

Zeitschrift:	Bulletin technique de la Suisse romande
Band:	52 (1926)
Heft:	7
Artikel:	Calcul de la perte de charge dans les galeries sous pression, lors de l'écoulement de l'eau en régime permanent
Autor:	Calame, Jules / Gaden, Daniel
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-40272

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: 19.02.2026

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

ARTICLE 11.

Les Etats dont la législation ne serait pas dès à présent suffisante pour assurer l'exécution de la présente convention prendront les mesures et édicteront les sanctions nécessaires à cet effet.

ARTICLE 12.

Les juges du lieu d'immatriculation seront compétents pour juger les contraventions aux articles 3 et 4. Les autorités du lieu où l'infraction aura été constatée seront compétentes pour la poursuite et la répression des infractions aux articles 7, 8, 9 et 10.

ARTICLE 13.

La présente convention n'est pas applicable :
1^o aux bâtiments et embarcations de guerre ; 2^o aux bateaux d'Etat exclusivement affectés au service d'une administration publique.

Elle n'est pas obligatoire pour : 1^o les bateaux de plaisance ; 2^o les bateaux d'un déplacement inférieur à vingt tonnes métriques au plus grand enfoncement autorisé par les règlements sur les différentes voies navigables que le bateau est destiné à fréquenter.

ARTICLE 14.

Les Etats contractants s'engagent à se communiquer réciproquement les dispositions d'ordre législatif ou réglementaire prises par chacun d'eux pour assurer l'exécution de la présente convention.

ARTICLE 15.

Aucune des dispositions de la présente Convention ne doit être interprétée comme portant atteinte aux droits des Etats non contractants sur les voies d'eau internationalisées.

Projet de convention relatif à la reconnaissance internationale des hypothèques fluviales.

(Texte adopté en première lecture.)

ARTICLE PREMIER.

Les hypothèques parmi lesquelles on comprend les gages et autres sûretés réelles conventionnelles sur bateaux, régulièrement établies d'après les lois de l'Etat contractant où le bateau est immatriculé et inscrites sur un registre public de cet Etat, seront considérées comme valables et respectées dans tous les autres Etats contractants. Elles y produiront les mêmes effets que dans celui d'immatriculation.

ARTICLE 2.

Les effets du transfert volontaire de propriété sur les hypothèques sont soumis à la loi visée à l'article 1. Toutefois, le transfert n'entraînera extinction de l'hypothèque, purge ou autre effet analogue, que si l'effet est prévu par les lois de l'Etat contractant sur le territoire duquel le bateau se trouve au moment de la déclaration introductory de la procédure de purge ou autre, faite par l'acquéreur.

ARTICLE 3.

Dans le cas où le transfert de propriété, volontaire ou forcé, entraîne l'extinction, la purge ou autre effet analogue, la procédure à suivre est fixée par la loi du pays où le bateau se trouve. Les dispositions de cette loi comporteront une notification de la vente, faite un mois avant cette dernière, à l'autorité chargée de la tenue des registres sur lesquels les hypothèques sont inscrites.

ARTICLE 4.

Si le bateau est immatriculé dans un autre Etat contractant, les créances hypothécaires deviennent exigibles.

La radiation de l'immatriculation sur le registre primitif ne pourra être effectuée que du consentement des créanciers hypothécaires.

Ces créanciers ont le droit de faire reporter leurs inscriptions sur le registre du nouvel Etat. Ces inscriptions produiront désormais les effets qui leur sont attachés par la nouvelle loi.

Calcul de la perte de charge dans les galeries sous pression,

lors de l'écoulement de l'eau en régime permanent,

par JULES CALAME et DANIEL GADEN,
Ingénieurs aux Ateliers des Charmilles S. A., Genève.

NOTE DE LA RÉDACTION. — Nous sommes heureux de pouvoir reproduire ci-dessous quelques-unes des bonnes feuilles d'une « Théorie des chambres d'équilibre » que MM. Calame et Gaden vont faire paraître prochainement par les soins des « Editions La Concorde »¹, à Lausanne.

La « Théorie des Chambres d'équilibre » forme, à vrai dire, un tout homogène qu'il est difficile de dissocier pour en donner une image réduite ; c'est un exposé qui doit être lu par qui prétend connaître le fonctionnement des installations hydrauliques modernes. Aussi avons-nous préféré offrir à nos lecteurs la primeur d'une intéressante étude comparative, qui constitue un appendice à l'ouvrage précité et qui traite des divers coefficients utilisés de nos jours pour le calcul ordinaire de la perte de charge provoquée, dans une galerie sous pression, lors de l'écoulement en régime permanent. Sujet actuel, souvent controversé, et sur lequel MM. Calame et Gaden nous paraissent développer de claires et judicieuses considérations.

