

Ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie

Hydraulic jump in a suddenly widened circular tunnel

BACHIR ACHOUR, *Maître de conférence, Institut d'hydraulique, Université de Biskra, BP.145, 07000, Biskra, Algérie*

RÉSUMÉ

Le ressaut hydraulique à écoulement amont non développé, évoluant dans une galerie circulaire brusquement élargie est examiné du point de vue théorique et expérimentale. La relation fonctionnelle liant les divers paramètres intervenant au phénomène est définie et permet en particulier le calcul du taux d'élargissement de la galerie nécessaire à la formation du ressaut. Enfin, les caractéristiques de celui-ci, telles que ses longueurs et son profil de surface axial, sont quantifiées.

ABSTRACT

The evolution of a hydraulic jump in a suddenly widened circular cross-section is investigated theoretically and experimentally. The flow upstream is not developed. A functional relationship is defined linking the various parameters which influence the phenomenon. The analysis makes it possible to compute the extent of the widening of the tunnel which is necessary to ensure development of the jump. The characteristics of the jump such as its length and axial surface profile are quantified.

1 Introduction

La galerie circulaire brusquement élargie est l'ouvrage le plus souvent rencontré dans les évacuateurs de crues en puits. Elle est connectée au puits de l'évacuateur par l'intermédiaire d'un coude de diamètre de sortie très inférieur à celui de la galerie. Ce type d'ouvrage fonctionne sous des charges très élevées impliquant une importante énergie cinétique à la sortie du coude, c'est à dire au droit de l'élargissement. L'écoulement dans le coude est le plus souvent en charge, tandis que la galerie est en règle générale le siège d'un écoulement à surface libre. La galerie s'étend sur une longueur souvent importante pour aboutir plus à l'aval dans l'oued dans lequel elle déverse le débit recueilli par l'évacuateur. La profondeur de l'écoulement dans l'oued peut s'élever et son influence sur le comportement de l'écoulement dans la galerie peut ne pas être insignifiant. Si le plan de charge à l'aval de l'élargissement est tel que l'écoulement y est en régime fluvial, un ressaut peut prendre naissance à l'intérieur de la galerie et dont la position initiale dépendra fortement des conditions de l'écoulement incident.

Le ressaut hydraulique évoluant dans une conduite ou une galerie circulaire partiellement occupée par l'écoulement n'a fait l'objet que de quelques recherches. Les travaux les plus significatifs et qui ont contribué à définir les caractéristiques du ressaut tel que le rapport Y des hauteurs conjuguées sont ceux de Lane et Kindsvater [1], Rajaratnam [3,4,5] et Kunstatsky et Vyborá [6]. Ces travaux ont surtout montré que les rapports Y expérimentaux sont légèrement inférieurs aux rapports théoriques; cette particularité a été par ailleurs confirmée par les essais de Silvester [2].

Les travaux de Rajaratnam [3,4,5] ont notamment mis l'accent sur la formation latérale d'une expansion de l'écoulement incident caractérisant le pied du ressaut, aussi bien pour le canal à géométrie exponentielle que circulaire.

Les études les plus récentes effectuées sur le ressaut dans une conduite circulaire sont celles de Hager [7,8]; les essais ont cependant été menés dans une conduite profilée en "U" constituée à la base d'un demi-cercle et surmonté de deux

parois verticales. Ce modèle physique a permis en outre une étude comparative des caractéristiques du ressaut évoluant dans une conduite circulaire et une conduite en "U". Pour la même valeur de la hauteur relative initiale du ressaut et du débit relatif évacué par le canal, les essais ont montré que le rapport Y des hauteurs conjuguées ne sont que légèrement différents. Pour les valeurs élevées de la hauteur relative initiale de l'écoulement incident, les caractéristiques du ressaut dans le canal profilé en "U" sont comparables à celles du ressaut évoluant dans un canal de section droite rectangulaire.

