de l'EPF (LHYDREP) pour les tuyaux en PVC dur (fabrication SYMALIT), ont permis de déterminer les valeurs de ε (k) pour les principaux types de parois — voir [1], [2], [3] [2] — ce qui fait que cette difficulté est aussi levée.

Si tous les éléments semblent ainsi réunis pour l'adoption de la méthode de calcul la mieux adaptée au problème hydraulique des tuyaux lisses, l'ingénieur praticien pourrait encore se poser les questions suivantes :

- la relation entre le débit ou la vitesse les coefficients de Chézy, Manning ou Strickler était évidente. Il suffisait, par exemple, de diminuer C ou K (augmenter n) pour se prémunir contre la détérioration de la qualité des parois (vieillissement). Cette manipulation des coefficients était associée directement et simplement à la notion de sécurité, profondément ancrée dans tous les esprits. Qu'en sera-t-il avec la loi (16) ?
- Sachant que les coefficients numériques de (16) ont été déterminés par Nikuradse pour des canalisations en charge (pleines), comment calculer les canalisations partiellement remplies ?
- La viscosité cinématique ν varie avec la température de 1,794 à 0,296 en 10^6 m²/s pour l'eau de 0 à 100°C respectivement. Est-ce un élément important du calcul ?

Nous essayerons de répondre à ces questions aux chapitres suivants.

3. Où est la sécurité ?

Considérons les deux lois :

$$v = K R^{1/6}\sqrt{RJ} \quad \text{(Strickler)}$$

$$\text{et} \quad v = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}\sqrt{RJ} \quad \text{(Darcy-Weissbach)}$$

Si l'on diminue la valeur de K par rapport aux valeurs recommandées, il en résultera une diminution égale (en %) de v et un accroissement identique de la section nécessaire pour passer le débit demandé. Si K diminue effectivement par suite du vieillissement, la capacité de transport « de projet » ne sera pas affectée, dans le cas contraire, l'excédent ira grossir les éventuelles réserves du réseau. On pourrait faire le même raisonnement sur λ à ceci près que :

$$\frac{dv}{v} = -\frac{1}{2}\frac{d\lambda}{\lambda} \qquad (17)$$

c'est-à-dire qu'une augmentation relative de λ ne correspondra qu'à une diminution relative de moitié de la vitesse. Il se trouve toutefois que λ n'apparaît pas de façon explicite dans les abaques mentionnés, le choix de l'abaque s'effectuant en fonction de ε. Comment se répercutera sur v

[1] Les coefficients numériques ont été légèrement modifiés par rapport aux valeurs primitives pour mieux ajuster la courbe théorique aux valeurs expérimentales.

[1] Ministry of Technology : *Charts for the Hydraulic Design of Channels and Pipes*, 3e édition (metric units), London 1969.

[2] Les numéros entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

une modification de ε ? Dans le cas des parois lisses λ n'est pas fonction de ε (ou ε/D) et une modification de ce dernier n'aura *aucune* répercussion sur v aussi longtemps que les limites du domaine lisse ne sont pas transgressées. A l'autre extrémité, pour les parois rugueuses :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \frac{\varepsilon}{3{,}7D}$$

$$\text{avec} \quad \frac{d\lambda}{\lambda} = -2 \frac{d\,(\lambda^{-1/2})}{\lambda^{-1/2}} \tag{18}$$

et dérivant par rapport à ε/D, on a :

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = -2 \frac{d(\varepsilon/D)}{\varepsilon/D} \frac{0{,}43}{\log \dfrac{\varepsilon}{3{,}7D}} \tag{19}$$

et de (17) $$\frac{dv}{v} = \frac{d(\varepsilon/D)}{\varepsilon/D} \frac{0{,}43}{\log \dfrac{\varepsilon}{3{,}7D}} \tag{20}$$

lorsque $10^{-2} < \varepsilon/D < 10^{-5}$

$$\frac{dv}{v} = -0{,}0775 \text{ à } -0{,}174 \frac{d(\varepsilon/D)}{\varepsilon/D} \tag{21}$$

soit $$\frac{dv}{v} \simeq -\left(\frac{1}{6} \text{ à } \frac{1}{12}\right) \frac{d(\varepsilon/D)}{\varepsilon/D} \tag{22}$$

Il faut donc, en moyenne, augmenter de *100* % la rugosité relative pour obtenir une diminution de *10* % de la vitesse !

