



ANALYSE DE LA PERFORMANCE D'UN DISSIPATEUR D'ÉNERGIE DE TYPE AUGE

EL AMRI A.¹, MAJDOUB R.¹, VERRETTE J.L.²

¹Département du Génie des Systèmes Horticoles et du Milieu Naturel. Université de Sousse. Institut Supérieur Agronomique, BP 47, 4042 Chott Mariem, Tunisie

²Département de Génie Civil, FSG, Université Laval, Québec (QC), Canada
elasma@yahoo.com, rmajdoub@yahoo.com

RESUME

La stabilité d'un dissipateur de type auge peut être évaluée sur la base de l'étude des efforts hydrodynamiques, en terme de pression et de fluctuation de pression, agissant sur le radier en aval. Les résultats des essais réalisés sur deux types de radier, l'un fixe en béton et l'autre en matériaux meubles, ont montré que les efforts hydrodynamiques dépendent fortement du degré de turbulence de l'écoulement, des caractéristiques géométriques du dissipateur exprimées par sa hauteur de sortie et du type de radier en aval. De plus, selon les circonstances, l'affouillement donne lieu à des efforts amoindris reflétant un écoulement établi.

Bien que les sollicitations sur le radier soient atténuées par l'affouillement, un dissipateur ayant une très faible hauteur de sortie présente toujours une distribution de type (A, I), reflétant une distribution non sécuritaire. De plus, l'écoulement peut engendrer le déchaussement de la structure. Un dissipateur ayant une hauteur de sortie moyenne n'est jugé performant qu'en présence d'un faible débit, condition non assurée pendant les crues. Cependant, un dissipateur de grande hauteur de sortie semble offrir une meilleure performance. Ce dernier, non seulement favorise un écoulement plus stable (une distribution de type (B, II)) dans la zone proche du dissipateur, mais aussi génère un dépôt de matériaux au pied du dissipateur pouvant protéger ses fondations et augmenter sa stabilité.

Mots clés : dissipateur de type auge, sollicitations, efforts hydrodynamiques, pression, fluctuation de pression, érosion.

ABSTRACT

The stability of a roller bucket spillway can be assessed on the basis of the study of the hydrodynamic efforts, in term of pressure and pressure fluctuations, downstream the spillway. The tests results conducted on a scale model with two different types of bed, solid horizontal and erodible bed, have shown that hydrodynamic efforts are dependent of the flow turbulence, geometrical characteristics of the spillway, expressed by the height of the bucket lip, and the shape of the bed. Besides that, scour gives a reduced efforts reflecting a stable flow.

Although the solicitations of the bed are attenuated by the scour, a spillway with a very small height of the bucket lip always gives a (A, I) type distribution reflecting a non-secure distribution. In Addition, it induces an important erosion at the foot of the structure. A spillway with a medium bucket lip height presents a higher stability only when the flow turbulence is weak, condition not guaranteed during floods. However, a spillway with large values of the height of the bucket lip seems to present a better stability. The later, do not only favours a more stable flow (a (B, II) type distribution) in the vicinity of the spillway but also generates a deposit to protect the foundations of the spillway and increase its stability.

Keywords: Roller buckets, solicitations, hydrodynamic efforts, pressure, pressure fluctuation, scour.

INTRODUCTION

Les structures de dissipation d'énergie constituent un bon moyen pour minimiser les efforts extrêmes causés par la turbulence et restituer l'écoulement approprié au lit de la rivière (Rajan et Shivashankara Rao, 1980; Tung et Mays 1982; Lopardo et al., 1985). Toutefois, la dissipation d'énergie génère un large champ de macro-turbulence auquel sont associées de sévères fluctuations de vitesse, de niveau d'eau et des efforts de cisaillements susceptibles de générer de l'érosion qui peut parfois aller jusqu'à la destruction des ouvrages avoisinants (Lavallé et al., 2000; Armenio et al., 2001).

Certes, les dissipateurs de type auge construits en aval des barrages depuis les années 30 (barrage de Grande Coulee aux Etats Unis) ont rempli leur fonction mais, en même temps, ils ont créé dans certains cas des dommages environnementaux affectant le lit de la rivière et les ouvrages en place (Doddiah, 1967; Maestri et Marques, 1990). Souvent les dommages entraînent des frais très élevés de remise en opération des ouvrages. Ceci peut être expliqué par un mauvais dimensionnement du dissipateur ou par une prédiction imprécise des types d'efforts hydrodynamiques qui s'y présentent, ou par un manque de connaissance des processus de dissipation et d'érosion mis en jeu.

