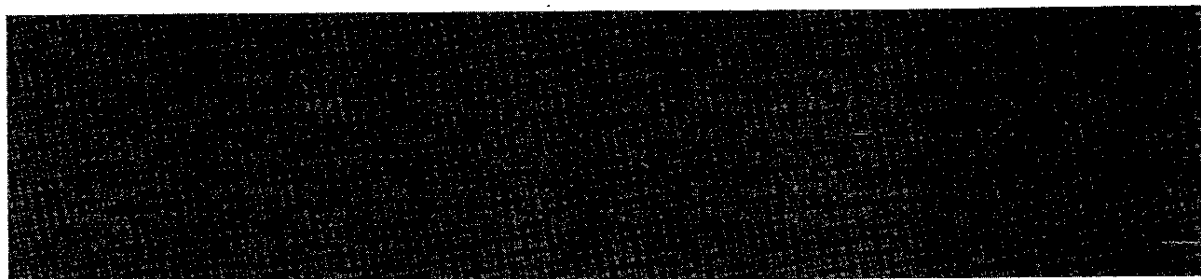


Caractéristiques Diphasiques des Écoulements sur les Coursiers en Marches d'Escalier

Two-Phase Flow Properties of Stepped Spillway Flows

par Hubert Chanson

Professeur en Mécanique des Fluides, Hydraulique et Sciences de l'Environnement
Department of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane QLD 4072, Australie



I ■ INTRODUCTION

Le concept des chutes et cascades en marches d'escalier est vieux de plus de trois mille cinq cent ans. L'un des premiers ouvrages fut un barrage construit en Grèce occidentale, autour de mille trois cent ans avant notre ère (Knauss 1995, Chanson 1997a, 2000). Jusqu'au dix-huitième siècle, cette technique fut appliquée aussi bien aux coursiers d'évacuateurs de crues qu'aux grandes cascades (Chanson 1998). Les évacuateurs de crues en marches d'escalier ont connu un essor considérable durant le dix-neuvième siècle. A la fin du 19^e siècle, près d'un tiers des barrages, construits en Amérique du Nord, étaient équipés d'un coursier en marches d'escalier (source documentaire : Schuyler 1909, Wegmann 1911). Les ingénieurs français connaissaient cette technique, et plusieurs ouvrages sont encore en usage de nos jours, démontrant le bien-fondé de leur conception (*tableau 1, fig. 1*). Cependant, la technique des coursiers en marches d'escalier devint obsolète, durant la première moitié du vingtième siècle, avec le développement des bassins de dissipation d'énergie par ressaut hydraulique, en particulier suite aux travaux de Boris Bakhmeteff (Bakhmeteff 1932, Bakhmeteff and Matzke 1936).

Le regain d'intérêt pour les coursiers et cascades en marches d'escalier est lié à l'introduction de nouveaux matériaux de construction, par exemple le béton compacté au rouleau BCR (*fig. 1*), de nouvelles techniques de déversement, par exemple avec la protection du parement aval d'un barrage en remblai (*fig. 2*), et de nouvelles applications, par exemple les cascades de réoxygénation artificielle (ex. Gosse et Grégoire 1997).

● L1 Bibliographie

Depuis 1978, la littérature anglo-saxonne, sur les évacuateurs de crues en marches d'escalier (« stepped spillways »), a été très abondante : un livre, une monographie, des comptes-rendus de conférences spécialisées, une vingtaine d'articles dans des journaux scientifiques, et plusieurs dizaines d'articles présentés à des conférences. Par exemple, Essery et Horner (1978), Chanson (1995a, 2000). Durant la même période, le nombre de publications en français a été très faible, mais on note trois publications importantes : l'article pertinent de Goubet (1992), l'étude BaCaRa (BaCaRa 1991, 1997) et les travaux de Peyras et al. (1991).

Toutefois, il faut noter que les récents progrès scientifiques furent marqués, durant la période 1970-1992, par une ignorance quasi-complète des caractéristiques diphasiques des écoulements sur les coursiers à marches d'escalier. Il fallut attendre les premières mesures de Ruff and Frizell (1994) et l'analyse de Chanson (1993) pour apprécier l'importance de l'entraînement d'air sur la conception hydrauliques des cascades en marches d'escalier. Hors, l'entraînement d'air dans des écoulements supercritiques (c.a.d. « l'eau blanche ») est un paramètre essentiel, caractérisant l'augmentation du volume de l'écoulement, et donc le dimensionnement des parois latérales (bajoyers) (Wood 1991, Chanson 1995a). De plus, la présence d'air dans les écoulements à grandes vitesses permet de réduire ou d'empêcher l'érosion par cavitation. Mais aussi, pour les coursiers lisses, le calcul du coefficient de perte de charge, pour les écoulements aérés, diffère des méthodes classiques (ex. Colebrook-White), et il est une fonction de la quantité d'air entraînée. Enfin, la surface interfaciale cumulée

Tableau 1 — Exemples de cascades et coursiers en marches d'escalier construits en France.

