

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 88 (1962)
Heft: 22

Artikel: Perte de charge dans un étranglement conique (suite et fin)
Autor: Gardel, André
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-771853>

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: 26.01.2026

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

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

paraissant tous les 15 jours

ORGANE OFFICIEL

de la Société suisse des ingénieurs et des architectes
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (S.V.I.A.)
de la Section genevoise de la S.I.A.
de l'Association des anciens élèves de l'EPUL (Ecole polytechnique
de l'Université de Lausanne)
et des Groupes romands des anciens élèves de l'E.P.F. (Ecole
polytechnique fédérale de Zurich)

COMITÉ DE PATRONAGE

Président: † J. Calame, ing. à Genève
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève
Membres:
Fribourg: H. Cicot, ing.; M. Waeber, arch.
Genève: G. Bovet, ing.; Cl. Groscurin, arch.; E. Martin, arch.
J.-C. Ott, ing.
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; R. Guye, ing.
Valais: G. de Kalbermaten, ing.; D. Burgener, arch.
Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.;
M. Renaud, ing.; J.-P. Vouga, arch.

CONSEIL D'ADMINISTRATION

de la Société anonyme du « Bulletin technique »
Président: D. Bonnard, ing.
Membres: Ed. Bourquin, ing.; G. Bovet, ing.; M. Bridel; J. Favre,
arch.; A. Robert, ing.; J.-P. Stucky, ing.
Adresse: Avenue de la Gare 10, Lausanne

RÉDACTION

Vacat
Rédaction et Editions de la S.A. du « Bulletin technique »
Tirés à part, renseignements
Avenue de Cour 27, Lausanne

ABONNEMENTS

1 an	Suisse	Fr. 23.—	Etranger	Fr. 32.—
Sociétaires	»	» 23.—	»	» 28.—
Prix du numéro	»	» 1.60		

Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande »,
N° 11 57 75, Lausanne

Adresser toutes communications concernant abonnement, changements
d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie La Concorde, Terreaux 29,
Lausanne

ANNONCES

Tarif des annonces:
1/1 page Fr. 320.—
1/2 » » 160.—
1/4 » » 80.—
1/8 » » 40.—

Adresse: Annonces Suisses S. A.
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 28. Lausanne et succursales



SOMMAIRE

Perte de charge dans un étranglement conique (suite et fin), par André Gardel, Dr ès sc. techn., ingénieur-conseil.
Bibliographie. — Divers. — Les congrès.
Carnet des concours. — Documentation générale. — Nouveautés, informations diverses.

COMMUNICATION DU LABORATOIRE D'HYDRAULIQUE DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE L'UNIVERSITÉ DE LAUSANNE¹

Directeurs: MM. les professeurs A. STUCKY et D. BONNARD

PERTE DE CHARGE DANS UN ÉTRANGLEMENT CONIQUE

par ANDRÉ GARDEL, Dr ès sc. techn., ingénieur-conseil, privat-docent à l'Ecole polytechnique

(Suite et fin)²

II^e PARTIE

Nouveaux essais effectués au laboratoire d'hydraulique EPUL

A. Principe des essais

Souhaitant déterminer expérimentalement l'influence de trois paramètres différents (a , b , c), une triple infinité de cas particuliers pouvaient être envisagés. C'est dire qu'à moins de donner une extension prohibitive à cette étude, il était nécessaire de limiter beaucoup le nombre des valeurs des paramètres qui feraient l'objet d'essais. Les cas limites ($a = 1$, $b = 0$) et ($a = 1$, $b = 1$) pouvant être considérés comme déterminés théoriquement, c'est sur des cas intermédiaires que devait porter l'effort. Il fallait en outre que l'orifice soit de dimension suffisante pour que les coefficients de débit obtenus puissent être admis comme valables: cela imposait de prendre un diamètre de l'orifice égal ou supérieur au décimètre. Comme, d'autre part, les charges devaient être un multiple élevé de cette dimension (10 fois, ou mieux 20 fois) et qu'il en était de même des longueurs de canalisations placées à l'amont et à l'aval de l'étranglement, on voit

que l'installation d'essai devait atteindre d'assez grandes dimensions. Son coût en était augmenté d'autant, et la nécessité d'autant plus grande de réduire le nombre des cas étudiés. A ces préoccupations d'investissement initial s'ajoutait le fait que de tels essais sont longs à exécuter, devant être répétés chacun de cinq à dix fois pour disposer de moyennes bien assurées. En outre, une transformation assez importante de l'installation était évidemment nécessaire pour modifier soit l'angle du cône, soit le diamètre de la conduite amont ou de celle d'aval. Pour ces raisons de durée des essais, il était également souhaitable de ne pas multiplier exagérément le nombre des cas envisagés.

Il fut donc décidé de s'en tenir à l'étude de sept valeurs de l'angle au sommet du cône, à savoir:

$B = 60^\circ$	90°	120°	180°	240°	270°	300°
$b = 0,167$	$0,250$	$0,333$	$0,500$	$0,667$	$0,750$	$0,833$

Quoique considéré comme bien connu, le cas $b = 0,5$ a été maintenu pour servir de contrôle. Les valeurs de b supérieures à 0,5 peuvent être réalisées par le retournement des cônes utilisés pour b inférieur à 0,5. Ainsi l'équipement de l'installation comportait-il une plaque et trois cônes.

¹ Cette étude est tirée du Recueil de travaux offert au professeur A. Stucky, en hommage de reconnaissance, sur l'initiative de l'Association amicale des anciens élèves de l'Ecole polytechnique de Lausanne, le 27 octobre 1962, l'année de son 70^e anniversaire.

² Voir Bulletin technique n° 21 du 20 octobre 1962.

Le diamètre normal de l'orifice a été fixé à 150 mm, donc supérieur au minimum admis ci-dessus.

Les conduites amont et aval ont été choisies de diamètres de 200 et 300 mm, normalisés dans le commerce. Une autre valeur plus élevée a été en outre utilisée pour permettre de se rapprocher des cas $a = 0$ ou $b = 0$, soit 668 mm.

Telle que définie ci-dessus, l'installation permettait donc d'étudier $7 \times 3 \times 3 = 63$ cas différents. En outre, le cas du débouché à l'air libre à l'aval paraissait devoir être utilement examiné, notamment parce qu'il devait correspondre exactement à $c = 0$, mais aussi parce qu'il permettait l'examen visuel direct de la veine contractée (contrôle du décollement le long de l'arête, parallélisme des filets, etc.) et déterminait la pression aval de manière précise. Il en résultait $7 \times 3 = 21$ cas supplémentaires, conduisant au total de 84 cas, dont 77 ont été effectivement examinés¹.

Si ce nombre est déjà notable, indiquons d'emblée que, compte tenu des mises au point et répétitions effectuées pour améliorer la précision des résultats, le total des essais exécutés a atteint 1062 (chaque essai comportant une dizaine de mesures de débit, pression, etc.). On comprendra sans doute mieux, au vu de ces chiffres, que l'on n'ait pu envisager de plus nombreuses variantes dans le choix des formes géométriques étudiées.

B. Description de l'installation

Ainsi qu'on le voit sur le schéma de la figure 10, l'installation comporte essentiellement :

- un réservoir d'alimentation amont, à niveau constant ;
- une canalisation rectiligne de jaugeage du débit, avec diaphragme normalisé ;
- une vanne de réglage du débit ;
- le modèle proprement dit, avec
 - a) une conduite cylindrique amont munie de piézomètres ;
 - b) un étranglement conique ;

¹ Six cas avec $B = 90^\circ$ ont été supprimés, les valeurs obtenues pour 60° et 120° suffisant à définir la fonction ; de même pour un cas avec $B = 270^\circ$.

- c) une conduite cylindrique aval avec piézomètres ;
- un coude relevant le plan de charge aval ;
- un bassin de restitution aval ;
- un groupe de pompage ramenant l'eau au réservoir supérieur.

L'installation travaille donc en circuit fermé.

Le modèle est formé de viroles en acier de 668 mm de diamètre et de 4000 mm de longueur, entre lesquelles est pincé le cône étudié. Si les conduites amont ou aval doivent avoir un diamètre inférieur (300 ou 200 mm), de telles conduites sont placées à l'intérieur des viroles, centrées et fixées de manière étanche contre le cône.

Des prises de pression sont placées le long des viroles, ou cas échéant le long des conduites fixées à l'intérieur. Ces prises de pression, exactement arasées à l'intérieur, sont placées par paires sur un diamètre horizontal ; on mesure la moyenne des deux pressions.

Lors des essais avec débouché à l'air libre, la virole placée à l'aval du cône est supprimée et le jet étranglé est projeté directement dans le bassin aval.

Le débit a varié, suivant les formes et les pertes de charge, entre 30 et 110 l/sec, le plus souvent entre 50 et 90 l/sec.

Les figures 11 à 16, photographies de l'installation, permettent d'en voir l'aspect.

Le détail de la forme des arêtes et de la position des prises de pression est indiqué à la figure 17.

Ainsi qu'on peut l'imaginer, il n'est pas très aisé de rouler un cône en tôle relativement mince (3 mm) et d'obtenir un cercle suffisamment précis à l'orifice de manière à en permettre l'usinage selon l'angle prévu. La forme de l'arête nous a paru avoir plus d'importance que le caractère exactement circulaire ou non de l'orifice, cela d'autant plus que nous avons vu dans la première partie de cette étude que même un orifice carré ne conduirait pas à un coefficient de débit très différent !