Les études réalisées sur des dissipateurs de type auge sont nombreuses. Mais jusqu'à l'heure actuelle, trois études seulement ont traité les efforts hydrodynamiques présents en aval. L'étude réalisée par Marques (1995) a porté sur l'unification des critères de dimensionnement de ces dissipateurs sur un radier en béton, celle de Arfaoui (2003) a mis en relief l'effet des caractéristiques du dissipateur sur les efforts hydrodynamiques sur un radier en béton également et celle de El Amri (2004) a porté sur les efforts hydrodynamiques sur un fond mobile.

L'écoulement sur un fond fixe en béton diffère de celui sur un fond mobile. En effet, sur ce dernier, le processus de dissipation d'énergie est associé au processus d'érosion de sorte que l'énergie que possède l'écoulement se dégrade au fur et à mesure que le lit s'érode pour se retrouver à la fin du processus d'érosion avec une énergie résiduelle minimale (Song et Yang, 1980; Yang et al., 1981). Pour le cas du dissipateur de type auge, El Amri et Verrette (2007) ont démontré dans leur étude que l'affouillement en aval de l'auge donnait lieu à des efforts amoindris sans toutefois expliquer les mécanismes qui sont à l'origine de ce changement et la façon avec laquelle le choix du dissipateur le plus performant serait optimisé en pratique. Les objectifs du présent article sont donc à la fois d'analyser les changements des efforts hydrodynamiques agissant sur un radier fixe et un radier mobile et de se prononcer sur le choix du dissipateur le plus performant.

MATÉRIELS ET MÉTHODE

Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental consiste en un modèle réduit construit au laboratoire d'hydraulique du département de génie civil de l'Université Laval à Québec. Le modèle est formé par un canal de 6,00 m de longueur par 0,60 m de largeur et 1,50 m de hauteur et par un évacuateur de crues en béton de type Creager de hauteur 0,72 m (figure 1). Un dissipateur d'énergie de type auge complète la partie aval de l'évacuateur et rejoint le radier du canal. Ce dernier est en béton et peut représenter un bassin de dissipation horizontal ou encore un bassin de dissipation érodé. Un volet situé à l'extrémité aval du canal permet de contrôler le niveau d'eau aval et d'assurer la submergence de l'auge, une condition primordiale pour garantir son bon fonctionnement.

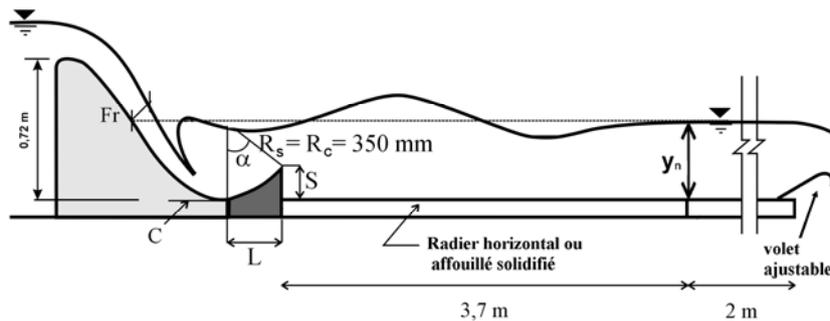


Figure 1 : Vue générale du dispositif expérimental

Des prises de pressions sont réparties le long de l'axe central du radier du canal de façon à couvrir l'ensemble du phénomène de dissipation à étudier (figure 1). Ces prises sont reliées, à l'aide de tubes en "tygon" de 0,9 m de longueur et d'un diamètre de 0,0064 m, à des capteurs de pression de type Ω PX418 installés à l'extérieur du canal et pouvant mesurer une pression variant entre -0,773 et 0,773 m d'eau avec une précision de $\pm 2,09$ mm d'eau. Deux piézomètres sont reliés respectivement à la première et à la dernière prise de pression dans le but de lire le niveau d'eau à l'entrée du canal et de contrôler le niveau d'eau aval. Les mesures de pression ont été recueillies à une fréquence de 50 Hz pendant une durée de 200 secondes à l'aide d'un système d'acquisition de données. Ce dernier est formé par des capteurs de pression, une unité d'acquisition, un voltmètre et un ordinateur IBM PC. La détermination des caractéristiques de fonctionnement dynamique du modèle réduit et du système d'acquisition de données a été faite en calibrant les capteurs de pression utilisés en état statique et dynamique.