Dans la zone de transition, ce rapport (10 : 1) ne fera, bien entendu, que s'accroître comme le prouve d'ailleurs un examen de l'équation :

$$\frac{dv}{v} = \frac{d(\varepsilon/D)}{\varepsilon/D} \frac{0{,}43}{\left(1 + \dfrac{9{,}3\ \nu}{\varepsilon A}\right) \log B} \tag{23}$$

obtenue de la même manière que (20)

avec $A = \sqrt{2gDJ}$ (24) et $B = \dfrac{\varepsilon}{3{,}7D} + \dfrac{2{,}51\nu}{DA}$ (25)

Le terme entre parenthèses de (23) étant supérieur à l'unité, alors que $\log B < 0$ et $|\log B| > \left|\log \dfrac{\varepsilon}{3{,}7D}\right|$ la valeur du multiplicateur de $\dfrac{d(\varepsilon/D)}{\varepsilon/D}$ est évidemment plus petite en (23) qu'en (20). On pourra donc augmenter ε/D de *200 à 300* % sans pratiquement répercuter cette augmentation sur la vitesse !

Tout ceci montre combien la notion de sécurité deviendrait imprécise si on voulait la lier, dans les domaines lisses et de transition, à la rugosité comme certains l'ont fait. Il nous paraît bien plus clair et plus simple de l'associer au diamètre des tuyaux. Ainsi de (11) et admettant que la modification de D reste petite (λ pratiquement constant) :

$$\frac{dv}{v} = 0{,}5 \frac{dD}{D} \tag{26}$$

$$\frac{dQ}{Q} = 2{,}5 \frac{dD}{D} \tag{27}$$

et de (10) avec $v = Q/\dfrac{\pi D^2}{4}$

$$\frac{dJ}{J} = -5 \frac{dD}{D} \tag{28}$$

soit une augmentation de 10 % du diamètre permet une augmentation de 5 % de la vitesse ou de 25 % du débit pour une même perte de charge et correspond à une diminution de 50 % de la perte de charge pour un même débit.

4. Canalisations partiellement remplies

Dans la publication du « Ministry of Technology » déjà mentionnée, ce problème est résolu en admettant à priori que les coefficients numériques de Nikuradse restent inchangés. On obtient dans ce cas les expressions suivantes :

Zone lisse : $$v_p = \left(1 + \frac{\log R_p}{\log 0{,}54D\ (2gJ/\nu^2)^{1/3}}\right)\sqrt{R_p} \tag{29}$$

Zone rugueuse : $$v_p = \left(1 + \frac{\log R_p}{\log 3{,}7D/\varepsilon}\right)\sqrt{R_p} \tag{30}$$

Transition : $$v_p = \left(1 + \frac{\log R_p}{\log 3{,}7\ \theta}\right)\sqrt{R_p} \tag{31}$$

$$\text{avec } \theta \simeq \left(\frac{\varepsilon}{D} + \frac{1}{3600\ D\ J^{1/3}}\right)^{-1}$$

où les paramètres indicés p sont les rapports d'une même grandeur pour la section pleine et celle partiellement remplie, donc sans dimensions. Ainsi $v_p = \dfrac{v}{v_o}$, v_o correspondant à la section pleine. Ces formules sont transposées dans un graphique d'un usage très facile.