Les cônes ayant été réalisés, les diamètres effectifs de l'orifice ont été mesurés (selon quatre directions) et admis pour la suite des calculs ; comme on s'en rend compte par la figure 17, le diamètre D_0 n'est pas exactement identique pour un même cône selon qu'on l'utilise

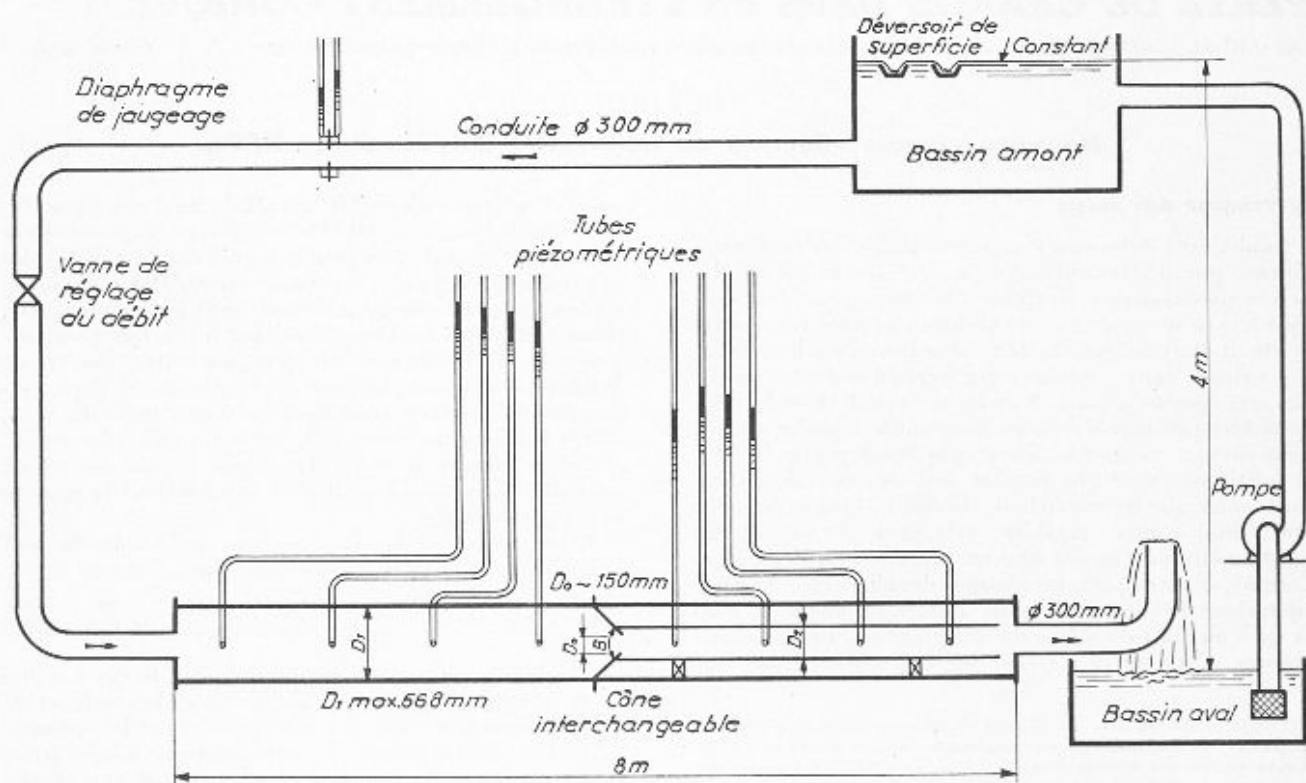


Fig. 10. — Schéma de l'installation expérimentale.

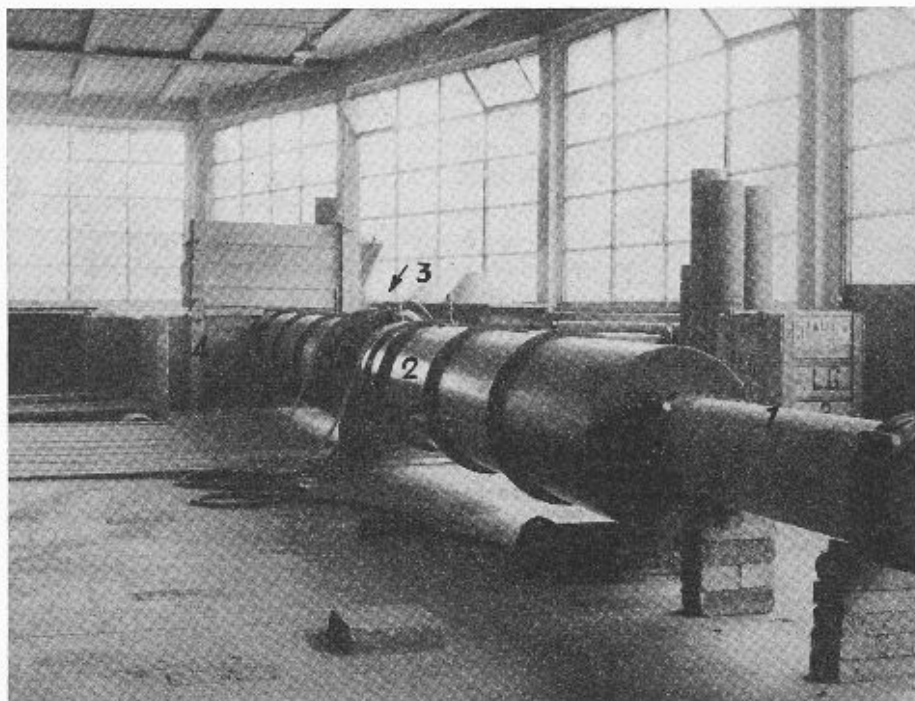


Fig. 11. — L'installation vue de l'amont.

1. Conduite d'entrée \varnothing 300 mm
2. Viroles \varnothing 668 mm.
3. Emplacement de l'étranglement.
4. Bassin aval.

C. Détermination de la perte de charge

Quelques précisions paraissent opportunes quant au mode de détermination de la perte de charge, celui-ci n'étant pas aussi simple qu'on pourrait le penser de prime abord. Laisant de côté, pour commencer, toutes les perturbations locales de l'écoulement, nous définirons la perte de charge due à un étranglement placé sur une conduite par la valeur du décalage vertical que subit la ligne de charge à l'aval de la singularité (fig. 18). La conduite étant supposée de même diamètre à l'amont et à l'aval, recti-

line de surcroît, la ligne de charge hors de la zone perturbée est une droite aussi bien à l'amont qu'à l'aval. Cette droite est inclinée par suite des pertes

line de surcroît, la ligne de charge hors de la zone perturbée est une droite aussi bien à l'amont qu'à l'aval. Cette droite est inclinée par suite des pertes

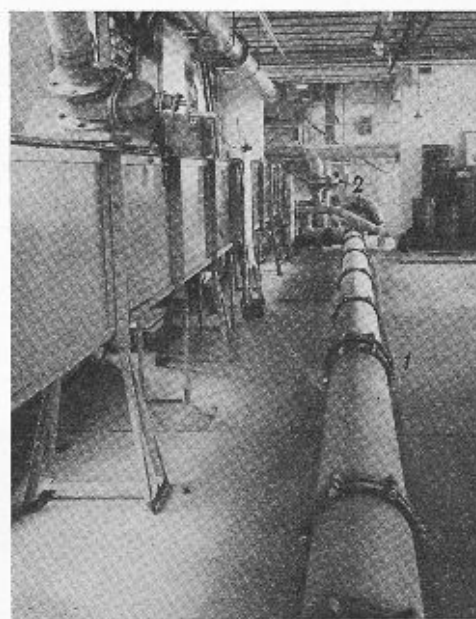


Fig. 13. — Conduite d'adduction \varnothing 300 mm avec section de jaugeage par diaphragme (vue depuis l'aval).

1. Diaphragme.
2. Pompe.

dues au frottement; celles-ci sont admises uniformes et identiques à l'amont et à l'aval, le débit étant évidemment le même.

En réalité, la turbulence à l'aval de la singularité peut ne pas être la même qu'à l'amont et les pentes des lignes de charge pas exactement identiques. Nous admettrons cependant qu'elles le sont à une distance suffisamment grande de l'étranglement (surtout à l'aval); si la perte par frottement est localement plus élevée, nous inclurons donc ce supplément dans la perte de charge attribuée à la présence de la singularité.

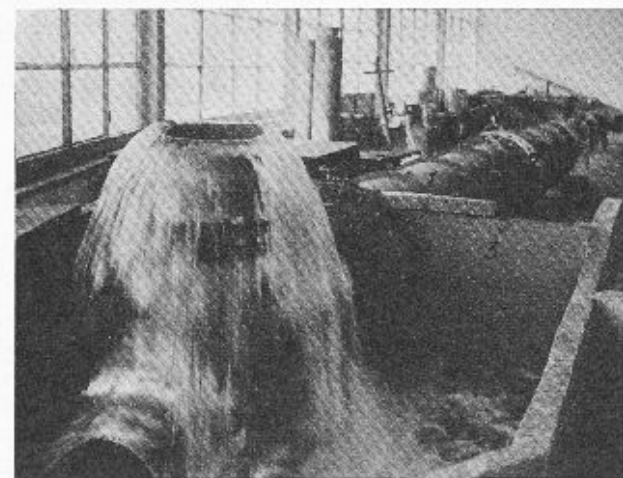


Fig. 12. — Débouché aval avec coude pour mise en charge.

1. Viroles de \varnothing 668 mm.
2. Bride du cône.
3. Bassin aval.

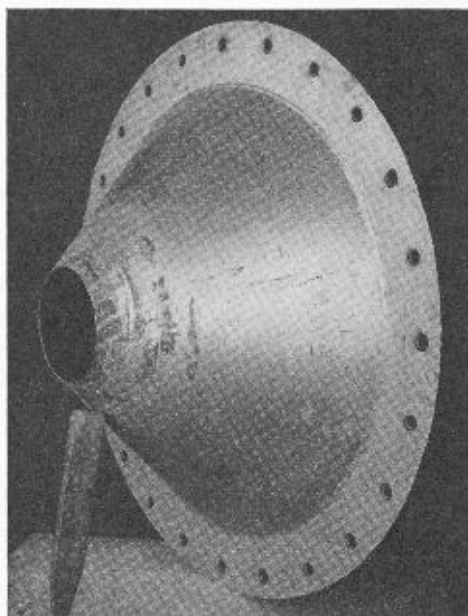


Fig. 14. — Détail du cône de 90°, montrant l'orifice de 150 mm.