Les formules classiques utilisées dans le calcul de la perte de charge se présentent généralement sous les deux formes suivantes :

Ou bien on se rattache aux essais exécutés sur des conduites sous pression de section circulaire et l'on pose dans la forme de Darcy :

$$P_{wo} = \varphi \cdot \frac{L}{\mathcal{R}} \cdot \frac{W_o^2}{2g} = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{W_o^2}{2g} \quad (a)$$

expression dans laquelle :

L désigne la longueur de la galerie sous pression,
 \mathcal{R} le rayon hydraulique de sa section,
et D son diamètre, si la section est circulaire ou peut être pratiquement considérée comme telle,

W_o la vitesse moyenne en régime permanent,
 P_{wo} la perte de charge correspondant à la vitesse W_o ,
 φ et $\lambda = 4\varphi$ les coefficients de frottement qui restent à préciser selon la nature de la paroi de la galerie ;

ou bien on recherche l'analogie avec les conduites à libre écoulement en partant de la formule de Chezy :

$$W_o = C \sqrt{\mathcal{R} J}$$

dans laquelle $J = P_{wo} : L$ désigne la perte de charge par unité de longueur de conduite ; ce qui revient à écrire :

$$P_{wo} = \frac{L}{\mathcal{R}} \cdot \frac{W_o^2}{C^2} = \frac{8g}{C^2} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{W_o^2}{2g} \quad (b)$$

¹ Voir la note sous la rubrique « Bibliographie », dans ce numéro.

Quand la section de la galerie a une forme peu différente d'un cercle, il est suffisant, dans un *avant-projet*, de calculer le diamètre du cercle équivalent et d'évaluer la perte de charge par une formule du type de (a). On utilise alors volontiers l'ancien coefficient de *Lang* (1907) valable quand $D > 0,05$ m. et $W_o > 0,70$ m/s. et quand la température moyenne de l'eau est d'environ 10° :¹

$$(Lang) \quad \lambda = a + \frac{0,002}{\sqrt{W_o \cdot D}} \quad (e)$$

avec $a = 0,012$, quand il s'agit d'une conduite neuve dont les parois sont parfaitement lisses ; avec $a = 0,020$, quand il s'agit d'une galerie déjà en service, c'est-à-dire présentant un certain degré de rugosité, mais pas cependant de dépôt irrégulier sur le radier.

Ce coefficient offre un avantage, surtout pour un calcul provisoire, c'est de ne pas nécessiter d'hypothèse prématuée sur la nature des parois et il faut reconnaître qu'il donne en général, pour des galeries sous pression de grand diamètre, des résultats satisfaisants.

Des deux valeurs de a , la seconde sera utilisée pour le calcul de la perte de charge *normale*, de celle qui se présentera après quelques années d'exploitation de l'usine, si l'état de la galerie, légèrement usé, demeure bien entretenu ; on utilisera ce coefficient avec une sécurité suffisante, dans tous les calculs où la perte de charge apparaît d'une manière défavorable, par exemple lors de la descente de la colonne liquide dans une chambre d'équilibre, à la suite d'une *ouverture* de la turbine.

La première valeur $a = 0,012$ sera utilisée, au contraire, dans tous les cas où l'action du frottement est favorable, notamment dans une chambre d'équilibre, lors de la montée consécutive à une *fermeture* de la turbine ou bien dans la recherche de la *stabilité du réglage* à l'aide de la formule de *Thoma*.

A vrai dire, la valeur de λ n'est pas immuable, elle *varie* avec la durée d'exploitation. Si, après un certain temps d'exploitation, on effectuait un essai pour évaluer le coefficient λ , on trouverait probablement qu'il aurait atteint une valeur intermédiaire entre les deux indiquées. Mais l'utilisation de ces deux valeurs à bon escient dans le calcul des ouvrages aura permis d'éviter toute surprise désagréable, dès le début de la mise en marche.

Le coefficient $a = 0,020$ de *Lang* donne, dans le calcul des galeries sous pression, des résultats bien plus proches de la réalité que ceux qu'on obtiendrait à l'aide des abaques classiques concernant les conduites sous pression. Il n'y a rien là d'étonnant. Il ne faut pas oublier,

¹ La température n'influe que sur le second terme dont le nomenclateur prend, d'après des essais ultérieurs de *Lang*, les valeurs suivantes :

0,0023	0,0020	0,0018	20° Centigrades.
à 0°			

en effet, que les formules anciennes ont été établies sur la base de conduites métalliques de diamètre relativement faible, dans lesquelles le rôle du frottement est comparativement beaucoup plus important que dans des galeries de grand diamètre.

Ce n'est donc pas faire un grief aux abaques communément répandus que de suspecter leur valeur dans le calcul qui nous préoccupe ici, c'est simplement éviter que, sans changer leurs coefficients, on abuse de leurs résultats en les extrapolant hors de propos¹.

Entre les deux valeurs du coefficient de *Lang*, il y a évidemment place pour des états intermédiaires. *M. Lang* lui-même a proposé d'ailleurs diverses autres formules², qui intéressent surtout des conduites métalliques, en tenant compte de la nature et de la rugosité de leurs parois.