Nom, Location	Année	Pente	Charge	Capacité	Hauteur de marche	Nb de marche	Type de marches	Remarques
		α	H	Q_w	h			
		(deg.)	(m)	(m ³ /s)	(m)			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Barrage de St Ferréol	1671	--	32	--	--	--	Chutes, cascades	Barrage en remblai avec un déversoir en maçonnerie suivi de cascades. Alimentation en eau du Canal du Midi.
Barrage du Tillot, Bourgogne	1834	17,7	9,2	19	0,6 à 1,2	8	2 séries de 4 marches chacune, avec convergence du coursier	Barrage poids en pierres de maçonnerie, renforcé par 4 contreforts. Déversoir à seuil épais. W = 5,5 à 2,2 m. Pas de bassin de dissipation. Alimentation en eau du Canal de Bourgogne.
Barrage du Ternay, Annonay	1867	--	41		0,3 à 0,8	30	Marches taillées dans le rocher	Barrage poids en pierres de maçonnerie. Renforcé par en remblai aval dans les années 1990. Elargissement du déversoir à la même période.
Barrage de Quinson, vallée de la Durance	1868	83 & 51	20	1200	0,43	10	Marches en pierre de maçonnerie	Barrage poids en pierres de maçonnerie. Déversoir à seuil épais (4,6 m). W = 40 m. Construction d'un nouveau barrage en 1971-74.
Barrage du Pas-du-Riot, Planfroy	1873	--	36	65	2,5 à 3	7	Marches en pierre de maçonnerie	Barrage poids en pierres de maçonnerie. Déversoir latéral. Coursier à section trapézoïdale (largeur à la base : ~ 3 m). Elargissement du déversoir dans les années 1990.
Barrage du Pont, Bourgogne	1882	13	27	195	2,8 à 6,97	--	Marches (en enrochement) avec remblai en maçonnerie, avec convergence du coursier	Barrage poids en pierres de maçonnerie renforcé par 7 contreforts. Conçu par H. Bazin. Déversoir à crête arrondie. W = 29,5 à 10 m. Alimentation en eau du Canal de Bourgogne.
Barrage de La Tâche (ou Barrage du Chartrain), Roanne	1891	32,6	51	--	2,4 à 5,4 m	10	Marches taillées dans le rocher	Barrage poids en pierres de maçonnerie. Déversoir latéral. W = 2,2 m. Elargissement du déversoir en 1994.
Barrage de L'Echapre, St-Etienne	1897	24,3	42	--	3,2 à 4,1	9	Marches taillées dans le rocher (gneiss)	Barrage poids en pierres de maçonnerie. Déversoir latéral. W = 3 m. Elargissement du déversoir en 1989.
Barrage des Olivettes	1987	53,1	36	264	0,6	47	Marches horizontales	Barrage en BCR. W = 40 m.
Barrage du Riou, vallée du Büech	1990	59	22	110	0,43	42	Marches horizontales en béton conventionnel	Barrage en BCR. Déversoir à seuil épais. W = 96 m.
Barrage de Petit-Saut, Guyane 1994	1994	51,3	37	4 m ³ /s	0,6		Marches horizontales	Barrage en BCR.
Cascade d'aération en aval du barrage de Petit-Saut, Guyane, 1995	1995		5	440	2	2	Marches avec remblai	Crête en labyrinthe. Construction en palplanche et fondation en béton.
Canalisation d'eaux d'orage, Villeneuve-Lès-Avignons, France 1999	1999	45	5		0,7 à 1	7	Marches avec remblai (d _p = 0,4 m)	Pour un pont de chemin de fer.

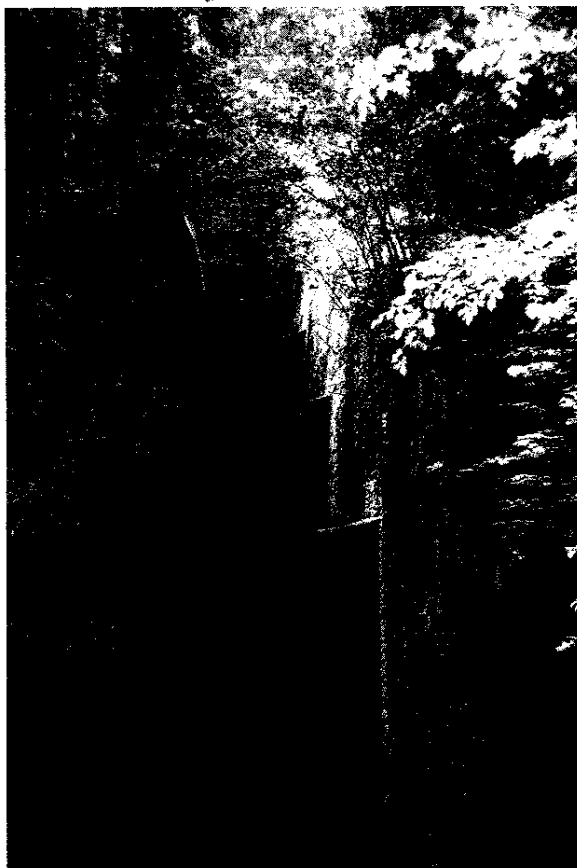


Figure 1 : Exemples de coursiers en marches d'escalier
(A) Le barrage du Pas du Riot en juin 1998
 Construit en 1873 ($H = 36$ m), capacité : $65 \text{ m}^3/\text{s}$,
 7 marches ($h \sim 2,5$ à 3 m), section trapézoïdale (largeur à
 la base ~ 3 m).



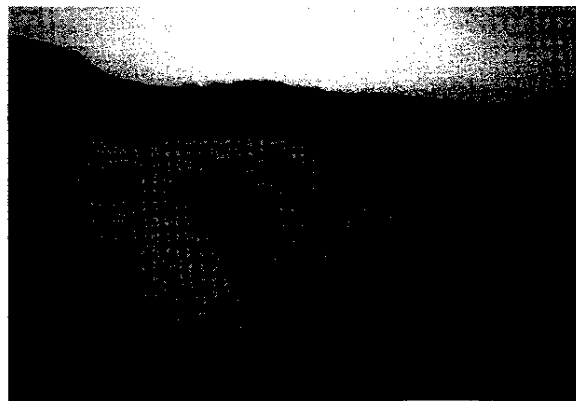
(B) Le barrage du Pont en juin 1998
 Conçu par l'ingénieur H. Bazin, inauguré en 1882
 ($H = 27$ m) - Déversoir à crête arrondie, capacité :
 $195 \text{ m}^3/\text{s}$ (crue maximale : $139 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1910), $h = 2,8$ à
 $6,97$ m, pente moyenne : 13° , largeur : $29,5$ à 10 m.

de toutes les bulles d'air accroît considérablement le transfert de gaz dissous.

Ce document présente une étude détaillée des caractéristiques diphasiques d'écoulements sur un coursier en marches d'escalier. De nouvelles mesures expérimentales ont été obtenues sur un modèle physique de grande taille (échelle $1/3$ à $1/6$ typiquement), permettant d'éliminer les effets d'échelles. On propose une paramétrisation de l'écoulement eau-air, permettant une meilleure conception hydraulique des coursiers en marches d'escalier.

II ■ ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

On a conduit de nouvelles mesures sur un modèle physique à l'Université du Queensland, Australie. Le canal a $2,7$ -m de long, et 1 -m de largeur (fig. 3). Le coursier est construit en contreplaqué marine peint, et les parois latérales sont en plexiglas. Il est alimenté en eau par une pompe contrôlée électroniquement par un inverseur de fréquence, avec un débit maximum de 500 l/s . Le bassin d'alimentation (surface au sol : $6,8 \text{ m} \times 4,8 \text{ m}$) est équipé d'un convergent symétrique (rapport $4,8/1$), alimentant un déversoir à seuil épais (1 -m de large, $0,6$ -m de long, arête amont circulaire avec rayon de $0,057 \text{ m}$), suivi de neuf marches ($h = 0,1 \text{ m}$, $l = 2,5 \text{ m}$). Le débit est mesuré indirectement à partir de la mesure de la charge amont.