L'objectif principal de notre étude est d'observer expérimentalement le comportement du ressaut dans une galerie horizontale et circulaire brusquement élargie; le ressaut est créé de telle manière que l'écoulement incident soit non développé. Nous tenterons alors de définir la relation fonctionnelle liant les divers paramètres intervenant au phénomène et que nous présenterons en termes adimensionnels afin de lui donner un caractère de validité générale. L'influence du taux d'élargissement sera également observée ainsi que celle du débit relatif rapporté au tronçon initial de conduite circulaire générant l'écoulement incident. Les caractéristiques du ressaut telles que ses longueurs ainsi que son profil de surface axial seront quantifiées et des relations simples adimensionnelles seront proposées.

2 Considérations théoriques

2.1 Condition d'apparition du ressaut

La figure 1 représente de manière schématique un ressaut hydraulique évoluant dans une galerie circulaire brusquement élargie de diamètre D . L'écoulement incident est généré par une conduite circulaire de diamètre d et le ressaut est localisé à $x \approx 0$, où x représente la coordonnée longitudinale.

Toutes les configurations de l'écoulement telles qu'elles sont représentées sur la figure 1 correspondent à l'égalité $H_o = H_1$ des charges dans les sections voisines 0-0 et 1-1 :

Revision received July, 1999. Open for discussion till February 28, 2001.

$$\frac{d}{2} + \frac{8Q^2}{g\pi^2 d^4} = h + \frac{8Q^2}{gD^4(\alpha - \sin\alpha\cos\alpha)^2} \quad (1)$$

Q est le débit volume, α est le demi-angle au centre, mesuré en radian, du segment circulaire de hauteur h et tel que $\alpha = \cos^{-1}(1 - 2h/D)$, g est l'accélération de la pesanteur. La relation (1) peut s'écrire en termes adimensionnels :

$$Q_d^{*2} = (\pi^2/8) \frac{(\beta\tau - 1/2)}{[1 - \pi^2\beta^{-4}(\alpha - \sin\alpha\cos\alpha)^{-2}]} \quad (2)$$

$Q_d^* = [Q^2/(gd^5)]^{1/2}$ est le débit relatif rapporté au diamètre d , $\beta = D/d$ est le taux d'élargissement de la galerie et $\tau = h/D$ est le paramètre de forme du segment circulaire dans la section 1-1 (figure 1). Les racines, obtenues par application de la relation (2), n'ont un sens physique que sous la condition $\beta\tau \geq 1$, ou bien $h/d \geq 1$; ce résultat était prévisible étant donnée la configuration de l'écoulement pour $x = 0$ (figure 1). Lorsque le régime d'écoulement dans la galerie devient critique, l'inégalité précédente se transforme en égalité et s'écrit :

$$\tau_c = \beta^{-1} \quad (3)$$

L'indice "c" désigne l'écoulement critique. En outre, l'écoulement critique dans la galerie circulaire se traduit par la condition :

$$\frac{64Q_d^{*2} \sin\alpha_c}{(\alpha_c - \sin\alpha_c \cos\alpha_c)^3} = 1 \quad (4)$$

$Q_d^* = [Q^2/(gd^5)]^{1/2} = \beta^{-5/2} Q_d^{*c}$, $\alpha_c = \cos^{-1}(1 - 2\tau_c)$. En tenant compte de (3), la relation (4) s'écrit :

$$Q_d^{*2} = \frac{(\alpha_c - \sin\alpha_c \cos\alpha_c)^3}{64\tau_c^5 \sin\alpha_c} \quad (5)$$

C'est la relation (5) qui permet de définir le débit limite $Q_{d,\text{lim}}^*$ au-delà duquel le ressaut apparaît dans la galerie circulaire brusquement élargie et caractérisé par un écoulement amont non développé tel qu'il est représenté sur la figure 1.