Déroulement de l'expérience

L'expérience consiste en deux séries d'essais. Une première série a été effectuée sur un radier horizontal fixe situé en aval d'un dissipateur de type auge, et une deuxième a été réalisée sur un lit érodé solidifié. Ces derniers ont été obtenus avec des essais d'érosion menés avec du gravier ayant un d_{50} de 8,0 mm et un poids volumique de $24,8 \text{ KN/m}^3$ (El Amri et Verrette, 2002). Les essais ont été réalisés en aval de trois dissipateurs (S1, S5 et S7) dont les caractéristiques géométriques sont présentées au tableau 1. Le choix des dissipateurs S1 et S5 repose sur l'étude réalisée par Arfaoui (2003) qui a montré que l'angle de 20° représente l'angle optimal lorsqu'il s'agit d'un fond horizontal. Le dissipateur S7 a été choisi compte tenu de sa grande hauteur de sortie qui permet d'avoir un dépôt de matériaux au pied de ce dernier pour le consolider. Les conditions hydrauliques sous lesquelles les essais expérimentaux ont été réalisés sont présentées au tableau 2.

Tableau 1 : Caractéristiques géométriques des essais réalisés

Dissipateur	Caractéristiques géométriques				
	α °	C (mm)	L (mm)	R _S (mm)	S (mm)
S1	20	-64	300	350	23
S5	20	-96	350	350	9
S7	30	-96	450	350	110

Tableau 2. Conditions hydrauliques des essais réalisés

Q (l/s) Débit	y _n (mm) Profondeur	V (m/s) Vitesse	y (mm) Profondeur	F _r Nombre de Froude	R _e x10 ⁵ Nombre de Reynolds
63	247	3,17	33	5,5	1,01
87	301	3,11	47	4,6	1,49
163	426	2,98	91	3,2	2,72

Méthodologie de travail

La pression instantanée a été mesurée dix milles fois en chacune des prises de pression située en aval des dissipateurs. Étant donnée la nature aléatoire du processus de dissipation d'énergie, la pression moyenne \bar{P} et la fluctuation de pression σ définie comme étant l'écart-type de la distribution temporelle de la pression ont été calculées pour caractériser ce processus d'une façon quantitative. Ces deux paramètres statistiques sont définis comme suit :

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} P_i}{n} \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i - \bar{P})^2}{n}} \quad (2)$$

où P_i est la pression instantanée mesurée en hauteur du liquide et n le nombre d'observations.

Les mesures obtenues en aval de chacun des trois dissipateurs sous les trois conditions hydrauliques ont servi pour tracer les distributions des efforts hydrodynamiques (la pression moyenne $\bar{P} = f(X)$) et la fluctuation de

pression $\sigma = f(X)$ en fonction de la distance X à partir de la fin de l'auge. Ainsi, toutes les distributions des efforts obtenues ont été rassemblées sur un même graphique pour dégager la tendance particulière de ces efforts agissant sur chacun des types de radiers, horizontal et affouillé.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Distribution des efforts hydrodynamiques

L'analyse des résultats a montré que la distribution de pression peut suivre, selon les conditions hydrauliques de l'écoulement et les propriétés géométriques du dissipateur, l'une des deux allures : l'une de type A et l'autre de type B (figure 2). Ces distributions types sont indépendantes de la forme du radier et représentent les distributions limites à l'intérieur desquelles peut se trouver la pression moyenne (espace hachuré). La courbe de type A présente à l'immédiat du dissipateur des faibles valeurs de pression qui augmentent très rapidement sur une courte distance pour rejoindre la pression d'équilibre. Par contre, la distribution de type B présente des pressions relativement fortes à l'immédiat du dissipateur puis vers l'aval, diminuent légèrement pour passer par un faible minimum à partir duquel elles remontent rapidement vers la pression d'équilibre.

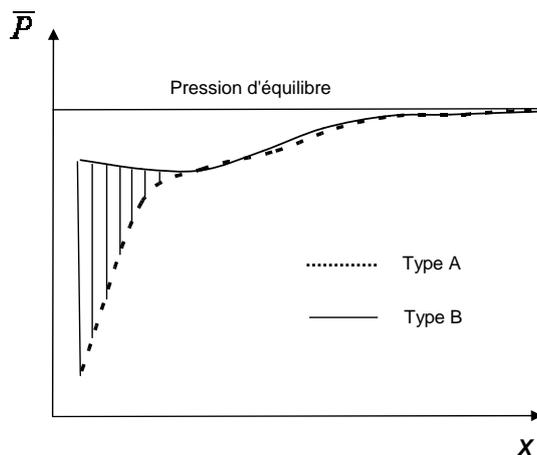


Figure 2 : Distributions type de la pression moyenne

De même, la distribution des fluctuations de pression suit deux courbes de type I et II quelle que soit la nature du radier (figure 3).