(C) Le barrage du Riou en novembre 1994
 Construit en 1990 ($H = 22$ m), capacité : $1,5 \text{ m}^2/\text{s}$,
 largeur : 96 m, $h = 0,43$ m, construction en BCR.

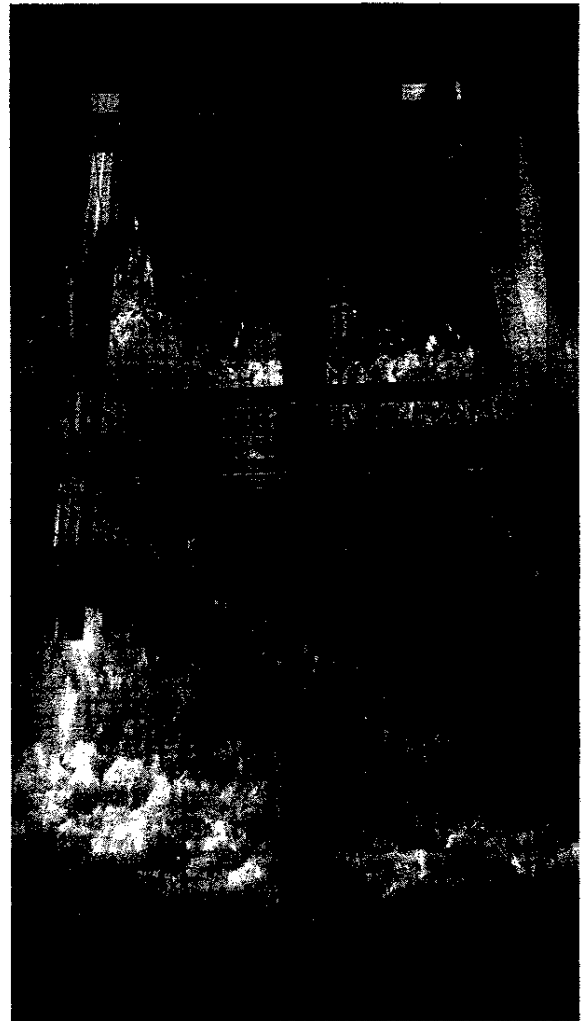
On note que la pente moyenne du coursier, $\alpha = 22^\circ$, est proche de celle d'un évacuateur de crues, déversant sur le parement aval d'un barrage en remblai (fig. 2).

● II.1 Modélisation physique et effets d'échelle

Cette étude sur modèle réduit utilise une similitude de Froude, caractéristique des écoulements à surface libre (ex.



Figure 2 : Barrage de Melton, Victoria, Australie en Janvier 2000
Barrage en remblai (1916, rehaussé en 1941 et en 1967)
($H = 35$ m) - Evacuateur de crue secondaire par déversement sur le parement aval, protection avec du béton conventionnel, capacité : $2,800 \text{ m}^3/\text{s}$ (coursier secondaire), $W = 181$ m (en crête), $h = 0,6$ m, $\alpha = 26,5^\circ$.



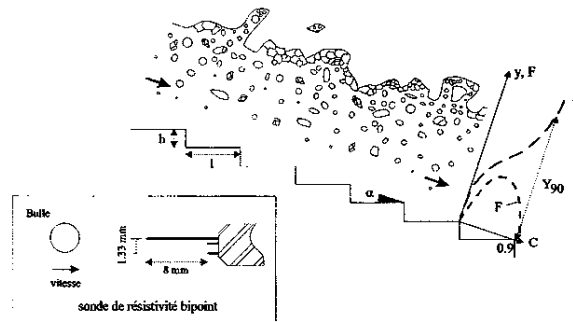
(C) Vue depuis l'aval - Notons l'aération rapide de l'écoulement, et la forte teneur en aval de l'écoulement aval.



Figure 3 : Ecoulement extrêmement turbulent à l'Université du Queensland
 $Q_w = 0,103 \text{ m}^3/\text{s}$, $W = 1$ m, $h = 0,1$ m, $l = 0,25$ m -
Apparition de l'eau blanche sur la 4^e marche
(A) Vue latérale.



(B) Vue depuis l'amont - Notons la déformation de la surface libre en amont du point d'inception de l'aération, la pulvérisation de la couche supérieure de l'écoulement eau-air, et la sonde de mesure dans le fond.



(D) Sketch général d'un écoulement diphasique sur un coursier en marche d'escalier (sonde de résistivité bipoint en dessous).

Henderson 1966, Chanson 1999). Pour les écoulements aérés, il est reconnu que l'entraînement d'air ne peut pas être simulé correctement, avec une similitude de Froude, pour des échelles inférieures à 1/10, voir 1/15 (Wood 1991, Chanson 1997b). Dans le cas particulier des coursiers en marches d'escalier, les études BaCaRa (1991) et Chanson et al. (2000) ont, de plus, montré que les forces de frottement ne peuvent être reproduites correctement pour des échelles inférieures à 1/20 et des hauteurs de marches inférieures à 20 mm.

Le modèle physique a été construit avec une hauteur de marche de 0,1 m. Considérant que les hauteurs de marche sont typiquement de l'ordre de 0,3 à 0,6 m sur les prototypes, l'échelle du modèle est comprise entre 1/3 et 1/6, et, pour de telles valeurs, les effets d'échelle sont négligeables.