2.2 Relation générale régissant le ressaut dans la galerie circulaire brusquement élargie

L'application du théorème de la quantité de mouvement dans la direction longitudinale, entre les sections initiale 0-0 et finale 2-2 du ressaut correspondant respectivement à $x = 0$ et $x = L_j$ (figure 1), conduit à écrire, en admettant une répartition hydrostatique de la pression et une distribution uniforme de la vitesse:

$$\bar{h}_o A_o + \frac{Q^2}{gA_o} + F_x = \bar{h}_2 A_2 + \frac{Q^2}{gA_2} \quad (6)$$

$\bar{h}_o = d/2$ désigne le centre de gravité de la section initiale, $\bar{h}_2 = (D^3/12A_2)\sin^3\alpha_2 - (D/2)\cos\alpha_2$ est la position du centre de gravité de la section $A_2 = (D/2)^2(\alpha_2 - \sin\alpha_2\cos\alpha_2)$ comptée à

partir de la surface libre et où $\alpha_2 = \cos^{-1}(1 - 2\tau)$ est le demi-angle au centre, mesuré en radian, du segment circulaire de hauteur h_2 , F_x est la force de pression exercée par la paroi de l'élargissement dans la direction longitudinale. Par analogie à la relation de Borda-Carnot et au vu de la forme de la relation (6), il est admissible d'écrire que $F_x \approx 0,5(D-d)h_1^2$, avec $h_1 = d$. La relation (6) s'écrit alors :

$$Q_d^{*2} = \frac{\beta^3[(2/3)\sin^3\alpha_2 - \cos\alpha_2(\alpha_2 - \sin\alpha_2\cos\alpha_2)] - 4(\beta-1) - \pi}{(32/\pi)[1 - \pi\beta^{-2}(\alpha_2 - \sin\alpha_2\cos\alpha_2)^{-1}]} \quad (7)$$

Lorsqu'il s'agit de répondre à un besoin de dimensionnement, l'application de la relation (7) permet d'évaluer le taux d'élargissement β et par suite la valeur du diamètre D de la galerie, à partir des valeurs connues du débit relatif Q_d^* et du taux de remplissage aval imposé $t = h^2/D$.

3 Etude expérimentale

3.1 Protocole expérimental

Les figures 1 et 2 montrent le modèle expérimental testé. Celui-ci est composé d'une galerie circulaire en Plexiglas transparent d'une longueur de 3 m et de diamètre intérieur $D = 0,289$ m. La galerie est connectée à son extrémité amont à un tronçon de conduite interchangeable, de section droite circulaire et de diamètre d , directement alimenté par une pompe axiale assurant un débit maximum de 30 l/s. L'écoulement dans ce tronçon de conduite initiale est sous pression pour toute la gamme des débits et des diamètres utilisés.

L'écoulement incident est donc généré par le tronçon de conduite initiale alimentant la galerie et la position initiale du ressaut peut être réglée par le déplacement verticale de la vanne de fond située à l'extrémité aval du banc d'essai. La galerie débouche dans un canal de restitution de forme rectangulaire par lequel transite l'écoulement avant de déverser dans un bassin d'accumulation qui précède la pompe. Tout le dispositif ainsi décrit fonctionne en circuit fermé. Cinq valeurs de d variant entre 5 cm et 12 cm ont été considérées et autant de valeurs du taux d'élargissement $\beta = 5,780$; 4,128; 3,211; 2,890 et 2,408. Les débits Q , mesurés à $\pm 0,5$ l/s au moyen d'un débitmètre à diaphragme préalablement étalonné, se trouvent dans la gamme 2,4 l/s et 23 l/s. La longueur de la galerie a été suffisante pour contenir l'ensemble des profils de surface du ressaut créés. Les profondeurs de l'écoulement, telles que la profondeur finale et les hauteurs $h(x)$ du profil de surface du ressaut ont été mesurées pour chacun des débits volumes Q . La mesure de ces grandeurs a été rendue possible grâce à une série de prises de pression statique placées le long de la génératrice inférieure de la galerie et reliées à un tableau manométrique (figures 2.a et 2.b). En raison des fluctuations parfois importantes de la surface libre, les profondeurs correspondantes ont été mesurées à ± 1 cm.