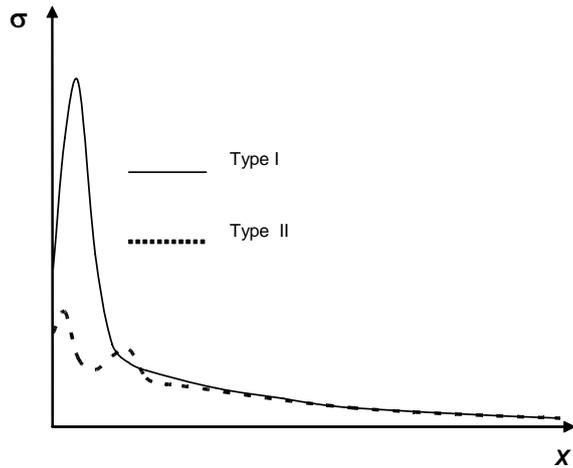


Figure 3 : Distributions type de la fluctuation de pression

La courbe type I présente de très fortes fluctuations de pression à la sortie du dissipateur. Ces dernières augmentent pour atteindre un fort maximum, ensuite elles diminuent rapidement pour tendre de façon asymptotique vers les fluctuations de pression d'équilibre. La courbe type II présente, par contre, de très faibles fluctuations de pression à la sortie du dissipateur; ces fluctuations présentent une légère augmentation pour atteindre un premier pic, diminuent pour remonter vers un deuxième pic plus faible à partir duquel elles tendent vers les fluctuations de pression d'équilibre. Il est à signaler que la distribution de la pression de type A est associée à une distribution de fluctuation de pression de type I et celle de type B est associée à une distribution de type II. Ainsi, les efforts de type (A, I) reflètent des conditions de fortes sollicitations du radier. Rappelons que le but de cet article est d'étudier les changements observés au niveau des efforts hydrodynamiques agissant sur un radier fixe et un radier meuble pour des conditions géométriques (du dissipateur) et hydrauliques demeurant constantes. L'analyse approfondie de l'ensemble des résultats montre que le passage d'un radier horizontal à un radier affouillé n'engendre pas le même type de distribution des efforts. En effet, le tableau 3 montre que pour les distributions de type (B, II), aucun changement n'a été observé pour la distribution des efforts hydrodynamiques en aval du dissipateur. Par contre, pour les distributions de type (A, I), trois cas ont été transformés en type (B, II), et un seul cas a demeuré inchangé.

Tableau 3 : Types de distribution des efforts hydrodynamiques en fonction du radier

Dissipateur	Froude F_r	Radier horizontal		Radier affouillé	
		Essai	(P, σ)	Essai	(P, σ)
S1	7,2	1	(B,II)	8	(B,II)
	6,3	2	(A,I)	9	(B,II)
	4,9	3	(A,I)	10	(B,II)
S5	7,2	4	(A,I)	11	(B,II)
	4,9	5	(A,I)	12	(A,I)
S7	6,3	6	(B,II)	13	(B,II)
	4,9	7	(B,II)	14	(B,II)

Cas de fortes sollicitations

Sur un lit horizontal fixe en béton, la distribution de type A, (qui correspond à des fortes sollicitations dans la zone proche du dissipateur), est observée dans les conditions suivantes : a) une hauteur de sortie très faible, pour n'importe quel débit (essais 4 et 5) et b) une hauteur de sortie moyenne en présence d'un débit moyen ou fort (essais 2 et 3). Dans ces conditions (essais 2, 3, 4 et 5, sur fond horizontal en béton), les essais ont montré que la lame d'eau à la sortie du dissipateur est importante et le jet d'eau ne peut s'élever. Ce dernier est donc rapidement rabattu sur le fond du radier avec la formation d'un très petit rouleau de fond intermittent et très instable, localisé immédiatement à la fin du dissipateur. L'intermittence de ce rouleau de fond donne lieu à des fluctuations de pression très élevées. De plus, l'effet de la succion provoquée par le jet d'eau en quittant la structure avec des vitesses d'approches très élevées se fait sentir fortement sur le radier et donne une pression très faible (dépression), ce qui donne lieu à une distribution des efforts de type (A, I). Ces conditions de fortes sollicitations peuvent conduire à des efforts de cavitation, de fatigue, de résonance qui affectent considérablement la stabilité du dissipateur.