● II.2 Métrologie

Dans les écoulements non aérés, les mesures de vitesses et la position de la surface libre ont été effectuées avec un tube de Prandtl-Pitot ($\varnothing = 3,3$ mm) et une pointe fine respectivement. Les caractéristiques diphasiques de l'écoulement ont été mesurées avec deux types de sondes de résistivité : (A) une sonde monopoint ($\varnothing = 0,35$ mm) permettant d'obtenir le taux de vide C et la fréquence de bulles d'air F (¹), et (B) une sonde bipoint ($\varnothing = 0,025$ mm, distance entre pointes : 8 mm, fig. 3(D)) fournissant de plus la vitesse interfaciale V , les distributions de tailles de cordes des bulles d'air et des gouttelettes d'eau, et l'aire interfaciale volumique locale a (²). Les sondes sont excitées par un système électronique, avec un temps de réponse inférieure à 10 μ s, et les signaux ont été enregistrés avec une fréquence de 5-kHz pendant 180-s (sonde monopoint) ou une fréquence de 20-kHz pendant 20-s (par capteur, sonde bi-point). Les signaux des ondes ont été traités avec une méthode semblable au travail de Cummings and Chanson (1997). Le taux de vide a été calculé avec un seuil de détection moitié entre les voltages eau et air (³). Les vitesses interfaciales ont été déduites par corrélation croisée (ex. Crowe et al. 1998).

Les sondes de mesures sont montées sur un assemblage permettant une translation fine, mesurée à l'aide d'une échelle électromagnétique Mitutoyo™ (Ref. No. 572-503). La précision sur la position des capteurs est inférieure à 0,25 mm dans la direction perpendiculaire au coursier, et de l'ordre de 2-mm dans les directions transversale et longitudinale.

Enfin, les écoulements ont été visualisés avec une caméra vidéo digitale Sony™ DV-CCD DCR-TRV900 (vitesse : 25 images/s, ouverture : 1/4 à 1/10 000 s) et des photographies à grandes vitesses (1/2 000 s).

Avec la sonde bipoint, on estime les erreurs de mesures à : $\Delta C/C = 2\%$ pour des taux de vides $5 < C < 95\%$; $\Delta V/V = 5\%$ pour $5\% < C < 95\%$; seuil de détection des tailles de bulles : 0,1 mm.

¹ Définie comme le nombre de bulles d'air impactant la sonde par seconde. La précision de cette mesure est liée à la taille de la sonde de mesure.

² définie comme l'aire interfaciale eau-air par unité de volume eau-air (« specific interface area ») (unité : $m^2/m^3 = m^{-1}$).

³ Cummings (1996) a démontré que cette technique induit une erreur faible, et peut être appliquée à des écoulements avec forts taux de vide.

● II.3 Régimes d'écoulements

Le canal d'expérimentation a été aménagé pour étudier les écoulements, avec des débits compris entre 0,020 et 0,350 m^3/s . Pour des débits inférieurs à 38 l/s, l'écoulement se présente sous la forme de successions de nappes et jets plongeants (écoulement en nappe, ou « nappe flow »). Pour des débits supérieurs à 95 l/s, l'écoulement est extrêmement turbulent (« skimming flow »), « glissant » sur le coursier imaginaire formé par les arêtes des marches, et maintenant constamment une recirculation tourbillonnaire dans les cavités triangulaires. Pour des débits intermédiaires (c.a.d. $0,038 < Q_w < 0,095$ m^3/s), on observe un écoulement transitoire (« transition flow »), un concept introduit par les chercheurs japonais Ohtsu et Yasuda (1997). L'écoulement transitoire ne présente ni les successions de nappes des écoulements en nappe, ni la structure « ordonnée » des écoulements extrêmement turbulents. Il est caractérisé par des éjections violentes de gouttelettes d'eau, de forts taux de vide (voir plus loin) et des variations longitudinales importantes des caractéristiques de l'écoulement, d'une marche à la suivante.

Ces observations, de changement de régime d'écoulement, sont proches des valeurs mises en avant par Rajaratnam (1990), Peyras et al. (1991), et Chanson (1995a). Toutefois, elles mettent en valeur l'existence d'un régime transitoire pour une plage importante de débits : c.a.d. $0,5 < d_c/h < 1$, où d_c est la profondeur d'eau critique et h la hauteur de marche.

● II.4 Programme de mesures

On a conduit deux séries de campagnes de mesures diphasiques, dans les écoulements extrêmement rugueux, et dans les écoulements transitoires (tableau 2). Les principaux résultats expérimentaux sont résumés dans les tableaux 3 et 4, pour les sondes monopoint et bipoint respectivement. Les variables principales sont la hauteur d'eau caractéristique Y_{90} , pour laquelle le taux de vide est égale à 90 %, y étant mesuré perpendiculairement à la ligne imaginaire reliant les arêtes des marches, le taux de vide moyen C_{mean} , la fréquence maximale de bulles F_{max} (dans un profil de mesures), la vitesse moyenne U_w , la vitesse caractéristique V_{90} mesurée pour $y = Y_{90}$, et l'aire interfaciale spécifique a_{mean} :

$$C_{mean} = \frac{1}{Y_{90}} \int_{y=0}^{y=Y_{90}} C dy \quad (1)$$

$$U_w = \frac{Q_w}{W} \left(\int_{y=0}^{y=Y_{90}} (1-C) dy \right)^{-1} \quad (2)$$

$$a_{mean} = \frac{1}{Y_{90}} \int_{y=0}^{y=Y_{90}} \frac{4F}{V} dy \quad (3)$$

et W est la largeur de la chute, d_c est la profondeur d'eau critique et V_c est la vitesse critique.

Pour chaque débit, l'écoulement amont est initialement peu turbulent et non aéré (« clear-water flow »). Cependant, on observe le développement simultané d'une couche limite turbulente au long du radier, et d'instabilités de la surface libre, jusqu'à un certain point, caractérisé par l'apparition soudaine de l'eau blanche (« inception point of free-surface aeration ») (fig. 3B). En aval de ce point, de larges quantités d'air sont entraînées dans l'écoulement supercritique, et un

écoulement diphasique quasi-homogène se développe rapidement. Pour chaque débit, la position du point d'apparition de l'eau blanche est indiquée en colonne 4, *tableau 2*. Les propriétés diphasiques des écoulements, en aval du point d'apparition de l'eau blanche, sont reportées dans les *tableaux 3 et 4*. La majorité des mesures furent conduites à l'arête des marches (« step edge ») (colonne 2, *tableaux 3 et 4*), mais certaines furent aussi faites au point milieu entre deux arêtes (colonne 2, *tableau 4*).