Les longueurs caractéristiques du ressaut, c'est à dire la longueur L_r du rouleau de surface ainsi que la longueur L_j du ressaut, ont été mesurées avec une précision de ± 10 cm à l'aide d'un ruban gradué. La longueur L_r a été visiblement associée à la section aval

de l'écoulement indiquant la fin du rouleau de surface, tandis que la longueur L_j a été associée à la section aval pour laquelle l'écoulement tend à devenir parallèle à la génératrice inférieure de la galerie. Ceci a pu être aisément observé grâce aux prises de pression statique placées à l'aval de la galerie.

Une large gamme de valeurs de la profondeur h_2 du ressaut a pu être expérimentalement obtenue et correspond à $7 \text{ cm} \leq h_2 \leq 28,9 \text{ cm}$ ou à un taux de remplissage aval de $0,245 \leq \tau \leq 1$. Le taux de remplissage aval maximal $\tau = 1$ n'a pu être strictement atteint que pour la plus grande valeur du taux d'élargissement $\beta = 5,780$. La figure 2.b montre clairement un rouleau de surface obtenu pour un taux de remplissage aval égal à l'unité.

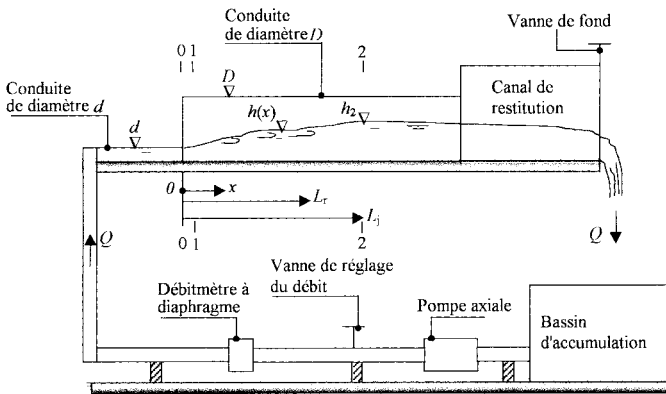


Fig. 1. Schéma simplifié du dispositif expérimental.

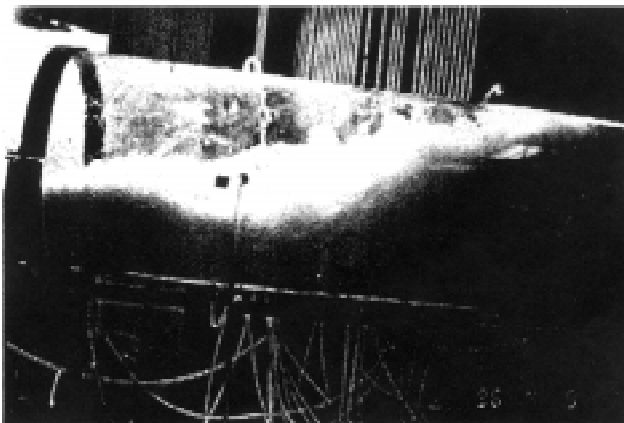
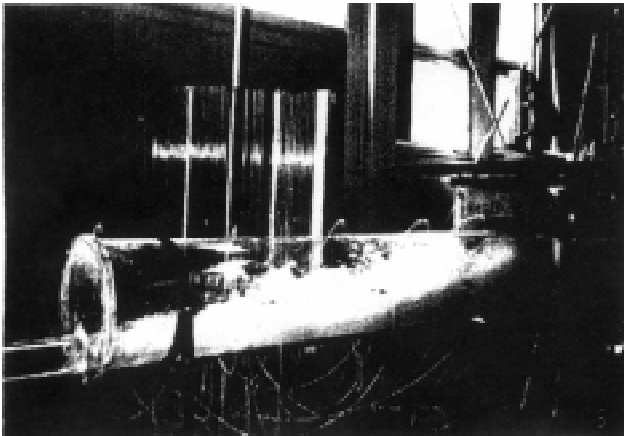


Fig. 2. a) Vue d'ensemble du dispositif expérimental en direction de l'écoulement, b) Vue de profil de la galerie et du rouleau de surface.