Il y a lieu d'ajouter que l'on ne mesure en réalité pas la charge, mais la pression, qui en diffère de la hauteur représentative de l'énergie cinétique. Usuellement celle-ci est admise égale à $V^2/2g$, mais on sait que cette valeur n'est exacte que si la répartition des vitesses est uniforme dans la section considérée. Ce n'est pas rigoureusement le cas et l'accentuation des vitesses au centre de la veine provoquera une augmentation légère de cette hauteur représentative de l'énergie cinétique. Pour l'instant nous négligeons ce fait puisque nous admettons que la charge est déterminée suffisamment loin à l'aval de la singularité.

La définition n'est pas tout à fait aussi simple lorsque le diamètre de la conduite n'est pas le même à l'amont et à l'aval. Sans doute les mêmes remarques peuvent-elles être faites concernant la hauteur représentative de l'énergie cinétique et l'effet de la singularité à l'aval, mais surtout la pente de la ligne de charge n'est plus

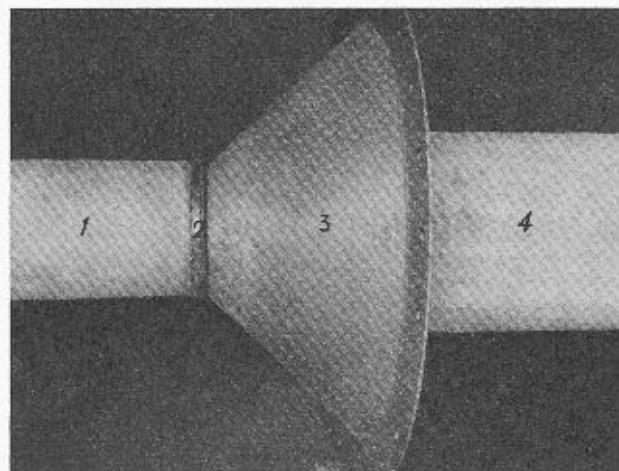


Fig. 15. — Vue du cône de 90° utilisé en position retournée ($B = 270^\circ$, $D_0 = 154,1$ mm.), avec conduite amont $D_1 = 200$ mm et conduite aval $D_2 = 300$ mm, c'est-à-dire $a = 0,594$; $b = 0,750$; $c = 0,264$.

Avant mise en place dans les viroles $\varnothing 668$ mm.

- | | |
|-------------------------|-------------------|
| 1. Conduite amont. | 3. Cône. |
| 2. Anneau d'étanchéité. | 4. Conduite aval. |

la même de part et d'autre de l'étranglement, la vitesse n'y étant plus identique (puisque le diamètre est différent) et la perte par frottement ayant une autre valeur ; on sait que celle-ci varie avec le carré de la vitesse, c'est-à-dire en raison inverse de la puissance quatrième du diamètre. Cet effet est donc assez marqué.

Dès lors, on ne peut plus parler sans autre de décalage vertical puisque les deux lignes de charge — que nous admettons toujours comme étant des droites — sont convergentes, ainsi qu'on le voit à la figure 19.

Force est donc de fixer a priori la section où l'on mesurera ce décalage. Dans le cas de cônes, il semble assez naturel de prendre la section de l'orifice. Mais on se rendra compte du caractère arbitraire de ce choix en remarquant que pour $B < 180^\circ$ la section choisie se

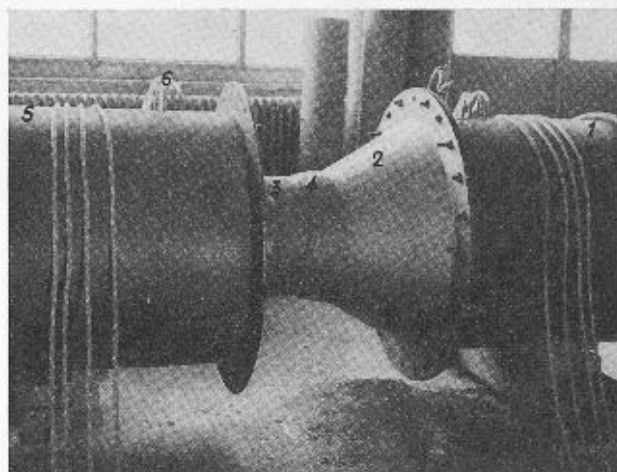


Fig. 16. — Cône mis en place sur la virole amont, avec conduite aval $D_2 = 300$ mm.

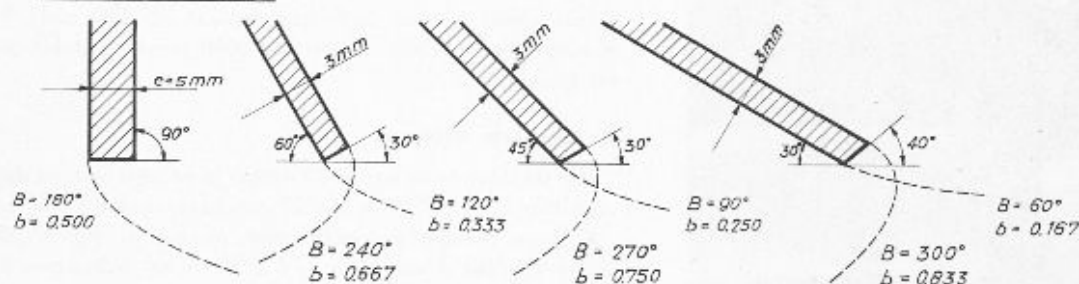
- | | |
|--------------------------|--|
| 1. Virole amont. | 5. Virole aval. |
| 2. Cône $B = 60^\circ$. | 6. Sortie des tubes piézométriques raccordés aux prises de pression à l'intérieur des viroles. |
| 3. Conduite aval. | |
| 4. Étanchéité. | |

trouve à l'aval du changement de diamètre des conduites, et vice versa. Le choix serait moins évident s'il s'agissait d'une singularité plus complexe et il faut bien souligner qu'il s'agit là d'une pure question de définition : les valeurs déterminées expérimentalement ne sont, en toute rigueur, valables que dans le cadre de cette définition (remarquons aussi qu'il n'a nullement été nécessaire de procéder à une telle définition dans la première partie de l'étude, le frottement y étant négligé).

D. Quelques remarques sur le fonctionnement de l'installation

Aux questions de définition examinées au paragraphe précédent vient s'ajouter une difficulté pratique provenant de l'extension relativement importante de la zone perturbée, particulièrement à l'aval. On est donc tenté de procéder aux mesures de pression suffisamment loin de l'étranglement. Il faut ainsi prolonger jusqu'à la singularité la droite inclinée correspondant au frottement dans l'écoulement normal. Mais alors l'inexactitude possible de la pente a beaucoup plus d'influence, même si l'on s'aide dans la détermination de cette pente des formules existant à cet égard. Un compromis doit donc être adopté.

FORMES DES ARÊTES



Le trait pointillé représente la trajectoire probable

Cas:	1000	1000	1000	500
D_1 ou $D_2 = 668 \text{ mm}$	1000	1000	1000	500
D_1 ou $D_2 = 300 \text{ mm}$	870	870	870	440
$D_1 = 200 \text{ mm}$	850	860	840	510
$D_2 = 200 \text{ mm}$	800	880	880	

POSITION DES PRISES DE PRESSION Contact avec le cône

Fig. 17. — Détails de construction du modèle.

Choissant pour le modèle une longueur de 4 m de part et d'autre de l'étranglement, on pouvait espérer disposer ainsi de mesures bien assurées : si le diamètre est grand (par exemple 668 mm), le terme $V^2/2g$ est très petit (2 mm pour 70 l/sec) ; si, au contraire, le diamètre de la conduite est petit (par exemple 200 mm), la longueur de la conduite est grande, près de 20 fois le diamètre ($V^2/2g$ vaut alors 253 mm pour 70 l/sec). Mais nous avons dû constater que dans plusieurs essais une seule mesure de pression paraissait utilisable, la pente des lignes de pression (ou de charge) n'étant plus déterminée que par des étalonnages antérieurs. La figure 20 schématise un tel cas, et ce fait est une cause de dispersion des résultats, car il n'est pas toujours possible de faire toutes les mesures de manière identique.

On doit également noter que la mesure du débit est, elle aussi, entachée d'une légère erreur expérimentale, malgré tout le soin qui peut y être apporté. On s'en aperçoit par exemple en changeant le diamètre du diaphragme de jaugeage : de faibles différences apparaissent ; la détermination de la charge y est sensible, étant proportionnelle au carré du débit. Pour améliorer cette détermination importante, un déversoir de jaugeage du type normalisé SIA a été monté au bassin aval ; nous avons ainsi disposé d'un utile recoupement.

Nous avons pu constater le rôle important que joue une bonne étanchéité entre les conduites aval et, surtout, amont et les cônes. Des passages d'eau en ces

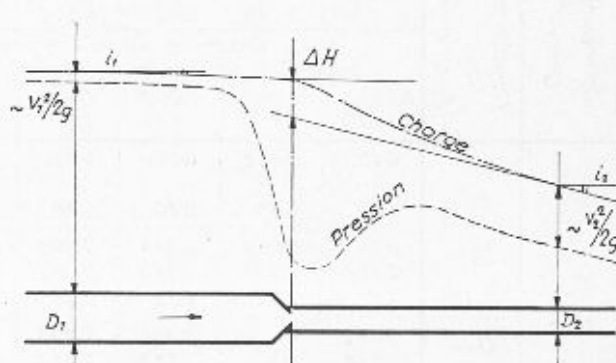


Fig. 19. — Définition de la perte de charge. Cas des conduites de diamètres différents à l'amont et à l'aval.

points résultent des pressions plus fortes qui existent entre les conduites de faible diamètre et les viroles extérieures ; ces passages peuvent provoquer une modification très sensible de la contraction de la veine.