Pour un lit horizontal meuble, la succion au pied du dissipateur entraîne une forte érosion de ce dernier et le jet venant frapper le radier creuse une fosse principale d'érosion dans la zone d'impact du jet sur le radier. Le processus d'érosion se poursuit jusqu'à ce que l'équilibre hydro-sédimentologique est atteint. L'érosion provoquée au pied du dissipateur entraîne une hauteur de sortie effective plus grande. Ainsi, l'effet de la succion se trouve diminué sur le radier, ce qui entraîne une augmentation de la pression et une atténuation considérable de la fluctuation de pression. De ce fait, l'affouillement engendre une atténuation des efforts qui sollicitent le radier, et en conséquence :

- Si la hauteur de sortie est très faible, pour n'importe quelles conditions hydrauliques, les efforts affaiblis par l'affouillement conservent une distribution de type (A, I), tel est le cas de l'essai 12. Dans ces conditions, on peut conclure que l'affouillement ne peut pas causer une atténuation des efforts hydrodynamiques susceptible d'amener ces derniers à une distribution sécuritaire. Par conséquent, ce type de dissipateur (S très faible) est à éviter en pratique puisque non seulement il présente des distributions non sécuritaires, mais il occasionne en plus un déchaussement de la structure pouvant mettre sa stabilité en danger.
- Si la hauteur de sortie est moyenne avec des conditions hydrauliques de forte turbulence, les efforts amoindris par l'affouillement sont faibles et l'augmentation de la pression modifie la distribution de la pression qui passe d'une distribution de type (A, I) au type (B, II), tel le cas des essais 9 et 10. Il s'agit en fait d'un déplacement le long de la zone hachurée de la figure 2. Bien que la distribution de type (B, II) soit sécuritaire, ce type de dissipateur n'est pas recommandé étant donné qu'il faut assurer des conditions hydrauliques de faible turbulence, condition non garantie pendant les crues.

Cas de faibles sollicitations

Sur un radier horizontal, la distribution de type B, montrant un radier faiblement sollicité, est obtenue lorsque : a) la hauteur de sortie est moyenne et le débit est faible (essai 1) et b) la hauteur de sortie est grande pour n'importe quel débit (essais 6 et 7). Dans ces conditions expérimentales, la lame d'eau à la sortie du dissipateur est faible. Ainsi, le jet d'eau est libre de se diriger jusqu'à la surface et provoquer un immense rouleau de fond. Ce rouleau est stable et il est responsable en grande partie de la dissipation de l'énergie. La succion près du dissipateur est faible et la pression se trouve proche de la pression d'équilibre et les fluctuations de pression ne sont pas très intenses.

Pour un lit horizontal meuble, le rouleau de fond, situé à l'immédiat de l'auge, agit de sorte qu'il ramène une partie des matériaux de la fosse principale d'érosion vers le pied de la structure. Ces matériaux forment un dépôt dont l'ampleur dépend automatiquement de la hauteur de sortie du dissipateur et des conditions hydrauliques de l'écoulement. Au fur et à mesure que l'érosion progresse, le volume du rouleau augmente et la dissipation d'énergie augmente également pour donner une pression qui se rapproche davantage de la pression d'équilibre avec des sollicitations du lit qui sont affaiblies. Ainsi :

- Si la hauteur de sortie est moyenne et le débit est faible, les efforts affaiblis par l'affouillement conservent une distribution de type (B, II), tel est le cas de l'essai 8. Bien qu'il s'agisse d'une distribution sécuritaire, ce type de dissipateur (S moyenne) n'est pas recommandé puisqu'il exige des conditions hydrauliques de faible turbulence tel que mentionné au paragraphe précédent et

dans le cas contraire, on se retrouve avec une distribution des efforts de type (A, I).

- Si la hauteur de sortie est grande, même en présence d'un écoulement turbulent, les efforts sont faibles et les distributions initiales de type (B, II) sont conservées, tel le cas des essais 13 et 14. Ainsi, le dissipateur possédant une grande hauteur de sortie est favorisé puisque non seulement il engendre un écoulement plus stable dans la zone proche du dissipateur mais aussi la formation d'un dépôt au pied du dissipateur contribue à le consolider, à protéger ses fondations et à augmenter sa stabilité. De plus, quel que soit l'état du lit fixe ou affouillé et quelle que soit l'ampleur de déformation que présente le lit affouillé, la pression moyenne à proximité du dissipateur se rapproche de la pression d'équilibre reflétant la stabilité de l'écoulement.