III ■ CARACTÉRISTIQUES DIPHASIQUES (1) ÉCOULEMENTS EXTRÊMEMENT TURBULENTS

Des mesures expérimentales sont présentées en *figure 4*. Les résultats montrent une augmentation rapide de la quantité

d'air entraînée, dans la direction avale, associée avec un accroissement important de la fréquence de bulles. Cette tendance, observée pour tous les débits, indique un entraînement initial de larges poches d'air, qui sont rapidement distordues et cassées par les contraintes de cisaillement turbulent, formant des entités (liquides et gazeuses) de tailles plus petites, millimétriques typiquement.

Dans les écoulements extrêmement turbulents, les profils de taux de vide, aux arêtes des marches, ont une forme proche d'une solution analytique de l'équation de convection-advection des bulles d'air :

$$C = 1 - \tanh^2\left(K' - \frac{y}{2D'Y_{90}}\right) \quad (4)$$

Tableau 2 — Conditions expérimentales.

Mesures	Débit Q_w , m ³ /s	Position d'apparition de l'eau blanche	Type d'écoulement	Remarques
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Série 1	0,182	Marche 6	Extrêmement turbulent	Sonde monopoint
	0,164	Marche 6	Extrêmement turbulent	
	0,147	Marche 5	Extrêmement turbulent	
	0,130	Marche 5	Extrêmement turbulent	
	0,124	Marche 5	Extrêmement turbulent	
	0,114	Marche 5	Extrêmement turbulent	
	0,103	Marche 4	Extrêmement turbulent	
	0,099	Marche 4	Transitoire	
	0,085	Marche 4	Transitoire	
	0,080	Marche 4	Transitoire	
	0,071	Marche 3	Transitoire	
	0,066	Marche 3	Transitoire	
	0,064	Marche 3	Transitoire	
	0,058	Marche 3	Transitoire	
	0,052	Marche 3	Transitoire	
0,046	Marche 3	Transitoire		
Série 2	0,182	Marche 6	Extrêmement turbulent	Sonde bipoint
	0,114	Marche 5	Extrêmement turbulent	
	0,058	Marche 3	Transitoire	

Tableau 3 — Résultats expérimentaux : sonde monopoint (série 1).

Débit Q_w m ³ /s	Location	$\frac{Y_{90}}{d_c}$	C_{mean}	$\frac{F_{max} d_c}{V_c}$	$\frac{U_w}{V_c}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Series 1					
0,1819	Marche 6 (arête)	0,44	0,15	4,30	2,64
0,1819	Marche 7 (arête)	0,52	0,24	7,59	2,55
0,1819	Marche 8 (arête)	0,51	0,28	13,38	2,71
0,164	Marche 6 (arête)	0,45	0,16	5,24	2,64
0,164	Marche 7 (arête)	0,55	0,31	9,79	2,62
0,164	Marche 8 (arête)	0,53	0,29	15,45	2,66
0,1467	Marche 5 (arête)	0,44	0,13	3,50	2,60
0,1467	Marche 6 (arête)	0,49	0,24	8,68	2,69
0,1467	Marche 7 (arête)	0,59	0,36	12,96	2,63
0,1467	Marche 8 (arête)	0,59	0,34	16,98	2,56
0,1301	Marche 5 (arête)	0,44	0,15	3,52	2,68
0,1301	Marche 6 (arête)	0,52	0,27	9,48	2,64
0,1301	Marche 7 (arête)	0,65	0,42	15,37	2,65
0,1301	Marche 8 (arête)	0,60	0,35	18,39	2,56
0,1237	Marche 5 (arête)	0,46	0,19	5,30	2,71
0,1237	Marche 6 (arête)	0,54	0,32	13,21	2,74
0,1237	Marche 7 (arête)	0,69	0,41	15,91	2,48
0,1237	Marche 8 (arête)	0,61	0,36	18,57	2,58
0,1142	Marche 5 (arête)	0,46	0,22	5,16	2,76
0,1142	Marche 6 (arête)	0,56	0,36	13,07	2,79
0,1142	Marche 7 (arête)	0,76	0,43	16,37	2,31
0,1142	Marche 8 (arête)	0,63	0,36	19,43	2,47
0,103	Marche 4 (arête)	0,44	0,14	2,85	2,67
0,103	Marche 5 (arête)	0,54	0,28	7,34	2,56
0,103	Marche 6 (arête)	0,68	0,46	14,33	2,70
0,103	Marche 7 (arête)	0,76	0,48	15,29	2,51
0,103	Marche 8 (arête)	0,57	0,34	18,63	2,65
0,099	Marche 4 (arête)	0,43	0,13	2,87	2,64
0,099	Marche 5 (arête)	0,56	0,33	8,52	2,66
0,099	Marche 6 (arête)	0,75	0,52	13,77	2,77
0,099	Marche 7 (arête)	0,63	0,35	16,97	2,46
0,099	Marche 8 (arête)	0,62	0,43	18,69	2,80
0,0845	Marche 4 (arête)	0,49	0,22	4,05	2,63
0,0845	Marche 5 (arête)	0,76	0,53	10,04	2,81
0,0845	Marche 6 (arête)	0,64	0,44	14,49	2,79
0,0845	Marche 7 (arête)	0,69	0,46	15,10	2,68
0,0845	Marche 8 (arête)	0,62	0,43	17,68	2,83

Note : (*) nappe défectée.

Tableau 3 — Résultats expérimentaux : sonde monopoint (série I).