3.2 Résultats expérimentaux

3.2.1 Relation générale

L'objectif de cette première partie de l'étude est de vérifier expérimentalement la validité de la relation (7). La figure 2 montre la variation expérimentale et théorique de τ en fonction du débit relatif Q_d^* pour chacune des valeurs testées du taux d'élargissement β de la galerie. La courbe limite d'apparition du ressaut, tracée selon la relation (5) y est également représentée. Nous pouvons ainsi clairement observer que les points expérimentaux répondent de manière satisfaisante aux courbes théoriques.

Il faut noter également que l'apparition du ressaut dans la galerie ne correspond pas à l'égalité $\tau = \beta^{-1}$ mais satisfait l'inégalité $\tau > \beta^{-1}$; ainsi, le taux de remplissage aval de la galerie est tel que $\beta^{-1} < \tau \leq 1$.

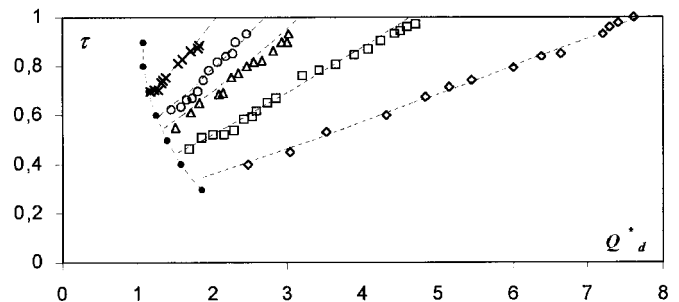


Fig. 3. Variation théorique et expérimentale du taux de remplissage aval $\tau = h^2/D$ de la galerie en fonction du débit relatif $Q_d^* = [Q^2/(gd^5)]^{1/2}$. (---) courbes théoriques tracées selon la relation (7). (-.-.-) courbe limite d'apparition du ressaut selon la relation (5). Points expérimentaux : (x) $\beta = 2,408$; (o) $\beta = 2,890$; (Δ) $\beta = 3,211$; (\blacksquare) $\beta = 4,128$; (\diamond) $\beta = 5,780$.

3.2.2 Longueurs caractéristiques du ressaut

Les longueurs L_r et L_j du ressaut ne peuvent être quantifiées que par la voie expérimentale. En raison de l'instabilité horizontale du ressaut et de l'imprécision avec laquelle sont localisées les sections correspondantes, la représentation graphique de la variation des longueurs relatives L_r/h_2 et L_j/h_2 caractéristiques du ressaut se traduit par un nuage de points plus ou moins épais selon la précision de l'appareillage et de l'habileté du manipulateur.

Les figures 4.a et 4.b montrent respectivement la variation expérimentale des longueurs relatives L_r/h_2 et L_j/h_2 en fonction du débit relatif Q_d^* et pour l'ensemble des valeurs testées du taux d'élargissement β de la galerie. Nous pouvons ainsi observer que les mesures expérimentales se traduisent par un nuage de points relativement mince qui permet de conclure que les points obtenus se répartissent uniformément autour d'une courbe plate ou même autour d'une valeur moyenne. En outre, les figures 4.a et 4.b n'indiquent aucune influence significative du débit relatif Q_d^* et du taux d'élargissement β sur les longueurs relatives du ressaut. Ce résultat est surtout observé pour $Q_d^* \leq 6$ et nous pouvons écrire:

$$L_j/h_2 = 7,00 \pm 0,5 \quad (8)$$

$$L_r/h_2 = 6,50 \pm 0,5 \quad (9)$$

Les relations (8) et (9) indiquent que les longueurs relatives du ressaut dans une conduite circulaire brusquement élargie et correspondant à une position telle que $x \approx 0$ sont légèrement plus grandes, mais toutefois comparables, que celles du ressaut évoluant dans une conduite circulaire dépourvue d'élargissement pour lequel $L_r/h_2 = 6$ [7].