L'observation des bonnes conditions d'écoulement est évidemment plus aisée dans le cas du débouché à l'air libre, d'où l'intérêt de commencer par ce type d'écoulement. Les figures 21 et 22 montrent l'apparence de la veine d'eau ; on peut y constater la régularité du jet, comme aussi son décollement du cône dans le cas où $B > 180^\circ$.

Il convenait enfin de s'assurer que le modèle était bien le siège d'un écoulement turbulent. Dans tous les

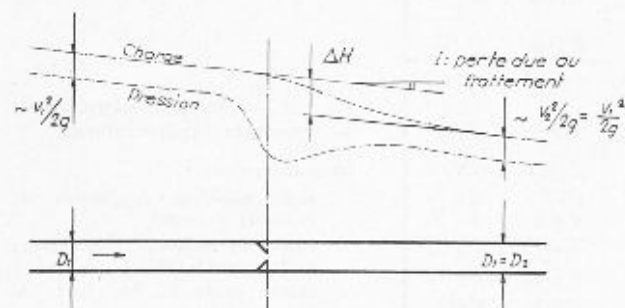


Fig. 18. — Définition de la perte de charge. Cas de la conduite de même diamètre à l'amont et à l'aval.

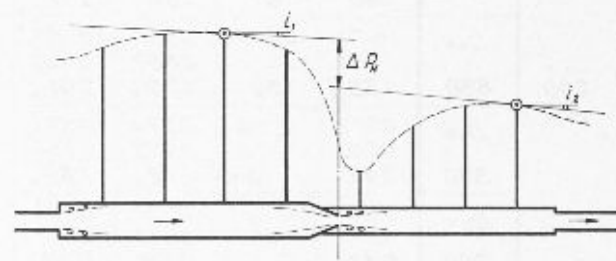


Fig. 20. — Schéma de l'étendue des zones perturbées.

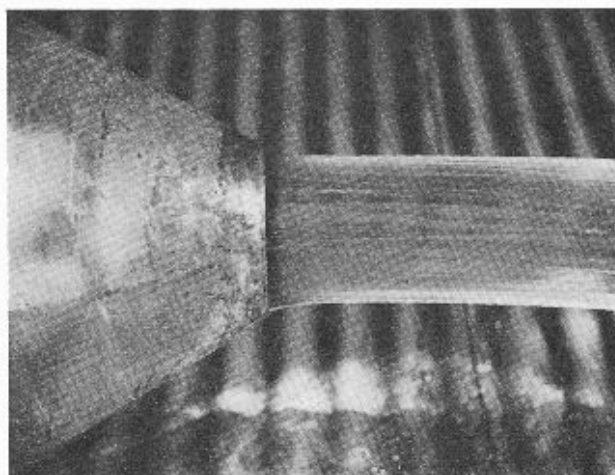


Fig. 21. — Débouché à l'air libre, cône de 60° ($b = 0,167$), débit : 93 l/sec.

cas, les débits utilisés sont très supérieurs au débit critique. Dans la zone de l'étranglement ($\varnothing 150$ mm), le nombre de Reynolds atteint 450 000 pour un débit de 60 l/sec.

E. Résultats obtenus

Le tableau de la figure 23 donne la récapitulation des résultats obtenus dans les 77 cas expérimentés.

Comme indiqué précédemment, chaque valeur de Δh est le résultat d'une série de 5 à 10 essais (minimum 4, maximum 18). Pour chaque série, nous avons déterminé l'écart quadratique moyen relatif¹ qui permet d'apprécier la dispersion de la série. Ce calcul fait ressortir la plus grande dispersion des mesures effectuées avec faible débit, toutes les grandeurs devenant plus difficiles à mesurer (et la charge étant par ailleurs faible par rapport aux dimensions de l'orifice) ; cela nous a conduit

$$^1 \text{ Soit } \sqrt{\frac{\sum (\Delta \Delta h)^2}{n-1}} / \Delta h_{\text{moyen}}$$

Conduite amont	Conduite aval (D_2 en mm)	Angle au sommet du cône						
		$B=60^\circ$ $b=0,167$	90° $0,250$	120° $0,333$	180° $0,500$	240° $0,667$	270° $0,750$	300° $0,833$
		Diamètre D_0 de l'orifice en mm						
		I pour $D_2 = 668$ mm et air libre. II pour $D_2 = 300$ et 200 mm						
$D_1 = 668$ mm	air libre	I: 151,2	150,2	149,8	149,9	153,4	153,3	154,9
		II: 151,9	151,3	151,0	151,1	153,7	154,1	156,3
	$D_2 = 668$	0,051 1,60	0,051 1,83	0,050 2,10	0,050 2,78	0,053 3,36	0,053 3,55	0,054 3,68
		0,051 1,41	0,051 1,64	0,050 1,92	0,050 2,44	0,053 3,01	0,053 3,11	0,054 3,28
	$D_2 = 300$	0,052 1,01	X	0,051 1,48	0,051 2,07	0,053 2,48	0,053 2,58	0,055 2,72
		0,052 0,577		0,051 0,570	0,051 0,571	0,053 0,591	0,053 0,594	0,055 0,611
	$D_2 = 200$	0,49	X	0,81	1,26	1,59	1,66	1,74
		0,49		0,81	1,26	1,59	1,66	1,74
	air libre	0,254 1,57	0,250 1,84	0,249 2,07	0,250 2,55	0,261 2,94	0,261 3,10	0,267 3,24
		0,254 1,49	X	0,249 2,01	0,250 2,41	0,261 2,71	X	0,267 2,77
	$D_2 = 300$	0,256 1,00		0,253 1,43	0,254 1,88	0,262 2,11	0,264 2,16	0,271 2,21
		0,256 0,48	X	0,253 0,78	0,254 1,13	0,262 1,30	0,264 1,34	0,271 1,35
$D_1 = 200$ mm	air libre	0,571 1,46	0,564 1,67	0,561 1,81	0,563 2,11	0,588 2,33	0,588 2,24	0,600 2,19
		0,571 1,38	0,564 1,59	0,561 1,72	0,563 2,01	0,588 1,96	0,588 1,73	0,600 1,86
	$D_2 = 668$	0,051 1,38	0,051 1,59	0,050 1,72	0,050 2,01	0,053 1,96	0,053 1,73	0,054 1,86
		0,051 0,92	X	0,050 1,12	0,050 1,38	0,053 1,50	0,053 1,46	0,054 1,47
	$D_2 = 300$	0,256 0,92		0,253 1,12	0,254 1,38	0,262 1,50	0,264 1,46	0,271 1,47
		0,256 0,44	X	0,253 0,58	0,254 0,78	0,262 0,82	0,264 0,82	0,271 0,93
	$D_2 = 200$	0,577 0,44		0,570 0,58	0,571 0,78	0,591 0,82	0,594 0,82	0,611 0,93
		0,577 0,44		0,570 0,58	0,571 0,78	0,591 0,82	0,594 0,82	0,611 0,93

* écart quadratique moyen relatif: 1-2 %

** écart quadratique moyen relatif: 2-5 %

Fig. 23. — Tableau récapitulatif des résultats expérimentaux.

Dans chaque cas :

chiffre supérieur : a, paramètre de la conduite amont

chiffre intermédiaire : c, paramètre de la conduite aval

chiffre inférieur : Δh , perte de charge relative.

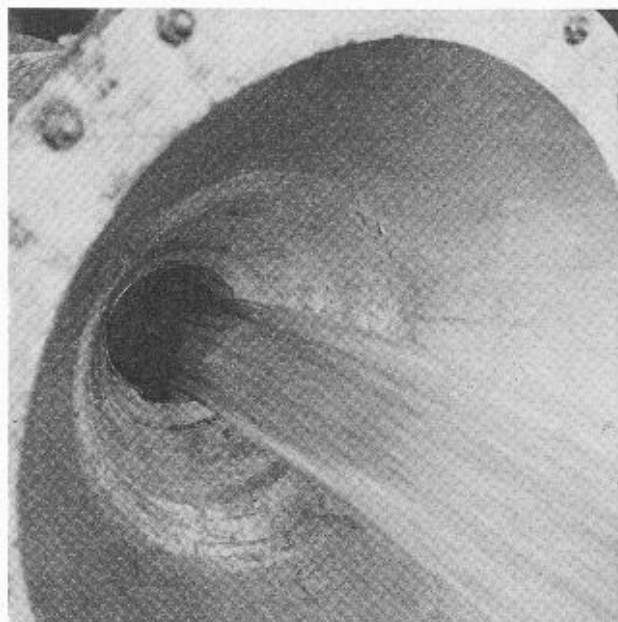


Fig. 22. — Débouché à l'air libre, cône de 300° ($b = 0,833$), débit : 61 l/sec.

à éliminer toutes les mesures effectuées avec un débit inférieur à 50 l/sec, quelquefois même celles faites avec un débit immédiatement supérieur lorsqu'elles provoquaient à elles seules la majeure partie de l'écart calculé.

La plupart des essais font apparaître un écart relatif inférieur à 1 %. Pour une quinzaine cependant l'écart a été supérieur à cette limite ; il a même dépassé dans quelques cas 2 %, sans cependant dépasser jamais 5 %. Les cas pour lesquels cet écart a été supérieur à 1 % sont signalés au tableau récapitulatif.

Ces écarts, significatifs quant à l'importance des erreurs accidentelles au sein d'une série (notamment quant au soin apporté par l'expérimentateur), ne le sont pas en ce qui concerne d'éventuelles erreurs systématiques. Or de telles erreurs existent certainement aussi : on s'en aperçoit par exemple si l'on fait réexécuter une série d'essais par un autre expérimentateur, ou si l'on reprend un cas après plusieurs mois d'interruption des essais.