Il reste toutefois que l'hypothèse de départ est infirmée par l'expérience. Nous montrerons ci-après qu'elle est malgré cela une approximation admissible lorsque les canalisations sont au moins remplies jusqu'au quart de leur hauteur (D).

Les mesures effectuées sous la direction du professeur Kirschmer (Darmstadt) donnent les valeurs suivantes pour les coefficients numériques cités :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \frac{Re\sqrt{\lambda}}{a} \tag{32} \quad \text{et} \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \frac{bD}{\varepsilon} \tag{33}$$

Degré de remplissage (%)	a	b	Déterminés par
100	2,51	3,7	Nikuradse
50	2,7	3,45	Bock
25	3,26	2,7	Bock

En calculant v_p pour le domaine lisse (les calculs sont fastidieux), nous obtenons :

$$v_p = v_{po} - \frac{2}{3}\sqrt{R_p} \frac{\log a_p}{\log 0{,}54D\ (2gJ/\nu^2)^{1/3}}^{1/3} \tag{34}$$

où nous avons noté par v_{po} la valeur de v_p correspondant à

$a = 2{,}51$ et $a_p = \dfrac{a}{a_o}$ avec les mêmes significations que précédemment.

On constate d'emblée que $v_p < v_{p\,o}$. Toutefois, si l'on examine un cas pratique proche de la limite d'emploi :

$$D = 100 \text{ mm},\ J = 2\,{}^0/_{00},\ t/D = \frac{1}{4} \text{ on obtient}$$

$$v_p = 0{,}965\ v_{po}$$

ce qui nous paraît admissible.

Pour le domaine rugueux, l'on obtient de la même manière :

$$v_p = v_{po} - \frac{\log b_p}{\log \dfrac{\varepsilon}{3{,}7\,D}} \sqrt{R_p} \qquad (35)$$

soit pour un degré de remplissage de 25 % et $10^{-2} < \varepsilon/D < 10^{-5}$

$$v_p = v_{po} - (0{,}335 \text{ à } 0{,}155)\ \sqrt{R_p}$$

et $v_p = 0{,}62\ v_{po}$ dans le cas le plus défavorable ($\varepsilon/D = 10^{-2}$), ce qui n'est vraiment pas admissible. Pour $t/D = 0{,}5$ toutefois :

$$v_p = 0{,}9914\ v_{po}$$

La zone de transition conduira à des valeurs intermédiaires et nous pouvons affirmer que, dans l'ensemble, l'utilisation des graphiques cités est admissible pour des degrés de remplissage supérieurs à 25 % — au-delà de 50 % les résultats obtenus seront exacts à moins de 1 % dans les cas courants.

5. Influence de la viscosité

Les abaques étant construits pour l'eau pure à 15°C, on peut se demander ce qui se passe lorsque ces conditions ne sont pas remplies. En considérant les formules (12), (14) et (15) on constate que seule la viscosité cinématique est sujette à variations en fonction de la température ou de la nature du fluide. Cela se traduira par une modification correspondante des conditions d'écoulement dans les domaines lisse et de transition. Les « charts » anglaises permettent de corriger la vitesse v_{15} à l'aide de la formule :

$$v = v_{15} + a_{15}\ t + b\ t^2{}_{15} \qquad (36)$$

a et b étant tabulées et $t_{15} = t_{réel} - 15°\text{C}$.

Pour une canalisation $D = 100$ mm avec $J = 2{,}35$ %

$$0{,}96 < \frac{v}{v_{15}} < 1{,}03$$

lorsque $2° < t < 25°\text{C}$

Si l'on désire modifier directement la viscosité, on cherchera d'abord la température à laquelle l'eau pure aura la viscosité désirée. Une autre possibilité est d'utiliser l'abaque universel proposé par la même publication.