CONCLUSION

L'affouillement en aval d'un dissipateur de type auge engendre de fortes modifications au niveau des efforts hydrodynamiques agissant sur le radier en aval et affecte le choix du type de dissipateur. Ces efforts présentés soit par le type (A, I) ou le type (B, II), pour certaines conditions hydrauliques de l'écoulement et géométriques du dissipateur, conservent les mêmes distributions types. Toutefois, pour d'autres circonstances, ces efforts provoquent l'affouillement du radier qui donne lieu à une distribution des efforts qui passe du type (A, I) au type (B, II), c'est-à-dire du passage d'une forme de forte sollicitation à une forme d'un écoulement plus stable. Cette transformation reflète une diminution des charges qui sollicitent le lit et une augmentation de la stabilité de l'écoulement.

L'analyse de l'ensemble des résultats nous a permis de conclure que l'utilisation d'un dissipateur de faible hauteur de sortie n'est pas conseillée puisque ce dissipateur, bien qu'il opère sous des conditions de charges affaiblies par l'affouillement, présente toujours une distribution non sécuritaire des efforts. De plus, il occasionne un déchaussement de la structure pouvant affecter ses fondations et menacer sa stabilité. Un dissipateur ayant une hauteur de sortie moyenne assure un bon fonctionnement dans des conditions hydrauliques de faible turbulence, condition non garantie pendant les crues. Cependant, un dissipateur ayant une grande hauteur de sortie s'avère plus performant. Ce dernier, non seulement favorise un écoulement plus stable dans la zone proche du dissipateur, mais génère également un dépôt de matériaux à côté du dissipateur contribuant à le consolider, protéger ses fondations et augmenter sa stabilité.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARFAOUI M. (2003). Étude des caractéristiques des dissipateurs type auge. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada.
- ARMENIO V., TOSCANO P., FIOROTTO, V. (2001). On the effect of a negative step in pressure fluctuations at the bottom of a hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Research*, 38(5) : 359-368.
- DODDIAH D. (1967). Scour below submerged solid bucket-type energy dissipators. *Comptes-rendus du XII^e Congrès de l'Association Internationale de Recherches Hydrauliques*, Fort Collins, India, pp. 105-116.
- EL AMRI A., VERRETTE, J.L. (2002). Étude quantitative de l'érosion en aval des dissipateurs d'énergie type auge, *Can. J. Civil Eng.* 29 : 1-10.
- EL AMRI A. (2004). Étude des dissipateurs d'énergie de type auge sur fond mobile. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada.
- EL AMRI, A., VERRETTE J.L. (2007). Variation des efforts hydrodynamiques sur radiers horizontal et affouillé en aval d'un dissipateur d'énergie de type auge. *Can. J. Civil Eng.*, 34 : 1-5.
- LAVALLEE D., MARCHE C., QUACH T. (2000). De nouvelles approches pour quantifier le risque de rupture d'une retenue d'eau. *Can. J. Civil Eng.*, 27: 1217-1229.
- LOPARDO R.A., VERNET G.F., CHIVIDINI M.F. (1985). Modelling the Behaviour of High Head Hydraulic Jump Energy Dissipators Under Flood Conditions. 2nd International conference on the hydraulic of floods and flood control, BHRA, Fluid Engineering Center, paper G1, 313-323.
- MAESTRI R.D., MARQUES M.G. (1990). Escolha da geometria do dissipador de energia da UHE Dona Francisca. I. Montevideo : Association Internacional de Investigaciones Hidraulicas, 3(1) : 291-301.
- MARQUES M.G. (1995). Nouvelle approche pour le dimensionnement des dissipateurs à auge. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada.
- RAJAN B.H., SHIVASHANKARA RAO K.N. (1980). Design for Solid Roller Buckets. *Journal of Central Board of Irrigation and Power*, 37 (4) : 435-444.
- SONG C.C.S., YANG C.T. (1980). Minimum stream power theory. *ASCE, Hydraulic Division*, 106 (HY9): 1477-1487.
- TUNG Y.K., MAYS L.W. (1982). Optimal design of stilling basins for overflow spillways. *ASCE, Journal of Hydraulic Division, proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 108 (HY10): 1163-1178.
- YANG C.T., SONG C.C.S., WOLDENBERG M.J. (1981). Hydraulic geometry and minimum rate of energy dissipation. *Water Resources Research*, 17 (4): 1014-1018.