La formule qui, sous la forme (a), paraît pouvoir être utilisée dans un calcul définitif avec le plus de chance d'exactitude, c'est la formule de *Biel* (1907), établie sur la base de tous les essais alors connus. Elle est valable pour l'écoulement tourbillonnaire tel qu'il s'établit au delà de la vitesse critique définie par *Reynolds*, c'est-à-dire toujours, dans le cas d'une galerie d'aménée³.

Le coefficient de *Biel* s'écrit, \mathfrak{R} désignant le rayon hydraulique de la section :

$$(Biel) \quad \varphi = 0,0196 \left\{ 0,12 + \frac{b}{\sqrt{\mathfrak{R}}} + \frac{c(t^0)}{W_o \sqrt{\mathfrak{R}}} \right\} \quad (d)$$

ou, si la section est circulaire, $\mathfrak{R} = \frac{D}{4}$:

$$\lambda = 0,0785 \left\{ 0,12 + \frac{2b}{\sqrt{D}} + \frac{2c(t^0)}{W_o \sqrt{D}} \right\} \quad (d_1)$$

Cette formule a été établie en respectant la loi de similitude des sections vis-à-vis de l'écoulement, énoncée en son temps par *Reynolds*. Le facteur b , dépendant de la rugosité des parois, le facteur c , du degré de cohésion moléculaire et de la température de l'eau, ont été fixés pour cinq degrés successifs qui paraissent correspondre,

¹ Ainsi l'abaque correspondant à la formule de *Flamant* pour les tuyaux légèrement incrustés : $J = 0,00092 W_o^{7/4} D^{-5/4}$ conduirait à des pertes de charge trop faibles quand D dépasse 1,0 à 1,20 m. Celui de *Maurice Lévy* correspondant à la forme

$$W_o = 14,5 \sqrt{D} J (1 + 2,12 \sqrt{D})$$

établi pour des conduites fortement incrustées conduirait, au contraire, à des pertes exagérées. Il ne convient pas non plus d'utiliser les abaques de *Darcy* ou de *Weisbach*, qui ont été établis dans des conditions trop différentes pour donner ici des résultats fondés dans tous les cas.

² Citées par exemple dans *Forchheimer* — *Hydraulik*, p. 55 Berlin (Teubner) 1914 et dans *R. Winkel*, — *Hydromechanik der Druckrohrleitung*, p. 27. Munich (Oldenbourg) 1919.

³ En effet la deuxième vitesse critique ou vitesse critique supérieure a pour valeur approximative, à la température de 15° :

pour D	= 0,50	1,00	2,00	3,00	m.
W_{critique}	= 0,0294	0,0147	0,0073	0,0049	m/s.

en ce qui concerne une galerie sous pression, aux modes d'exécution suivants :

Catégorie	Paroi métallique	Revêtement en maçonnerie ou en bois
I.	Conduite polie sans joint apparent (soudé ou rivé), tuyau en cuivre, en plomb.	(Conduite en verre).
II.	Conduite goudronnée en tôle, tubes à gaz neufs en fer forgé, fer blanc ou zingué.	Enduit fin lissé dans tuyaux en ciment. Planches rabotées, jointives.
III.	Tuyaux neufs en fonte.	Mortier de ciment sur revêtement régulier de béton.
IV.	—	Béton brut. Planches brutes assemblées.
V.	—	Pierre de taille. Briques.

Les facteurs b et c ont les valeurs suivantes :

Catégorie N°	I	II	III	IV	V
Coefficient de rugosité $b =$	0,0064	0,018	0,036	0,054	0,072
Coefficient de viscosité à 12° C $c(10) =$	0,0118	0,0088	0,0057	0,0032	0,0032

Remarquons cependant que la catégorie V est loin de représenter les conditions de rugosité les plus défavorables. Si le revêtement de la galerie était exécuté en maçonnerie de moellons de blocage ou si même la galerie n'était pas revêtue, la roche à peine égalisée, il y aurait lieu d'en tenir compte spécialement. Il est à prévoir en tous cas que des coefficients établis dans de telles conditions pourront fortement varier selon la nature de la roche, sa dureté et par conséquent son degré d'usure, son clivage et sa rugosité. On trouvera plus loin d'ailleurs, dans le *tableau comparatif de Strickler*, des valeurs approchées des coefficients de la formule de Biel, obtenues par comparaison, et qui seraient applicables dans les cas extrêmes qui viennent d'être mentionnés.

Quand il s'agit du calcul de la perte de charge dans la galerie d'aménée d'une usine hydro-électrique, les deux valeurs intéressantes pour le calcul de la moindre perte (stabilité, fermeture) et de la perte maximum (ouverture) sont en général celles des catégories II et V. Les deux tableaux de chiffres de la page 77 montrent que la différence entre les valeurs obtenues par la formule de Biel et les valeurs calculées par la formule de Lang, est surtout appréciable pour les grands diamètres.

La série des coefficients de Biel ne contient cependant pas de valeurs caractéristiques pour les conduites usagées¹.