Débit Q_w m ³ /s	Location	$\frac{Y_{90}}{d_c}$	C_{mean}	$\frac{F_{max} d_c}{V_c}$	$\frac{U_w}{V_c}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
0,0799	Marche 4 (arête)	0,55	0,30	4,59	2,60
0,0799	Marche 5 (arête)	0,85	0,56	10,14	2,65
0,0799	Marche 6 (arête)	0,67	0,39	13,61	2,45
0,0799	Marche 7 (arête)	0,73	0,44	15,42	2,44
0,0799	Marche 8 (arête)	0,65	0,40	16,99	2,53
0,0708	Marche 3 (arête)	0,43	0,13	1,79	2,68
0,0708	Marche 4 (arête)	0,55	0,38	5,67	2,92
0,0708	Marche 5 (arête)	0,62	0,40	10,82	2,69
0,0708	Marche 6 (arête)	1,07 (*)	0,68 (*)	11,31	2,94
0,0708	Marche 7 (arête)	0,68	0,43	14,43	2,58
0,0708	Marche 8 (arête)	0,89	0,57	15,46	2,59
0,0665	Marche 3 (arête)	0,44	0,15	1,81	2,63
0,0665	Marche 4 (arête)	0,66	0,48	4,65	2,89
0,0665	Marche 5 (arête)	0,69	0,43	10,19	2,55
0,0665	Marche 6 (arête)	1,47 (*)	0,73 (*)	10,26	2,52
0,0665	Marche 7 (arête)	0,82	0,48	13,45	2,35
0,0665	Marche 8 (arête)	0,85	0,50	14,89	2,37
0,0643	Marche 3 (arête)	0,46	0,18	1,97	2,65
0,0643	Marche 4 (arête)	0,75	0,52	4,47	2,79
0,0643	Marche 5 (arête)	0,74	0,49	9,37	2,65
0,0643	Marche 6 (arête)	1,55 (*)	0,77 (*)	9,92	2,79
0,0643	Marche 7 (arête)	0,85	0,54	12,51	2,55
0,0643	Marche 8 (arête)	0,67	0,44	14,44	2,69
0,058	Marche 3 (arête)	0,51	0,24	2,22	2,58
0,058	Marche 4 (arête)	0,88	0,60	5,62	2,86
0,058	Marche 5 (arête)	0,82	0,52	9,00	2,55
0,058	Marche 6 (arête)	1,62 (*)	0,78 (*)	9,81	2,79
0,058	Marche 7 (arête)	0,81	0,51	12,06	2,48
0,058	Marche 8 (arête)	0,73	0,48	13,51	2,62
0,0519	Marche 3 (arête)	0,62	0,38	3,53	2,62
0,0519	Marche 4 (arête)	1,08	0,64	6,33	2,58
0,0519	Marche 5 (arête)	0,77	0,49	8,88	2,55
0,0519	Marche 6 (arête)	1,21 (*)	0,74 (*)	8,49	3,14
0,0519	Marche 7 (arête)	0,81	0,49	11,18	2,43
0,0519	Marche 8 (arête)	1,00 (*)	0,65 (*)	11,77	2,83
0,046	Marche 3 (arête)	0,56	0,36	3,24	2,78
0,046	Marche 4 (arête)	0,89	0,59	6,97	2,72
0,046	Marche 5 (arête)	0,72	0,48	9,22	2,65
0,046	Marche 6 (arête)	1,05 (*)	0,63 (*)	9,06	2,61
0,046	Marche 7 (arête)	0,72	0,48	10,14	2,65
0,046	Marche 8 (arête)	1,14 (*)	0,68 (*)	9,63	2,77

Note : (*) nappe défectée.

Tableau 4 — Résultats expérimentaux : sonde bipoint (série 2).

Q_w m ³ /s	Location	$\frac{Y_{90}}{d_c}$	C_{mean}	$\frac{F_{max} d_c}{V_c}$	$\frac{U_w}{V_c}$	$\frac{V_{90}}{V_c}$	$a_{mean} * d_c$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Series 2							
0,1819	Marche 6 (arête)	0,51	0,23	7,70	2,55	2,63	3,6
0,1819	entre marches 6 & 7	0,50	0,31	9,92	2,89	2,73	8,1
0,1819	Marche 7 (arête)	0,47	0,23	13,60	2,77	2,79	9,1
0,1819	entre marches 7 et 8	0,60	0,40	15,19	2,77	2,73	16,4
0,1819	Marche 8 (arête)	0,59	0,38	16,37	2,75	2,85	15,7
0,1142	Marche 5 (arête)	0,45	0,26	11,20	2,98	2,84	6,6
0,1142	Marche 6 (arête)	0,65	0,50	18,55	3,05	2,86	16,3
0,1142	Marche 7 (arête)	0,59	0,43	27,38	2,96	3,00	24,7
0,1142	entre marches 7 et 8	0,64	0,53	21,68	3,32	2,88	26,1
0,1142	Marche 8 (arête)	0,54	0,43	29,94	3,23	2,99	29,2
0,058	Marche 3 (arête)	0,46	0,20	4,06	2,73	2,65	1,5
0,058	Marche 4 (arête)	0,85	0,63	10,43	3,17	2,74	6,7
0,058	Marche 5 (arête)	0,78	0,56	13,74	2,91	2,30	13,9
0,058	Marche 6 (arête)	1,24 (*)	0,76 (*)	16,45	3,40	2,75	12,1
0,058	Marche 7 (arête)	0,79	0,55	19,64	2,86	3,48	17,3
0,058	Marche 8 (arête)	0,66	0,52	21,13	3,19	3,09	21,7

Note : (*) nappe défectée.

où \tanh est la fonction tangente hyperbolique, D' est la diffusivité turbulente adimensionnelle, et K' est une constante adimensionnelle d'intégration. On montre que D' et K' sont des fonctions uniquement du taux de vide moyen C_{mean} (Chanson 1995b, 1997b). Entre deux arêtes de marche, on observe une aération importante de la cavité tourbillonnaire, influant sur la distribution du taux de vide pour $y/d_c < 0,2$ à $0,4$ (fig. 4B).

Pour toutes les mesures, la fréquence de bulles et le taux de vide sont liés par une loi quasi-parabolique :

$$\frac{F}{F_{max}} = 4C(1 - C) \quad (5)$$

avec une fréquence maximale F_{max} observée autour de $C = 50\%$ (fig. 4D).

Aux arêtes des marches, les distributions de vitesses interfaciales suivent une loi de type puissance :

$$\frac{V}{V_{90}} = \left(\frac{y}{Y_{90}}\right)^{1/N} \quad (6)$$

avec $N = 5$ à 6 . Par contre, entre arêtes de marches d'escalier, les profils de vitesses sont affectés fortement par les échanges de quantité de mouvement entre l'écoulement et les recirculations tourbillonnaires (fig. 4E).