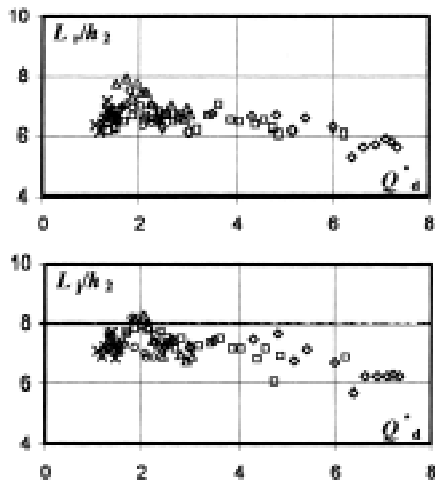


Fig. 4. Variation expérimentale des longueurs relatives du ressaut dans une galerie circulaire brusquement élargie, en fonction du débit relatif Q_d^* et pour divers taux d'élargissement β . a) longueur relative du rouleau, b) longueur relative du ressaut. Notation selon la figure 3.

3.2.3 Profil de surface axial du ressaut

L'étude expérimentale du ressaut à écoulement amont non développé dans une galerie circulaire brusquement élargie n'a montré aucune asymétrie de l'écoulement par rapport à l'axe longitudinal de la conduite. Une relative instabilité horizontale a été cependant observée pour toute la gamme des débits Q et des taux d'élargissement β . L'objectif que vise la présente partie de l'étude est de définir le profil de surface du ressaut dans l'axe longitudinal de la galerie. Pour une valeur fixée de β , il est possible d'obtenir différents profils de ressauts selon le débit évacué. En règle générale, le profil de surface du ressaut est défini comme étant la courbe moyenne de la surface libre entre les sections initiale et finale du ressaut de profondeur respective h_1 et h_2 . Nous adopterons alors le schéma de définition représenté par la figure 1. L'introduction des variables y et X telles que $y = [h(x) - h_1]/(h_2 - h_1)$ et $X = x/L_j$, ($0 \leq y \leq 1$, $0 \leq X \leq 1$), a permis de définir le profil de surface généralisé du ressaut à travers une relation unique adimensionnelle. La figure 5 traduit la variation expérimentale de y en fonction de X pour l'ensemble des valeurs testées du taux d'élargissement β . Nous pouvons ainsi remarquer que l'ensemble des couples (y, X) se situent sur une courbe unique. Il a été enfin remarquable de constater que cette courbe unique répond avec une excellente approximation à la relation:

$$y = \sin(90^\circ X), 0 \leq X \leq 1 \quad (10)$$

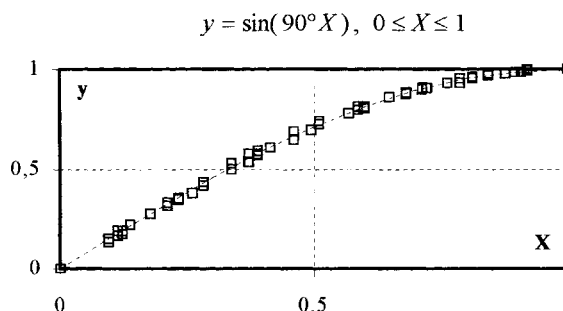


Fig. 5. Profil de surface généralisé $y(X)$ du ressaut à écoulement amont non développé dans une galerie circulaire brusquement élargie : $0,32 \leq Q_d^* \leq 14,30$; $2,408 \leq \beta \leq 5,780$. (- - -) relation (10).