¹ Pour un calcul provisoire, il serait facile de mettre aussi la formule de Biel sous la forme approchée suivante (déduite de $W_o = 3,0 \text{ m/s}$) :

$$\begin{aligned} \text{Perte minimum (stabilité, fermeture)} & \quad \lambda = 0,0094 + 0,0033 D^{-\frac{1}{2}} \\ \text{Perte maximum (ouverture)} & \quad = 0,0094 + 0,0115 D^{-\frac{1}{2}} \\ \text{Perte probable en service normal :} & \quad = 0,0094 + 0,0080 D^{-\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

* * *

L'état des conduites en service varie évidemment beaucoup d'une installation à l'autre, selon la nature de la conduite elle-même et suivant la qualité de l'eau. Aussi en résulte-t-il, en général, une variation de la perte de charge au cours d'une exploitation continue.

L'usure proprement dite peut provenir d'une vitesse d'écoulement trop grande qui a pour effet d'emporter soit la couche protectrice de goudron ou d'asphalte, dans les conduites métalliques, soit l'enduit lisse appliqué contre le revêtement des conduites en béton ou simplement contre la roche elle-même. C'est pourquoi l'on évite en général de dépasser une vitesse moyenne de 3,50 à 4,00 m/s.

Dans certaines galeries creusées dans la roche friable et non revêtues et si l'eau est chimiquement pure, l'usure peut se borner à un simple laminage des parois, ce qui peut avoir pour conséquence, au début de l'exploitation, une diminution du coefficient de rugosité. Le cas cependant est exceptionnel.

Dans la plupart des cas, au contraire, que la galerie soit revêtue ou non, vient s'ajouter à l'usure mécanique du début et après la disparition de l'enduit protecteur, une « usure » chimique qui tend à augmenter le frottement. Cette augmentation provient essentiellement de deux causes principales :

Si l'eau qui s'écoule tient en dissolution une forte proportion d'air, celui-ci provoquera, selon la nature de la paroi, la formation d'une couche de rouille plus ou moins irrégulière ou une oxydation de l'enduit ou de la roche, états qui ont généralement pour effet d'augmenter sensiblement la rugosité de la paroi.

Si l'eau contient une forte proportion d'anhydride carbonique il pourra se former, à l'intérieur de la galerie, de véritables concrétions qui vont généralement en croissant vers l'axe et rétrécissent progressivement la lumière de la conduite. On peut même être amené, après plusieurs années de service, à devoir compter avec un sérieux rétrécissement de la section de passage. M. Lang a proposé, en appelant D_1 le diamètre ainsi réduit, d'évaluer le coefficient λ_1 correspondant, d'après l'ancien λ appliqué sur le diamètre primitif D , toutes autres conditions demeurant semblables, par

$$\lambda_1 = \lambda \left(\frac{D}{D_1} \right)^5 - 1$$

* * *

A côté des formules précédentes qui sont, en somme, une extrapolation justifiée de formules établies pour

¹ Admettons, pour fixer les idées, qu'il s'agisse de faire passer un débit de $30 \text{ m}^3/\text{s}$. par une galerie de 3,90 m. de diamètre et qu'après plusieurs années de service il se soit formé une concréfaction calcaire, répartie uniformément sur le périmètre de la section à raison d'environ 60 mm. d'épaisseur. La perte de charge correspondant au débit de $30 \text{ m}^3/\text{s}$. serait majorée de ce fait dans le rapport :

$$\frac{\lambda_1}{\lambda} \frac{D}{D_1} \frac{W_1^2}{W^2} = \left(\frac{D}{D_1} \right)^{10} = \left(\frac{3,90}{3,78} \right)^{10} = \sim 1,36 .$$

**Valeurs de la perte de charge
dans des galeries revêtues, de section circulaire.**
(Perte de charge exprimée en mètres, par kilomètre de galerie.)

TABLEAU I. — Perte de charge minimum.
(Enduit parfaitement lisse.)

<i>D</i> (m.)	<i>W_o</i> (m/s.)	<i>Q_o</i> (m ³ /s.)	<i>Lang</i> <i>a</i> = 0,012	<i>Biel</i> <i>b</i> = 0,018	<i>Kutter</i> <i>m</i> = 0,15	<i>Bazin</i> <i>γ</i> = 0,06
1,0	1	0,785	0,72	0,70	0,68	0,67
	2	1,571	2,73	2,64	2,71	2,66
	3	2,356	6,05	5,83	6,40	5,97
2,0	1	3,142	0,34	0,32	0,29	0,31
	2	6,283	1,32	1,21	1,17	1,25
	3	9,425	2,95	2,69	2,64	2,80
3,0	2	14,137	0,87	0,78	0,74	0,81
	3	21,206	1,94	1,74	1,65	1,81
	4	28,274	3,42	3,06	2,94	3,22
4,0	2	25,433	0,65	0,57	0,53	0,60
	3	39,699	1,45	1,27	1,19	1,34
	4	50,266	2,55	2,24	2,11	2,38
5,0	2,5	49,087	0,80	0,70	0,65	0,74
	3,5	68,762	1,56	1,35	1,26	1,45
	4,5	88,352	2,57	2,23	2,09	2,39
6,0	2,5	70,686	0,69	0,57	0,53	0,61
	3,5	98,960	1,29	1,12	1,03	1,18
	4,5	127,234	2,13	1,84	1,74	1,96
7,0	3	115,453	0,82	0,70	0,64	0,74
	4	153,934	1,44	1,24	1,14	1,32
	5	192,423	2,25	1,93	1,78	2,06
8,0	3	150,797	0,72	0,61	0,55	0,65
	4	201,062	1,26	1,08	0,98	1,15
	5	251,328	1,96	1,68	1,53	1,80