Nous avons déjà signalé certaines des difficultés rencontrées ; nous mentionnerons ici encore un essai spécial exécuté pour vérifier que des erreurs éventuelles de centrage des canalisations n'ont pas une grande importance. Dans le cas d'un débouché à l'air libre avec conduite amont de diamètre minimal ($D_1 = 200$ mm) et plaque ($B = 180^\circ$), nous avons monté la conduite avec un écart de centrage intentionnel de 4 mm (soit environ 3 % de D_0). L'écart sur la mesure de la perte de charge a été de 0,29 % et s'est donc trouvé du même ordre que l'écart quadratique moyen relatif des séries de mesures elles-mêmes : 0,38 % dans l'essai centré et 0,43 % dans l'essai excentré.

III^e PARTIE

Analyse des résultats expérimentaux nouveaux et formule de deuxième approximation

L'interprétation des nouveaux essais exécutés par le Laboratoire d'hydraulique EPUL consiste tout d'abord en une correction des valeurs obtenues, de manière à les rendre comparables. Il convient ensuite d'effectuer une comparaison avec la formule de première approximation et de rechercher l'explication des écarts qui sont constatés. Il est alors possible d'amender cette formule et d'en déduire un abaque d'emploi pratique.

A. Correction des résultats expérimentaux et comparaison avec la formule de première approximation

Pour les raisons indiquées précédemment, les divers résultats d'essai ne correspondent pas à des valeurs identiques des paramètres a et c , le diamètre effectif de l'orifice étant légèrement différent d'un cas à l'autre. Nous avons donc procédé à une correction pour ramener ces résultats aux valeurs correspondant à un diamètre de l'orifice D_0 identique dans tous les cas. Cette correction a été calculée par la formule (15) et, pour la réduire au minimum, nous avons choisi

$$D_0 = 154 \text{ mm.}$$

Les résultats ainsi corrigés sont récapitulés au tableau de la figure 24. Signalons que cette correction a été en général faible ou nulle ; elle n'a atteint ou dépassé 0,05 que dans 9 cas sur les 77 examinés.

La comparaison avec la formule de première approximation peut alors être effectuée par voie graphique, à l'aide des figures 25 à 27. Nous y avons reporté les points figuratifs des résultats expérimentaux (compte tenu de la dispersion des séries) et les courbes calculées par la formule (15) (cf. I^{re} partie).

Cette comparaison permet de faire immédiatement les principales constatations suivantes :

1. La formule (15) reproduit l'allure générale du phénomène dans le domaine de variation des trois paramètres a , b et c .
2. Malgré les précautions expérimentales prises, une certaine dispersion apparaît lorsque b est élevé ; deux résultats sont considérés comme aberrants ($a/b/c = 0,593/0,75/0,053$ et $0,593/0,833/0,593$, repérés par le signe \circ ?). La dispersion est un peu plus élevée pour $c = 0,053$ (fig. 26) que dans les autres séries.
3. La valeur théorique de Δh apparaît systématiquement trop faible pour a élevé ($a = 0,593$).
4. La valeur théorique de Δh apparaît un peu trop faible lorsque b est petit.
5. Inversement, la valeur théorique de Δh apparaît un peu trop élevée lorsque b est grand, notamment si $c \neq 0$.

Quelques-unes de ces différences proviennent de la trop grande simplicité du schéma hydraulique mis à la base de l'étude de première approximation ; d'autres

Conduite		Angle au sommet du cône B et b						
amont	aval	60°	90°	120°	180°	240°	270°	300°
D_1	D_2	0.167	0.250	0.333	0.500	0.667	0.750	0.833
a	c							
668 mm 0.053	air libre 0	1.60	1.83	2.10	2.78	3.36	3.55	3.68
	668 0.053	1.41..	1.63..	1.93..	2.43..	3.01.	3.10.	3.28
	300 0.264	1.00	—	1.47	2.04	2.46	2.58	2.74
	200 0.593	0.48	—	0.78	1.22	1.58	1.66	1.79
300 mm 0.264	air libre 0	1.56	1.81	2.07	2.52	2.92	3.10	3.25.
	668 0.053	1.48	—	1.99	2.38..	2.69	—	2.80
	300 0.264	0.98	—	1.41	1.85	2.11	2.16	2.25
	200 0.593	0.46	0.63	0.75	1.06	1.29	1.34	1.39
200 mm 0.593	air libre 0	1.44	1.64	1.77	2.04	2.32	2.22	2.22
	668 0.053	1.36.	1.56	1.68.	1.93.	1.94.	1.71..	1.91
	300 0.264	0.90	—	1.08.	1.32.	1.49	1.46	1.54
	200 0.053	0.42	—	0.53.	0.70	0.81	0.82	1.00

* écart quadratique moyen relatif 1-2%

** écart quadratique moyen relatif 2-5%

Fig. 24. — Tableau récapitulatif des résultats expérimentaux corrigés.

sont simplement dues à une valeur trop arrondie des coefficients numériques. Il faut enfin relever que la perte de charge est proportionnelle au carré des vitesses (donc

du débit ou de l'inverse du coefficient de débit) et que les écarts sont ainsi accentués, d'autant plus que Δh est souvent élevé. Par exemple un écart de seulement

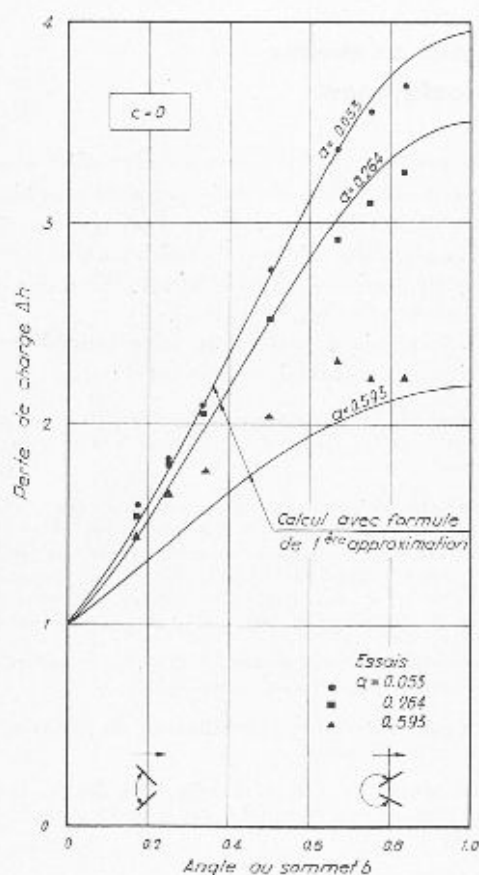


Fig. 25. — Résultats expérimentaux et calcul avec formule (15).
Cas où $c = 0$ (déboûché à l'air).

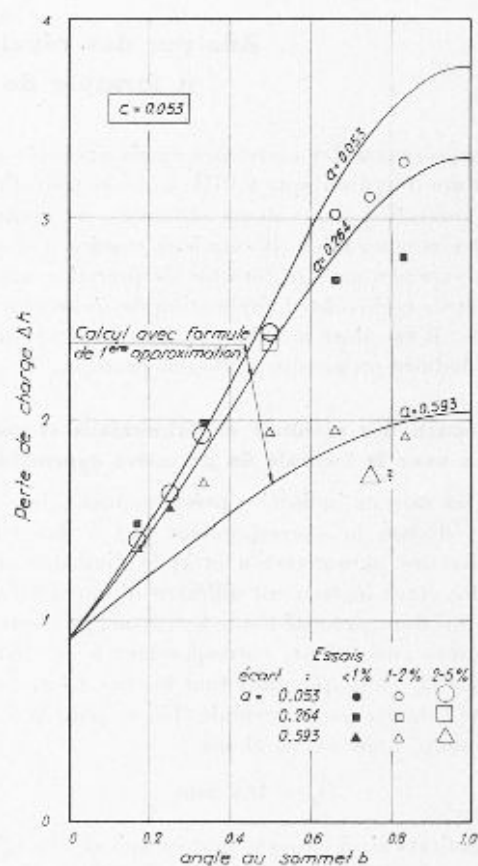


Fig. 26. — Résultats expérimentaux et calcul avec formule (15).
Cas où $c = 0,053$ (conduite aval grande).

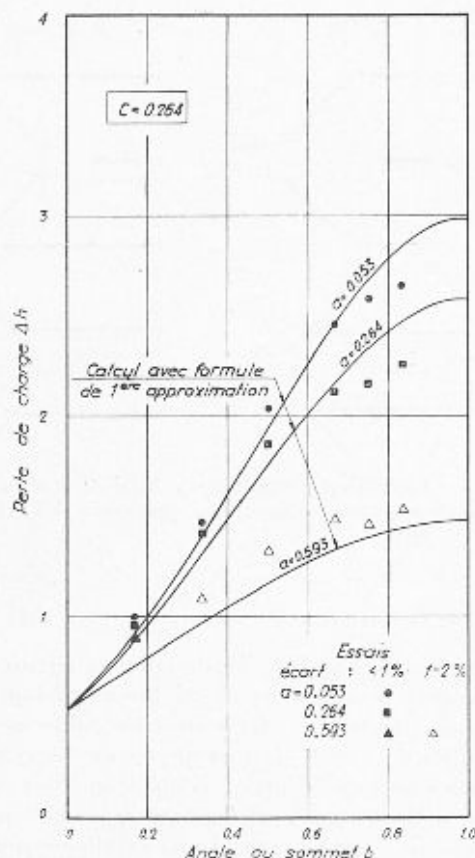


Fig. 27. — Résultats expérimentaux et calcul avec formule (15).
Cas où $c = 0,264$ (conduite aval moyenne).