6. Conclusions

Le calcul des pertes de charge apparaît encore à beaucoup comme un domaine en jachère où les formules poussent comme les mauvaises herbes et l'ingénieur est le plus souvent livré à lui-même. Nous avons tenté de montrer qu'il n'en est rien et qu'au contraire les recherches dans ce domaine, parfaitement structuré d'ailleurs, ont abouti à la création d'un outil puissant par sa généralité et d'un emploi aisé : la loi de Darcy-Weissbach combinée avec la formule de Colebrook-White. C'est l'outil qu'il convient d'utiliser dans le cas des tuyaux dits « à parois lisses » et nous pensons avoir pu résoudre ici certains problèmes d'application.

BIBLIOGRAPHIE

[1] *Charts for the Hydraulic Design of Channels and Pipes*. Ministry of Technology, 3e édition, 1969.

[2] L. Levin : *Formulaire des conduites forcées, oléoducs et conduits d'aération*. Paris 1968.

[3] Press, Schröder : *Hydromechanik im Wasserbau*. Berlin 1966.

[4] R. Schröder : *Einheitliche Berechnung gleichförmiger turbulenter Strömungen in Rohren und Gerinnen*. Der Bauingenieur, 5-1965.

[5] W. B. Webber : *Fluid mechanics for civil engineers*. London 1965.

[6] O. Kirschmer : *Reibungsverluste in Rohren und Kanälen*. Das Gas und Wasserfach 50, 1966.

[7] *Friction Factors in Open Channels*. Task Force of the Committee on Hydromechanics (ASCE). Journal of the Hydraulics Division, mars 1963.

Adresse de l'auteur :
J. Bruschin, Laboratoire d'hydraulique de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 67, rue de Genève, 1004 Lausanne.

Divers

Forum 2000

Dans le cadre de la Quinzaine consacrée à l'industrialisation de la construction à l'Ecole polytechnique fédérale, nous avons le plaisir de vous convier aux manifestations suivantes :

1. *Exposition*

Thème : « L'industrialisation de la construction ».
Lieu : Aula EPFL, 33, avenue de Cour, Lausanne.
Date : Du mardi 27 octobre au samedi 14 novembre 1970.
Organisation : La chaire de construction du département d'architecture de l'EPFL.

2. *Forum 2000*

Thème : « Bâtir, pourquoi ? », table ronde suivie d'un débat public, dirigée par M. *Bernard Nicod*, chef du département de l'actualité nationale à la Radio suisse romande.
Avec la participation de MM. *J. Brolliet*, promoteur, Genève ; *E. Bertholet*, notaire, Bex ; *P. Conne*, sociologue, Lausanne ; *A. Décoppet*, architecte, Lausanne ; *U. Fovanna*, architecte, Lausanne ; *J. Yokoyama*, ingénieur, Lausanne ; *J. Quéloz*, secrétaire du Mouvement populaire des familles, Lausanne ; un représentant des autorités.
Lieu : Aula EPFL, 33, avenue de Cour, Lausanne.
Date : Le jeudi 29 octobre 1970, à 20 h. 30.
Organisation : AVA, FAS, FSAI, SDT, SVIA, UTS, UVDG.

3. *Conférence*

Thème : « La préfabrication en Suisse », conférence publique avec projections, suivie d'un débat dirigé par M. *Gyula Turcsányi*, architecte, membre CRB (Centre de rationalisation du bâtiment).
Conférenciers : M. *P. Martignier*, ingénieur-technicien ETS, directeur : « Le procédé Stahlton-Prébéton » ; M. *Kunvári*, polytechnicien, directeur : « Le système Tracoba » ; M. *S. Jankovics*, architecte SIA : « Les systèmes ouverts et modulés » ; et, en conclusion : M. *T. Koncs*, Dr ès sciences, ingénieur SIA : « L'avenir de la préfabrication en Suisse ».
Lieu : Aula EPFL, 33, avenue de Cour, Lausanne.
Date : Le mercredi 4 novembre 1970, à 20 h. 30.
Organisation : Le Groupe des architectes de la SVIA, Lausanne.