**Valeurs de la perte de charge
dans des galeries revêtues, de section circulaire.**
(Perte de charge exprimée en mètres, par kilomètre de galerie.)

TABLEAU II. — Perte de charge en service.
(Revêtement de béton brut ou conduite déjà usée.)

<i>D</i> (m.)	<i>W_o</i> (m/s.)	<i>Q_o</i> (m ³ /s.)	<i>Lang</i> <i>a</i> = 0,020	<i>Biel</i> <i>b</i> = 0,072	<i>Kutter</i> <i>m</i> = 0,35	<i>Bazin</i> <i>γ</i> = 0,16
1,0	1	0,785	1,12	1,08	1,16	0,92
	2	1,571	4,36	4,27	4,63	3,69
	3	2,356	9,73	9,58	10,41	8,30
2,0	1	3,142	0,55	0,45	0,44	0,40
	2	6,283	2,14	1,79	1,78	1,59
	3	9,425	4,79	4,01	4,00	3,57
3,0	2	14,137	1,41	1,09	1,05	0,99
	3	21,206	3,17	2,46	2,37	2,23
	4	28,274	5,60	4,35	4,21	3,96
4,0	2	25,433	1,06	0,78	0,73	0,71
	3	39,699	2,37	1,74	1,64	1,60
	4	50,266	4,18	3,08	2,91	2,84
5,0	2,5	49,087	1,31	0,91	0,86	0,87
	3,5	68,760	2,56	1,77	1,68	1,70
	4,5	88,357	4,22	2,92	2,78	2,80
6,0	2,5	70,686	1,09	0,75	0,69	0,74
	3,5	98,960	2,13	1,46	1,35	1,38
	4,5	127,234	3,50	2,42	2,24	2,29
7,0	3	115,453	1,34	0,90	0,82	0,86
	4	153,934	2,37	1,60	1,46	1,52
	5	192,423	3,70	2,50	2,28	2,38
8,0	3	150,797	1,48	0,77	0,70	0,74
	4	201,062	2,08	1,37	1,24	1,32
	5	251,328	3,23	2,14	1,94	2,05

Perte de charge observée dans des galeries d'amenée.

Nom de l'installation.	Galerie d'amenée.	Nature de la paroi.	W_o m/s	\mathfrak{R} m	J	Ms	M_F	Source des données.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Refrain</i> (Doubs)	<i>l. e.</i>	<i>L</i>	2,60	0,842	0,001 000	92,5	93,1	S. B. Z. 1915. I. p. 179.
<i>Kubel</i> (St-Gall) (moyenne : $M_s = 89,6$)	<i>l. e.</i>	<i>P</i>	1,50 1,35 0,55	0,586 0,513 0,270	0,000 555 0,000 555 0,000 555	90,9 89,0 88,8	92,5 91,0 92,8	<i>Epper</i> : <i>Le développement de l'hydrométrie en Suisse</i> . Berne 1907. (Planche 86).
<i>Chippis-Navizance</i> (Valais)	<i>l. e.</i>	<i>E.</i>	3,65	0,584	0,003 400	89	90,6	S. B. Z. 1911. II p. 100.
<i>Spiez-Simme</i> (Berne)	<i>ch.</i>	<i>E</i>	4,31	0,590	0,000 460	86,5	88,0	S. B. Z. 1908. II p. 206.
<i>Kallnach</i> (Berne)	<i>l. e.</i>	<i>L</i>	2,72	1,370	0,000 650	86,1	85,1	S. W. W. du 10. X. 1917.
<i>Mühleberg</i> (Berne) galerie de dérivation provisoire du barrage. (moyenne $M_s = 69$)	<i>ch.</i>	<i>L</i>	13,60 12,90 9,05 2,95 2,23 2,02	1,695 1,690 1,590 1,450 1,507 1,600	0,025 000 0,014 900 0,008 050 0,001 040 0,000 664 0,000 457	61,0 74,5 73,5 72,0 66,0 68,5	58,6 71,5 70,7 69,5 63,7 65,9	S.W.W. du 25. VII. 1922.
<i>Biaschina</i> (Tessin)	<i>l. e.</i>	<i>S. E.</i>	2,30	0,890	0,001 500	63,8	64,0	
<i>Martigny-Dranse</i> (Valais)	<i>l. e.</i>	<i>E et S</i>	2,01	0,710	0,002 500	50,2	50,8	
<i>Ackersand</i> (Valais)	<i>l. e.</i>	<i>R</i>	4,33	0,453	0,002 500	45,0	46,2	
<i>Gampel II</i> (Valais)	<i>l. e.</i>	<i>S</i>	1,11	0,428	0,003 000	35,6	36,6	

Dans la colonne 2 du tableau, *l. e.* indique que l'écoulement est libre, ventilé, tout au moins pendant l'essai en question ; *ch.* indique un souterrain fonctionnant en charge, sous pression.