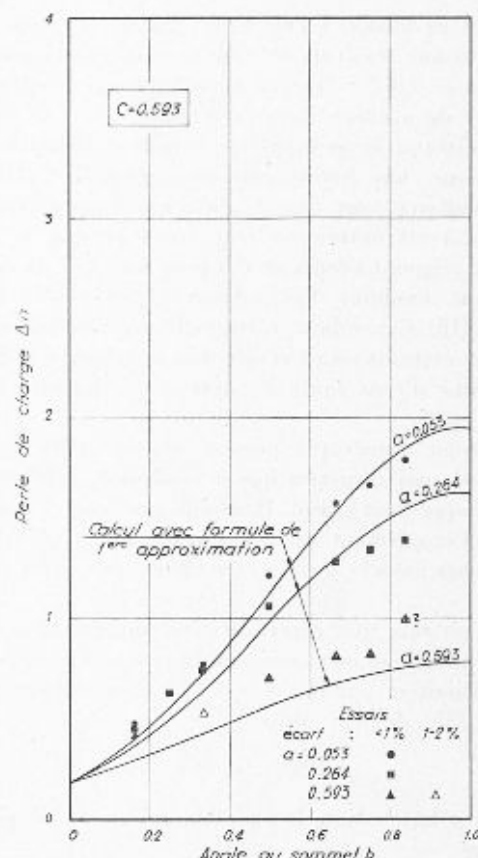


Fig. 28. — Résultats expérimentaux et calcul avec formule (15).
Cas où $c = 0,593$ (conduite aval petite).

1 % sur le coefficient de débit se traduit par une différence de 0,08 sur Δh au voisinage de $\Delta h = 4$. Il ne faut donc pas exagérer l'importance des écarts qui apparaissent sur les figures 25 à 28.

B. Ajustement de la formule

Pour corriger la formule (15), nous examinerons successivement les questions suivantes :

1. Valeur limite de Δh pour $b = 0$.
2. Influence de l'angle du cône b , lorsque la conduite aval est sans effet ($c = 0$) et pour une section amont grande ($a \sim 0$).
3. Effet de la section amont a , la section aval étant sans influence ($c = 0$).
4. Effet de la section aval c .

1. Valeur limite de Δh pour $b = 0$

Lorsque l'angle du cône est nul, il n'y a évidemment plus de contraction (écoulement type 7 ou 9 de la figure 2) et l'on peut s'attendre à trouver un coefficient de débit égal à l'unité, ainsi que nous l'avions admis par la formule (6) (fig. 6).

Les résultats des essais font apparaître que ce n'est pas exactement le cas. Lorsque l'influence de l'aval est nulle ($c = 0$, fig. 25), les valeurs expérimentales permettent d'extrapoler à une valeur limite de 1,05 à 1,08 pour $b = 0$. La contraction étant nulle par définition, cet écart doit être attribué au coefficient de vitesse (rappelons que le coefficient de débit m est le

produit du coefficient de contraction ψ par le coefficient de vitesse ϕ , cf. formule 2). En d'autres termes, les vitesses ne sont pas uniformément réparties dans la section d'écoulement et l'énergie cinétique correspondante est plus élevée que celle qui serait calculée avec une vitesse moyenne ; il en résulte que la charge nécessaire au passage du débit est augmentée, ce qui apparaît dans nos résultats.

Si l'on se donne une répartition des vitesses, on peut calculer cette majoration de l'énergie cinétique. Nous avons fait ce calcul pour la répartition radiale suivante :

$$(16) \quad v_y = v_{\max} \left(\frac{r-y}{r} \right)^{1/7}$$

correspondant à un tuyau lisse et $Re = 100\,000$.

On trouve $v_{\max} = 1,22 v_{\text{moy}}$ et un coefficient de majoration α de 1,05. On aurait ainsi un coefficient de vitesse ϕ de 0,975 qui correspond bien aux indications de la littérature.

Nous admettrons ici $\alpha = 1,06$, tenant compte des résultats expérimentaux. Le numérateur de la formule (15) devient ainsi : 1,03.

Signalons ici qu'il n'est pas évident que cette majoration soit identique lorsque $b \neq 0$.

2. Influence de l'angle du cône

Afin de distinguer, dans la mesure du possible, les influences les unes des autres, nous examinerons l'effet de l'angle b lorsqu'il n'y a pas de conduite à l'aval ; c'est le cas représenté par la figure 25 ($c = 0$), où le

débouché se faisait à l'air libre. En outre, nous nous limiterons aux résultats obtenus avec une section amont élevée ($a = 0,053$), l'erreur éventuelle sur l'estimation de l'effet de a étant alors très faible.

On constate, moyennant la correction indiquée sous 1. ci-dessus, une bonne correspondance des résultats expérimentaux tant que b n'est pas trop élevé. Par contre, Δh est nettement trop élevé lorsque $b > 0,6$, l'écart atteignant l'ordre de 0,5 pour $b = 1$. Cela signifie qu'il faut modifier l'expression $(1,5b - b^{1,49})$ de la formule (15). Cependant, cette expression est elle-même basée sur certains essais et elle doit satisfaire à la condition limite d'être égale à environ 0,5 lorsque $b = 1$ (cf. 1^{re} partie).

L'examen numérique permet de se rendre compte qu'il faut aussi admettre que le coefficient 1,03 est trop élevé lorsque b est grand. Il semble que la forte contraction de l'écoulement tend à uniformiser la répartition des vitesses dans la section contractée, ce qui est concevable.

Pour obtenir une représentation satisfaisante de la réalité, nous sommes ainsi conduits à ramener à zéro le coefficient α lorsque $b = 1$. Le numérateur de la formule (15) devient ainsi

$$(17) \quad 1,03 - 0,03b$$

tandis que la fonction de b au dénominateur est ajustée et donne

$$(18) \quad 1,495b - b^{1,49}.$$

On pourrait croire que des corrections aussi faibles sont sans signification physique. Ce n'est pas le cas, puisqu'on peut vérifier par exemple que pour $a = 0,053$, $b = 0,75$, $c = 0$, on trouve

$$\Delta h = 3,58 \text{ avec l'expression } 1,495b - b^{1,49};$$

$$\Delta h = 3,63 \text{ avec l'expression } 1,5b - b^{1,49};$$

$$\Delta h = 3,66 \text{ avec l'expression } 1,5b - b^{1,5}.$$

C'est bien la première forme qui correspond le mieux aux essais.

3. Influence de la section amont

Cette influence est caractérisée dans la formule (15) par l'expression $(1 - a^2)$. Elle doit notamment satisfaire à la condition évidente d'être nulle si $a = 1$.

L'examen des figures 25 à 28 fait ressortir que cet effet de la section amont est exagéré lorsque a est grand ($a = 0,593$) : la courbe théorique est trop basse. On remarque d'autre part que cette influence n'est pas indépendante de l'angle au sommet : l'effet de a est plus grand si b est grand que s'il est petit (la courbe de première approximation est plus exacte pour b grand). Cela s'explique bien du point de vue hydraulique et la figure 29 le fait ressortir schématiquement : on se rend compte qu'une réduction de la section amont (accroissement de a) perturbe davantage l'écoulement si b est grand que si b est faible.

Pour tenir compte de ce fait, tout en conservant la condition limite pour $a = 1$, nous décomposons $(1 - a^2)$ en $(1 - a)(1 + a)$ et ne faisons intervenir b que dans la seconde parenthèse. Pour conduire à des valeurs satisfaisantes, l'expression s'écrit finalement

$$(19) \quad (1 - a)(1,032 + 1,38a^{1,49}b^{-0,9}).$$

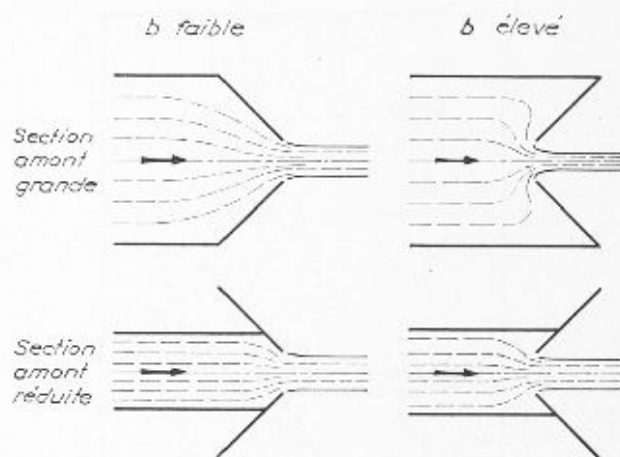


Fig. 29. — Effet d'une réduction de la section amont.
Note : La contraction est davantage perturbée si b est élevé que si b est petit.

4. Effet de la section aval

L'influence de l'aval a été déterminée en première approximation par la formule de Borda. Il faut souligner que, compte tenu des corrections apportées jusqu'ici (effets de a et b), la formule donne des résultats conformes à ceux de l'expérience, quelle que soit ensuite la valeur de la section aval (excepté cependant pour b élevé). Ce fait constitue en soi une excellente démonstration expérimentale de l'exactitude — parfois mise en doute — de la formule de Borda.

On constate cependant que pour b élevé (cône en « rebroussement »), les valeurs théoriques de Δh sont un peu trop élevées. A vrai dire, ce n'est pas le cas pour $c = 0$, mais seulement pour les écoulements noyés ($c = 0,053, 0,264, 0,593$).

Nous sommes ainsi conduits à l'examen de l'écoulement au voisinage du cas limite $b = 1$. Or, à la limite, le cône se réduit à une conduite cylindrique qui, si elle est suffisamment longue, doit produire un effet d'ajutage. Autrement dit, si $b = 1$, on doit introduire $c = 1$ quelle que soit en réalité la valeur prévue pour c . Le schéma de gauche de la figure 30 illustre ce cas.

Dans le cas où b est différent de 1, mais cependant élevé, le cône prend l'allure d'un diffuseur et il est clair qu'un effet d'aspiration doit se produire (fig. 30, schéma de droite).

Cet effet d'ajutage ($b = 1$) ou d'aspiration (b élevé) n'apparaît pas dans le cas où $c = 0$, car l'écoulement y était dénoyé, mais il est nettement visible sur la figure 26, alors même que c est petit (0,053, conduite aval grande). Il n'y a pas de doute que cette influence doit augmenter progressivement, à mesure que b augmente, et probablement apparaître déjà pour des valeurs relativement faibles de b (par exemple 0,7).