4 Conclusion

Le ressaut hydraulique à écoulement amont non développé et évoluant dans une galerie horizontale circulaire brusquement élargie a été examiné du point de vue théorique et expérimentale. Tenant compte de l'influence de la réaction de la paroi de l'élargissement, l'application du théorème de la quantité de mouvement dans le sens longitudinal a permis d'établir la relation liant le débit relatif $Q_d^* = [Q^2/(gd^5)]^{1/2}$ rapporté au diamètre d amont, le taux d'élargissement $\beta = D/d$ de la galerie où D est le diamètre de celle-ci et enfin le taux de remplissage aval $\tau = h_2/D$. Le débit limite relatif $Q_{d^*,lim}$ d'apparition du ressaut a été défini et correspond à la condition $\beta\tau = 1$.

L'étude expérimentale s'est basée sur cinq valeurs du taux d'élargissement β correspondant à la gamme $2,408 \leq \beta \leq 5,780$. Le taux de remplissage aval τ de la galerie, c'est à dire la hauteur relative finale du ressaut, a été tel que $0,245 \leq \tau \leq 1$. L'analyse des mesures expérimentales a montré que les longueurs relatives L_r/h_2 du rouleau de surface et L_j/h_2 du ressaut sont indépendantes du débit relatif Q_d^* et du taux d'élargissement β ; ces longueurs relatives sont en outre comparables à celles du ressaut évoluant dans une conduite circulaire dépourvue d'élargissement. L'étude expérimentale s'est enfin intéressée au profil de surface du ressaut.

Notations

d	(m)	diamètre initial
D	(m)	diamètre de la galerie
g	(ms^{-2})	accélération de la pesanteur
h	(m)	profondeur d'écoulement
h_2	(m)	hauteur finale du ressaut
L_j	(m)	longueur du ressaut
L_r	(m)	longueur du rouleau
Q	(m^3s^{-1})	débit volume
Q_d^*	(-)	débit relatif rapporté à d , $Q_d^* = [Q^2/(gd^5)]^{1/2}$
Q_D^*	(-)	débit relatif rapporté à D , $Q_D^* = [Q^2/(gD^5)]^{1/2}$
x	(m)	coordonnée longitudinale
X	(-)	coordonnée relative longitudinale, $X = x/L_j$
y	(-)	profondeur adimensionnelle de l'écoulement
β	(-)	taux d'élargissement de la galerie, $\beta = D/d$
τ	(-)	taux de remplissage aval de la galerie, $\tau = h_2/D$

Références bibliographiques

1. LANE, E.W., KINDSVATER, C.E., Hydraulic jump in enclosed conduits, *Engineering News-Records*: 121 (26), 1938.
2. SILVESTER, R., Hydraulic jump in all shapes of horizontal channels, *Proc. ASCE, J. Hyd. Div.*, 90, (HY1): 23–55, 1964.
3. RAJARATNAM, N., Discussion of [2], *J. Hyd. Div., ASCE*, 90 (4): 341–350, 1964.
4. RAJARATNAM, N., Hydraulic jump in horizontal conduits, *Water Power*, 17: 80–83, 1965.
5. RAJARATNAM, N., Hydraulic jumps, *Advances in hydroscience*, 4: 197–280, ed. V.T. Chow, Academic Press, New York, N.Y., 1967.
6. KUNSTATSKY, J., VYBORA, P., Die Tiefen des Wassersprunges mit freiem Wasserspiegel im Kreisrunden Querschnitt, *Vodohospodarsky Casopic. Cislo 1*, 1966.
7. HAGER, W.H., Der Abfluss im U-Profil, *Korrespondenz Abwasser*, 34: 468–482, 1987.
8. HAGER, W.H., Hydraulic jump in U-shaped channel, *Journal of Hydraulic Engineering*, 115 (5): 667–675, 1989.