IV ■ CARACTÉRISTIQUES DIPHASIQUES (2) ÉCOULEMENTS TRANSITOIRES

En écoulements transitoires, les distributions de taux de vide diffèrent substantiellement des résultats obtenus en écoulement extrêmement turbulent (fig. 5). À l'exception de la première marche, immédiatement en aval du point d'apparition de l'eau blanche, et des nappes défectées (voir ci-dessous), les profils de taux de vide, aux arêtes de marches, ont une forme pratiquement linéaires :

$$C = 1,11 \frac{y}{Y_{90}} \quad (7)$$

Pour des débits inférieurs à $0,075$ m³/s, on a observé, à certaine(s) marche(s) en aval du point d'apparition de l'eau blanche, des nappes défectées. Ceci est indiqué dans les tableaux 3 et 4 par une astérisque (*), et sur la figure 5. Visuellement, la nappe « décolle » à la marche supérieure, effleure légèrement l'arête de la marche (marquée (*)), et ré-attache le coursier à la marche aval. D'une certaine manière, la marche est « court-circuitée ». On observe, dans ce cas, un taux de vide moyen très important ($C_{mean} \sim 0,65$ à $0,8$), et des éjections fortes de gouttelettes. La hauteur caractéristique Y_{90}/d_c est de l'ordre de $1,2$ à $1,6$, et on observe une hauteur Y_{98}/d_c d'à peu près $1,5$ à $2,0$ (fig. 5A). De tels résultats ont des implications directes sur la hauteur minimale des bajoyers (« sidewalls »).

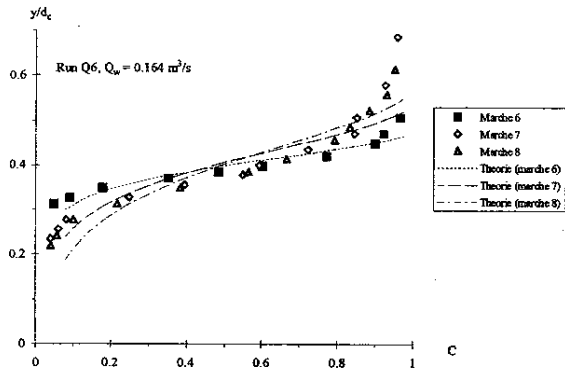
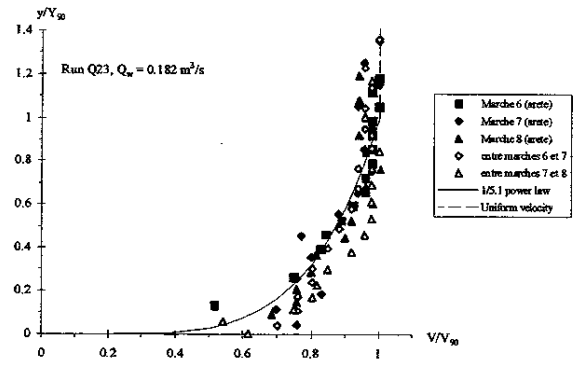
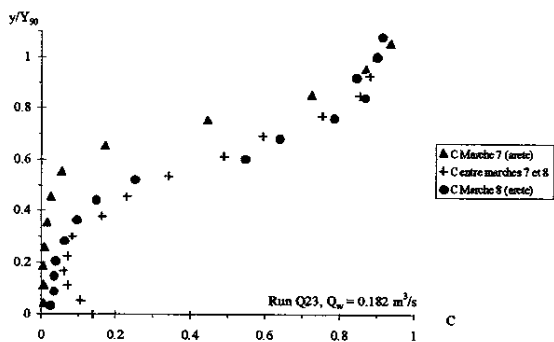


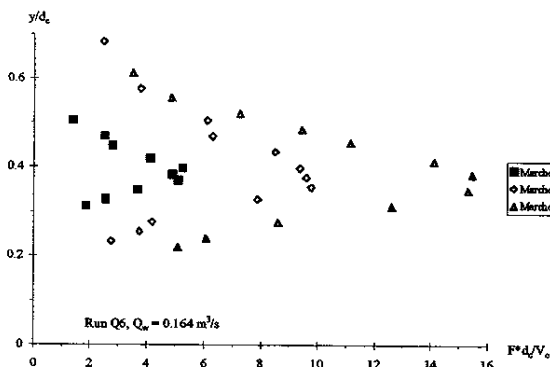
Figure 4 : Propriétés diphasiques d'écoulements extrêmement turbulents
(A) Profils de taux de vide ($Q_w = 0,164 \text{ m}^3/\text{s}$).



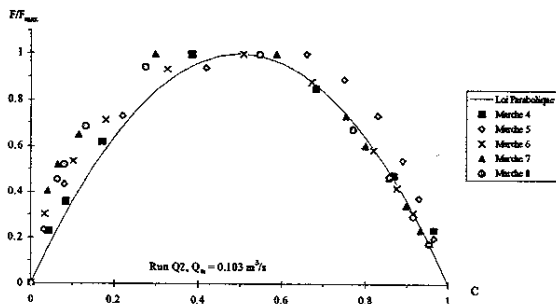
(E) Distributions des vitesses ($Q_w = 0,182 \text{ m}^3/\text{s}$).



(B) Profils de taux de vide entre arêtes de marches ($Q_w = 0,182 \text{ m}^3/\text{s}$).



(C) Profils de fréquence adimensionnelle de bulles ($Q_w = 0,164 \text{ m}^3/\text{s}$).



(D) Relation entre le taux de vide et la fréquence de bulles d'air ($Q_w = 0,103 \text{ m}^3/\text{s}$).

La relation entre le taux de vide et la fréquence de bulles suit pratiquement une loi parabolique aux arêtes de marches (Eq. (5)) (fig. 5B), même pour les nappes défectées. Sur la figure 5B, on note l'absence de mesures pour de faibles taux de vide, car les écoulements sont très aérés.

Enfin, la figure 5C montre des profils adimensionnels de vitesses. On note des redistributions importantes de vitesses d'une arête de marche à la suivante. Il est possible que le coursier soit trop court pour observer un profil d'équilibre, quoiqu'il soit envisageable que les écoulements transitoires, comme leur nom l'indique, n'atteignent pas des conditions limites stables.

IV.1 Discussion

Dans la plupart des cas, on observe des cavités d'air sous l'écoulement, en aval du point d'apparition de l'eau blanche. (On n'observe aucune cavité en amont.) La taille des cavités alterne d'une marche à la suivante. Par exemple, une petite cavité peut être observée à une marche, suivie d'une cavité de taille moyenne à la marche suivante, et une toute petite cavité à la marche prochaine. Toutefois, on ne sait pas si l'existence de ces cavités est liée aux irrégularités des murs latéraux (ex. joints), ou à l'aération et à la désintégration de l'écoulement.