On peut concevoir trois zones. Dans la première, $b < 0,6$, il n'y a pas d'effet spécial à l'aval. Dans la deuxième zone, $0,6 < b < 0,8$, une légère dépression apparaît autour de la section contractée, du fait de l'entraînement que le jet y exerce sur l'eau morte et des vitesses que prend celle-ci. Enfin, dans la troisième zone, $b > 0,8$, une véritable aspiration prend naissance avec récupération d'énergie par le diffuseur.

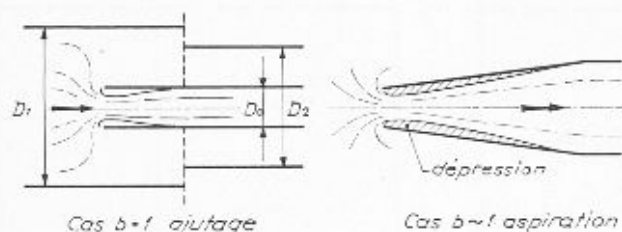


Fig. 30. — Ecoulement si b est voisin de 1.

Si l'on désire trouver une expression mathématique simple, reflétant les considérations qui précèdent et correspondant aux constatations expérimentales, il faut

- ne rien modifier pour $b < 0,6$;
- introduire un effet croissant, mais faible, pour $0,6 < b < 0,8$, par exemple proportionnel à $(b - 0,6)^2$;
- introduire un effet supplémentaire marqué pour $b > 0,8$, par exemple proportionnel à $(b - 0,8)^4$, et tel que finalement l'expression corresponde à la condition limite $c = 1$ pour $b = 1$.

Le terme c de la formule (15) est ainsi remplacé par l'expression

$$(20) \quad c + f$$

où $f = 0$ s'il n'y a pas d'aspiration à l'aval :

- écoulement dénoyé ;
- écoulement noyé avec $b < 0,6$;
- écoulement noyé mais cône court ou tuyau aval court.

$$(21) \quad f = (1 - c) (b - 0,6)^2 \quad \text{pour } 0,6 < b < 0,8 \text{ et écoulement noyé.}$$

$$(22) \quad f = (1 - c) [(b - 0,6)^2 + 525 (b - 0,8)^4] \quad \text{pour } b > 0,8 \text{ et écoulement noyé.}$$

Signalons que nous avons fait quelques essais avec d'autres coefficients, ou exposants, sans obtenir des fonctions acceptables lorsqu'on les compare avec les résultats expérimentaux. L'expression donnée pour f n'est cependant qu'une estimation et ne saurait pour l'instant être considérée comme sérieusement étayée. Elle n'est mentionnée ici que par suite de la volonté de donner une expression satisfaisant à la condition limite et tenant par conséquent compte exactement de l'effet d'ajutage pour $b = 1$.

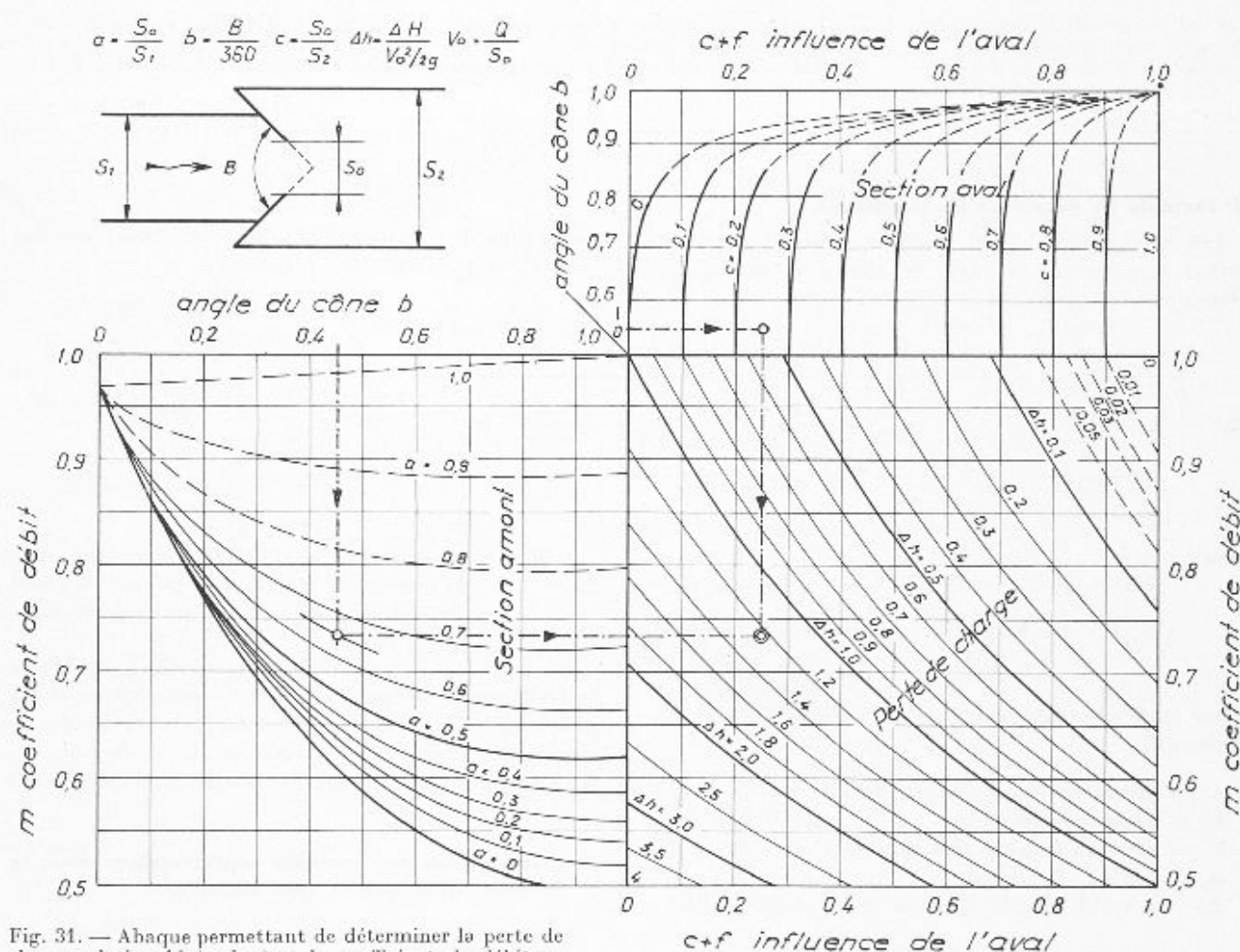


Fig. 31. — Abaque permettant de déterminer la perte de charge relative Δh (a, b, c) et le coefficient de débit m .

Exemple de calcul : $a = 0,65$ $b = 0,45$ $c = 0,25$
on trouve : $\Delta h = 1,23$ [avec $f = 0$ et $m = 0,735$]

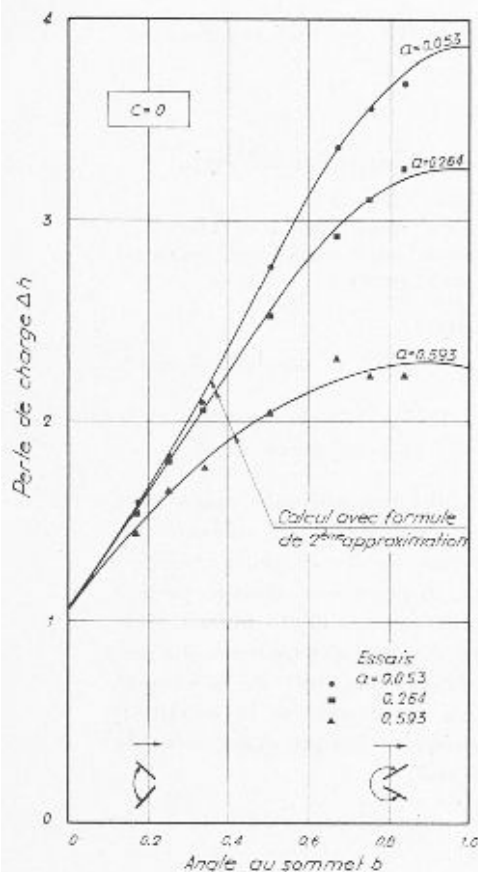


Fig. 32. — Résultats expérimentaux et calcul avec formule (23).
Cas où $c = 0$ (débouché à l'air).

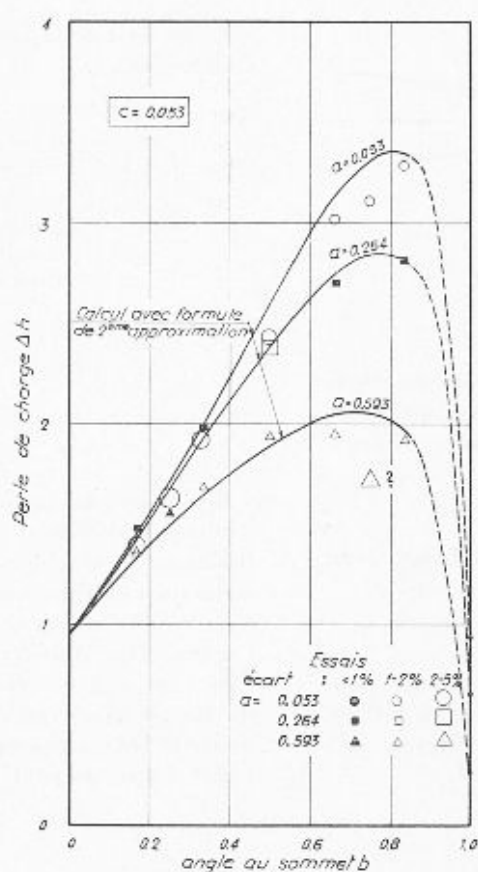


Fig. 33. — Résultats expérimentaux et calcul avec formule (23).
Cas où $c = 0,053$ (conduite aval grande).