L désigne une galerie revêtue avec enduit lissé particulièrement soigné ; *E* idem., mais avec chape de ciment ordinaire ; *P* simple revêtement de béton (sans enduit) mais poli par l'écoulement ; *S E* sans revêtement, mais un enduit lisse de la roche ; *R* le radier seul revêtu, sans enduit. *S* sans aucun revêtement ni enduit : roche brute. (*sic.*)

Dans la dernière colonne : S. B. Z. = *Schweizerische Bauzeitung*, Zürich ; S. W. W. = *Schweizerische Wasserwirtschaft*, Zürich.

des conduites circulaires de dimensions moyennes, on a de tout temps cherché à utiliser, dans le calcul des conduites sous pression, les coefficients obtenus, dans des conditions en général bien plus variées, pour l'écoulement uniforme dans les canaux découverts.

On cherchera donc à utiliser ici les résultats si importants établis lors des expériences de *Darcy* et *Bazin*¹, et des calculs de *Ganguillet* et *Kutter*², afin d'être à même d'augmenter dans une large mesure, en raison même de la variété des parois considérées, la gamme des coefficients de *Biel*.

Comme la formule de *Ganguillet* et *Kutter* (1869) et la « nouvelle formule » de *Bazin* (1897) sont renfermées dans tous les aide-mémoire, il ne nous paraît pas nécessaire de les reproduire ici. Nous reviendrons plus loin d'ailleurs sur les coefficients à adopter.

Nous voudrions plutôt montrer l'intérêt que présente aussi, pour le calcul de la perte de charge dans la galerie d'amenée, la formule simplifiée, connue à tort ou à raison sous le nom de « petite formule de *Kutter* » et qui n'est, en somme, que l'expression du facteur *C* de *Ganguillet* et *Kutter* et de *Bazin* ($W_o = C \sqrt{\mathfrak{R} J}$) sous une forme plus simple, à savoir :

¹ *Recherches hydrauliques sur l'écoulement de l'eau*, etc. Paris 1865.

² *Versuch zur Aufstellung einer ... Formel f. die gleichförmige Bewegung des Wassers*, Berne 1877. Cette étude a été publiée dès 1869 dans la *Z. d. oesterr. J. u. A. V.*, Vienne.

$$(Kutter) \quad C = \frac{100 \sqrt{\mathfrak{R}}}{m + \sqrt{\mathfrak{R}}} = \frac{50 \sqrt{D}}{m + \frac{1}{2} \sqrt{D}} \quad (e)$$

C est à introduire dans l'expression de la vitesse du type (b).

Appliquée au calcul de la perte de charge dans des conduites sous pression, cette formule a donné des résultats en concordance avec ceux de la formule de *Biel*, qui fut établie pourtant bien plus tard sur la base d'un nombre d'essais beaucoup plus grand.

Comme valeur du coefficient *m*, il y a lieu d'admettre :

$$m = 0,15 \text{ pour une conduite neuve,}$$

$$m = 0,35 \text{ pour une galerie en service.}$$

Cette formule simplifiée présente aussi l'avantage de ne pas nécessiter d'hypothèse prématurée sur la nature des parois de la galerie. On pourrait développer au sujet des deux valeurs de *m* les mêmes considérations que plus haut pour le terme *a* de la formule de *Lang*.

Les deux tableaux de chiffres de la page 77 permettent de comparer les résultats de la « petite formule de *Kutter* » avec ceux obtenus par les formules précédentes. Nous y avons ajouté les valeurs correspondantes de la formule de *Bazin* dont les résultats sont, une fois de plus, confirmés par les expériences ultérieures.

* * *

Valeurs moyennes des coefficients de frottement dans les galeries d'aménée

et pour des vitesses normales d'écoulement (comprises entre 1,50 et 4,50 m/s).

Ces coefficients sont à introduire dans les diverses formules d'après les catégories suivantes:	Strickler	Forch- heimer	Bazin	Ganguillet & Kutter	Manning	Petite formule de Kutter	Biel	Lang
	M_s	M_F	γ	n	$\frac{1}{n}$	m	b	a
Enduit <i>lissé</i> sur revêtement uni ou conduites métalliques neuves goudronnées ou planches rabotées, jointives	100	102	0,06	0,010	100	0,45	0,018	0,012
Enduit de ciment <i>ordinaire</i> sur revêtement uni ou pièces de conduites neuves en fonte	90	92		0,012	83,3		0,036	
Revêtement de béton (sans enduit) rendu <i>uni</i> à la suite de l'écoulement ou pierre de taille	80-90	87					0,054	
Béton <i>brut</i> conservant les traces du coffrage ou moëllons appareillés ou planches sciées et assemblées .	70-80	77	0,16	0,013	76,9	0,35	0,072	0,020
Conduites métalliques usées Moëllons équarris ou dépôt de sable fin	60-70	66	0,46	0,017	58,8		(0,18)	
Moëllons de blocage ou dépôt de petit gravier	50-60	56	0,85	0,020	56,0		(0,29)	
Profil mixte : radier revêtu de béton, le reste du profil brut dans la roche	45	46		0,022	45,5			
Roche brute à profil régularisé ou gravier régulièrement déposé	40	41	1,30	0,025	40,0		(0,50)	
Forts dépôts de gros gravier irrégulièrement déposés .	25-35	28	1,75	0,030	33,3		(0,75)	
Roche brute à profil irrégulier, grande section	20-30	25					(0,90)	
Profil complètement irrégulier et petite section de passage	15-20	18						

N. B. Les valeurs entre parenthèses ne sont pas des valeurs originales. Elles ont été calculées à titre comparatif.

Rappelons aussi les efforts intéressants qui ont été faits récemment pour ramener à une *forme unique* l'expression de la perte de charge, qu'il s'agisse de l'écoulement uniforme dans une conduite sous pression ou du même écoulement dans des canaux découverts ou encore de l'écoulement dans des cours d'eau naturels. Les comparaisons établies à ce sujet notamment par M. Forchheimer¹ et par M. Strickler² sur la base d'un nombre considérable de résultats permettent dès lors de proposer avec beaucoup plus de certitude que précédemment

¹ *Der Durchfluss des Wassers durch Röhren und Gräben insbesondere durch Werkgräben grosser Abmessungen*, Berlin (Springer) 1913.

² *Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauhigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen*. Cette intéressante Communication, n° 16 du Service des Eaux du Département suisse de l'Intérieur (Berne, 1923) a été signalée en son temps aux lecteurs du *Bulletin technique* (Année 1923, p. 315).

les coefficients de rugosité qui intéressent une galerie d'aménée, *au delà* des conditions qui sont celles d'une conduite métallique, neuve ou usée, c'est-à-dire en présence de parois maçonées ou laissées brutes dans la roche.

Ces deux auteurs ont adopté pour exprimer la vitesse moyenne une expression de la forme :

$$W_o = M \mathcal{R}^\mu J^\nu \quad (f)$$

et ils ont établi, sur la base des séries d'essais publiés dans divers pays, les valeurs de M , μ et ν . Parmi ces essais figurent aussi, et c'est en cela qu'ils présentent ici un intérêt particulier, des essais effectués sur des conduites en béton et sur des galeries, maçonées ou non.

Les calculs effectués par M. Forchheimer ont porté notamment sur environ 40 résultats d'essais réunis en 1920 par M. Fréd. C. Scobey¹ et qui ont été exécutés en général aux Etats-Unis sur des conduites en béton dont le diamètre intérieur était compris entre 203 et 5486 mm.

Les résultats ont évidemment varié selon que les conduites, construites par éléments de tuyaux, présentaient une rugosité appréciable ou selon qu'elles étaient bétonnées sur des coffrages continus en bois ou en tôle. Quand plusieurs essais ont pu être effectués sur une même conduite, en faisant varier la vitesse, il a été établi une valeur moyenne du facteur M .

Les valeurs de M et celles des exposants μ et ν varient donc d'une conduite à l'autre. On est à même cependant de fixer en général avec une approximation suffisante une valeur de μ et d'évaluer ensuite pour diverses conduites les valeurs respectives de M et de ν .

Les résultats montrent qu'en général l'exposant de \mathcal{R} oscille dans toutes les conduites autour d'une valeur qu'on peut admettre de 0,7. L'exposant de J , en revanche, varie d'une conduite à l'autre entre des limites assez étendues, entre 0,41 et 0,55, avec une moyenne proche de 0,5.

Sur la base de $\mu = 0,7$ et $\nu = 0,5$, M. Forchheimer estime que le coefficient M de la formule (f) accuse les valeurs moyennes suivantes² dans les conduites en béton :

¹ *The flow of water in concrete pipe*. U. S. Department of Agriculture. Bulletin 852. Washington 1920.

² Forchheimer, op. cit. p. 14.

- $M_F = 100$ dans les conduites neuves à enduit parfaitement lissé et dans les conduites où la nature de l'eau a poli le revêtement.
- 88 dans les conduites neuves bétonnées avec soin dont le béton a été damé sur un moule-noyau en tôle, mais sans enduit lisse.
- 85 dans les conduites formées par l'assemblage d'éléments bétonnés séparément et après quelques années de service.
- 76 dans des conduites mal entretenues et depuis longtemps en service.