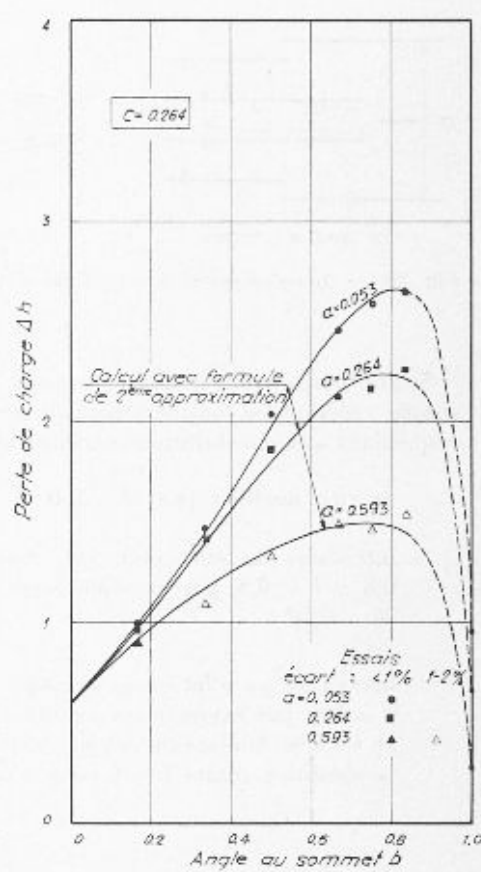


Fig. 34. — Résultats expérimentaux et calcul avec formule (23).
Cas où $c = 0,264$ (conduite aval moyenne).

C. Formule de deuxième approximation

Les développements qui précèdent permettent d'exprimer comme suit la perte de charge à travers un étranglement conique¹:

$$(23) \quad \Delta h = \left[\frac{1,03 - 0,03 b}{1 - (1 - a)(1,032 b + 1,38 a^{1,48} b^{0,7})(1,495 - b^{0,49})} - (c + f) \right]^2$$

$$\begin{aligned} \text{avec } f &= 0 && \text{pour } b < 0,6 \\ &= (1 - c)(b - 0,6)^2 && \text{pour } 0,6 < b < 0,8 \\ &= (1 - c) \left[(b - 0,6)^2 + 525(b - 0,8)^4 \right] && \text{pour } b > 0,8 \end{aligned}$$

(pour la détermination de f , voir le paragraphe B. 4. ci-dessus).

- a = paramètre de la section amont = S_0/S_1
- b = paramètre du cône = $B/360^\circ$
- c = paramètre de la section aval = S_0/S_2
- S_0 = section de l'orifice
- Δh = perte de charge relative = $\Delta H/(V_0^2/2g)$

¹ Un facteur b a été passé d'une parenthèse dans l'autre, au dénominateur, pour éviter l'indétermination lorsque $b = 0$ et pour éliminer la puissance négative $-0,3$.

(pour plus de précisions dans les définitions, voir les généralités au début de l'exposé).

Cette formule (23) n'est autre que

$$(24) \quad \Delta h = \left[\frac{1}{m} - (c + f) \right]^2$$

où m

est le coefficient de débit;

$(c + f)$ est la section aval fictive à introduire dans la formule de Borda pour calculer la perte de charge, compte tenu de l'aspiration.

On peut établir un abaque donnant Δh ; cependant cette expression dépendant de trois paramètres, il est nécessaire de passer par la formule (24). On détermine ainsi $m(a, b)$ puis $(c + f)$ fonction de (c, b) puis $\Delta h(m, c + f)$. Cet abaque est donné à la figure 31.

D. Comparaison des résultats expérimentaux avec la formule de deuxième approximation

Cette comparaison est faite à l'aide des figures 32 à 35, qui reproduisent les mêmes résultats expérimentaux que précédemment. Nous y avons reporté les

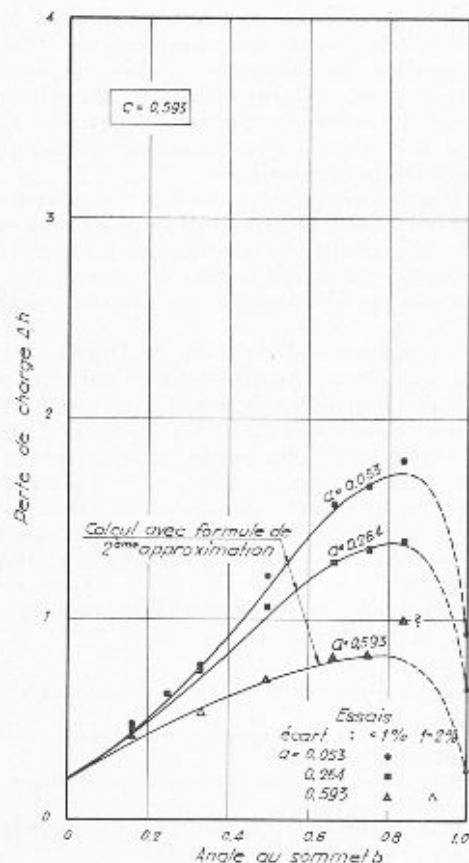


Fig. 35. — Résultats expérimentaux et calcul avec formule (23). Cas où $c = 0,593$ [conduite aval petite].

BIBLIOGRAPHIE

Mécanique expérimentale de fluides. Tome I : Statique et dynamique des fluides non visqueux, par R. Comollet, professeur à la Faculté des sciences de Nancy. Masson & Co, éditeurs, 120, bd Saint-Germain, Paris VI^e. — Un volume 244 p., 220 fig.

Alors que dans les études théoriques, la notion de fluide parfait s'est imposée tout naturellement en raison des simplifications intéressantes qu'elle introduisait, la comparaison avec les propriétés des fluides réels conduisit souvent à certaines contradictions, appelées paradoxes (paradoxes de d'Alembert, de du Buat...) de sorte que suivant le cas, fluides réels et fluides parfaits se comportaient semblablement ou différemment. Aussi pendant longtemps le domaine d'étude de l'ingénieur et celui du mathématicien ne purent correspondre aux mêmes préoccupations. Mais à mesure que les connaissances s'étendaient de part et d'autre, et se précisaient, la distinction ne fut plus possible. La théorie des fluides dut être reconsidérée, de nouvelles notions furent introduites : turbulence, couche limite..., la théorie de la similitude fut utilisée d'une manière systématique (études sur maquettes), etc...

Tout cet aspect de la dynamique des fluides appartient donc à la physique et c'est cet aspect qui doit retenir l'attention dans le qualitatif d'expérimental qui figure en titre de cet ouvrage en deux volumes.

Dans le premier sont précisées les bases fondamentales de la mécanique des fluides et établies les principales lois relatives à la théorie des fluides parfaits, c'est-à-dire non visqueux. Sans s'attarder à la théorie des écoulements à potentiel, l'auteur montre comment les lois classiques dérivent des grands principes de mécanique et de physique.

Divers sujets d'importance secondaire ont été laissés

courbes que l'on peut calculer avec la formule (23); celles-ci ont été indiquées en pointillé dans la partie droite pour souligner l'incertitude existant dans ce domaine. Par comparaison avec les figures 25 à 28, on peut constater l'amélioration apportée par l'ajustement de la formule.

Conclusions

La formule (23) a été établie sur la base d'une étude théorique préliminaire (I^{re} partie ci-dessus) et d'essais sur modèle. Elle donne, pensons-nous, une bonne valeur de la perte de charge à travers un étranglement conique, compte tenu de conduites placées à l'amont et à l'aval, et cela pour une valeur quelconque de l'angle au sommet du cône. Son utilisation est facilitée par l'abaque de la figure 31.

Il convient cependant d'être un peu prudent si l'on s'écarte trop du domaine prospecté par les essais, par exemple pour $a > 0,7$ et plus particulièrement pour $b > 0,85$. Les conditions aux limites pour a ou b ou $c = 1$ sont toutefois satisfaites. Inversement, si les paramètres ont une faible valeur, l'exactitude paraît être bonne.

Relevons, pour terminer, que si de tels essais sur modèle restent toujours entachés d'une certaine approximation, ils constituent néanmoins la seule méthode de détermination des pertes de charges à travers des formes trop particulières ou complexes pour être accessibles à une étude théorique.

de côté comme la capillarité, l'auteur n'a délibérément pas traité la magnéto-hydrodynamique ou la dynamique des échanges thermiques dont le développement, considérable depuis quelques années, nécessiterait une étude complète.

Très bien présenté, largement illustré, ce volume s'adresse aux étudiants de nos Ecoles techniques, étant le reflet d'un cours professé par l'auteur.

Plan de l'ouvrage :

Statique des Fluides incompressibles et compressibles. Flotteurs. — Rappels de cinématique des Fluides avec une étude particulière des écoulements plans. — Dynamique des Fluides parfaits incompressibles. — Application du théorème de Bernoulli et du théorème des quantités de mouvement. — Dynamique des Fluides compressibles. Etude particulière des écoulements unidimensionnels. Etude des tuyères. — Notions sur les ondes de choc. Propagation des ondes élastiques. Coups de bélier. — Bibliographie. — Index alphabétique des matières.

Klebeverbindungen. Theorie und Anwendungen, par Artur Pohl, ingénieur, Stuttgart. Collection « Technische Rundschau », cahier 44. Tiré à part de la « Technische Rundschau », Bern, n^{os} 1, 7, 14 de 1960 et 2, 7, 12, 17 de 1961. — Un fascicule 21×30 cm, 79 pages, figures, tableaux. Prix : broché, 5 fr. 80.

Cette publication groupe quatre études intéressantes consacrées aux procédés modernes d'assemblage par collage, aux avantages qu'ils présentent et aux caractéristiques physiques et mécaniques nécessaires à connaître pour exécuter les collages de manière convenable. En voici les titres :

- Metallkleben. Theorie und Anwendungen.
- Das Metallkleben, ein neuzeitliches Verbindungsmittel, in Theorie und Praxis.
- Klebemitteltypen, deren Eigenschaften und Verarbeitungsbedingungen.
- Probleme der Verklebung von Kunststoffen aller Art.