Il ne s'agit là que de valeurs approchées et le tableau de chiffres, établi par M. Forchheimer sur 43 données différentes, ne présente pas moins de 5 valeurs de M inférieures à 70, 6 valeurs comprises entre 70 et 76 et, à l'autre extrémité, 4 valeurs supérieures à 100 avec un maximum de 108 correspondant à une conduite $\odot 800$ mm. en béton, essayée par Bazin à l'état neuf en 1895.

M. Strickler, chef de section au Service fédéral des Eaux à Berne, a, de son côté, soumis au calcul d'une manière tout à fait indépendante le riche matériel statistique à sa disposition et portant principalement sur des cours d'eau naturels. Il y a ajouté des calculs faits sur des galeries d'aménée en charge de plusieurs installations de Suisse. Nous avons reproduit à la page 78 ceux de ces résultats qui nous ont paru être les plus intéressants et y avons ajouté un dernier résultat de l'usine du *Refrain* sur le Doubs.

M. Strickler adopte, à la suite de ses diverses comparaisons, les coefficients $\mu = 2/3$, $\nu = 1/2$ ce qui le conduit, pour les galeries essayées, aux coefficients (M_S) indiqués dans le Tableau de la page 78 que nous avons complété en ajoutant, à titre comparatif¹, les coefficients de Forchheimer (M_F).

Une autre question résolue par M. Strickler est celle de la comparaison des coefficients des différentes formules de l'écoulement uniforme. Nous n'hésitons pas à reproduire ici partiellement l'excellent tableau comparatif qu'il a établi² et que nous avons rédigé, à nouveau, en tenant compte surtout des différentes catégories intéressant les galeries d'aménée et en indiquant les coefficients des différentes formules dont il a été question plus haut. Nous y ajoutons le coefficient de la formule de Manning, simplement parce qu'étant l'inverse de celui de la formule de Ganguillet et Kutter, il montre d'un coup d'œil le peu de distance qui sépare cet ancien coefficient des coefficients nouveaux.

Cet essai de coordination des coefficients, qui a son intérêt, ne doit cependant pas tromper. Malgré le soin apporté dans les essais effectués, on est généralement obligé de constater que, pour deux conduites différentes mais dans lesquelles les conditions d'écoulement sont

¹ Le coefficient de Forchheimer (M_F) se déduit aisément de celui de Strickler (M_S) puisqu'on a :

$$W_0 = M_S \cdot R^{0.667} \cdot J^{0.5} = M_F \cdot R^{0.7} \cdot J^{0.5}.$$

² Strickler, op. cit. p. 46.

apparemment semblables et même dans une seule conduite, quand on fait varier la vitesse, les coefficients présentent encore des différences appréciables.

Les formules actuellement utilisées ne paraissent donc pas être encore définitives, car il se produit sans doute, même dans l'écoulement uniforme, des troubles secondaires qu'on n'est pas à même, vu la nature de l'observation, d'établir exactement.

Il convient donc toujours d'être prudent dans la conclusion qu'on tire de la valeur de la perte de charge, quand celle-ci n'est établie que sur le choix d'un coefficient, tiré des sources mêmes les plus sûres, et ne repose pas sur des résultats d'essais directs.

Les deux tableaux de chiffres de la page 77 donnent, pour diverses valeurs du diamètre de la galerie et pour diverses valeurs de la vitesse, la perte de charge en mètres par kilomètre de longueur de galerie. Les valeurs calculées montrent l'ordre de grandeur de la perte de charge auquel on peut s'attendre et la concordance des principales formules qui viennent d'être rappelées.

Sur le mode de couplage le plus favorable des machines,

par M. R. THOMANN, professeur à l'Université de Lausanne.

Dans une note parue au numéro du 21 novembre 1925 du *Bulletin technique* nous avons démontré que le couplage le plus favorable de deux turbines hydrauliques est réalisé lorsque l'expression

$$\varphi = \eta + Q \frac{d\eta}{dQ}$$

a simultanément la même valeur pour les deux turbines, η étant le rendement et Q le débit des turbines.

Or cette condition est valable non seulement pour deux mais pour un nombre arbitraire de turbines. Si, par exemple, il s'agit de conjuguer une troisième turbine (d) avec deux turbines (a) et (b) déjà en service, on considérera les deux machines (a) et (b) comme constituant une unité (c) travaillant en régime optimum, à accoupler avec (d) de façon que la condition

$$\varphi_c = \varphi_d$$

soit satisfaite. Il en sera de même lorsque (a) et (d) ou (b) et (d) considérées respectivement comme une unité (c) seront conjuguées avec une troisième turbine, sous la condition de l'égalité des φ . Il résulte immédiatement de ces considérations que la condition générale pour la conjugaison optimum d'un nombre quelconque de turbines est que les φ relatifs à chacune d'elles aient simultanément la même valeur. (Voir fig. 1.)

On arrive au même résultat par la voie analytique. En effet, moyennant quelques transformations, on peut écrire