V DISCUSSION

Bien que les résultats ci-dessus démontrent des propriétés diphasiques très différentes entre écoulements extrêmement turbulents et écoulements transitoires, les caractéristiques moyennées, en fin de coursier, sont relativement proches en termes de coefficient de traînée, de fréquence de bulles d'air maximales (adimensionnelles), et d'aires interfaciales adimensionnelles (tableaux 3 et 4, fig. 6). Figure 6 présente les grandeurs moyennées, mesurées à l'arête de la huitième marche, pour l'ensemble des débits investigués.

La vitesse moyenne adimensionnelle de l'écoulement est de l'ordre de $U_w/V_c \approx 2,65$, correspondant à un coefficient de traînée de l'ordre de $f \sim 0,16$, f étant défini comme un coefficient de Darcy-Weisbach (Henderson 1966, Chanson 1999). La fréquence maximale de bulles d'air, sous forme adimensionnelle, est une fonction du débit :

$$\frac{F_{\max} d_c}{V_c} = 36,3 \left(\frac{d_c}{h} - 0,375 \right) \left(1,82 - \frac{d_c}{h} \right) \quad (8)$$

$0,6 \leq d_c/h \leq 1,5$

On notera que ce résultat ne s'applique qu'aux mesures obtenues avec la sonde monopoint. Les mesures avec la sonde

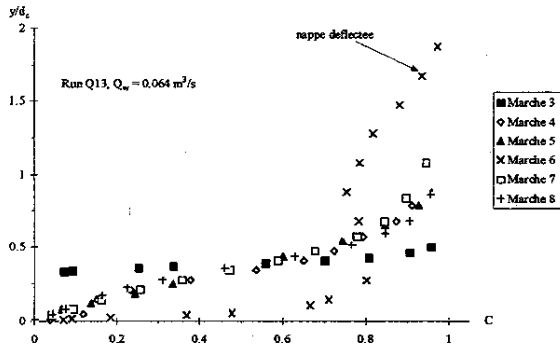


Figure 5 : Propriétés diphasiques d'écoulements transitoires
(A) Distributions de taux de vide aux arêtes de marche ($Q_w = 0,064 \text{ m}^3/\text{s}$).

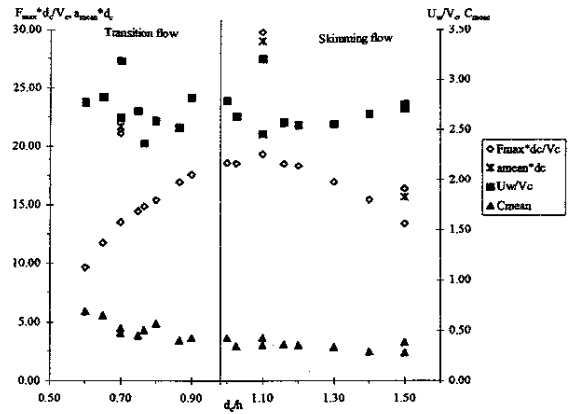
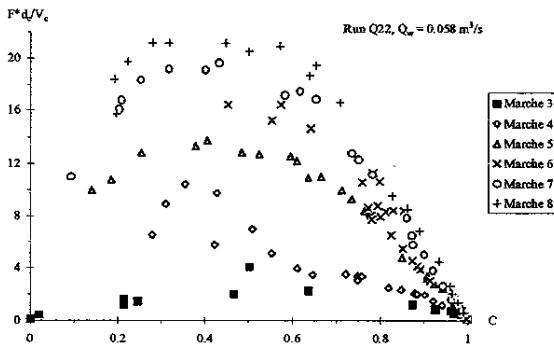
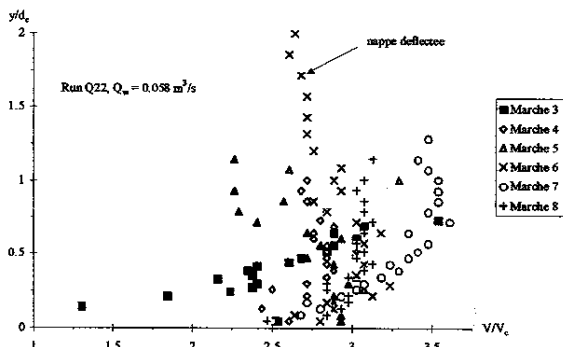


Figure 6 : Propriétés diphasiques à l'arête de la 8^e marche.



(B) Distributions de fréquences de bulles aux arêtes de marche ($Q_w = 0,058 \text{ m}^3/\text{s}$).



(C) Distributions des vitesses aux arêtes de marche ($Q_w = 0,058 \text{ m}^3/\text{s}$).

ment devient non aéré sur tout le coursier au dessus d'un débit critique (supérieur au débit maximum de cette étude).

VI ■ CONCLUSION

Les écoulements sur les coursiers en marches d'escalier sont caractérisés par un entraînement d'air conséquent, que l'on ne doit pas négliger. De ce fait, on a conduit des séries de mesures diphasiques, sur un modèle physique de taille importante, avec une hauteur de marches de 0,10 m et une pente moyenne de 22°. Les observations démontrent l'existence d'un régime d'écoulement transitoire, pour des débits intermédiaires entre les écoulements en nappes et les écoulements extrêmement turbulents, sur une plage de débits relativement importante.

Des mesures détaillées de profils de taux de vide, fréquences de bulles, et vitesses superficielles, ont été faites pour des écoulements extrêmement turbulents et des écoulements transitoires. Dans les écoulements extrêmement turbulents, on observe des variations relativement progressives des propriétés diphasiques, et on peut paramétrer les distributions de taux de vide, de fréquences de bulles, et de vitesses. Les écoulements transitoires ont, par contre, des caractéristiques diphasiques singulièrement différentes, des écoulements extrêmement turbulents, avec de rapides variations (ou redistributions) longitudinales.

Bien que cette modélisation physique ait été conduite sur un canal de taille suffisamment importante, pour pouvoir négliger des effets d'échelle liés à l'entraînement d'air, l'étude est limitée à une pente, avec un coursier relativement court. Il serait souhaitable qu'un tel type d'étude soit conduit systématiquement pour d'autres géométries, et par d'autres équipes de recherche.

bipoint donnent des valeurs supérieures de 20 à 30 % (fig. 6). Enfin la surface interfaciale spécifique $a_{\text{mean}} * d_c$ est de l'ordre de 22, moyenne arithmétique sur trois mesures seulement.

Il faut noter que ces résultats ne s'appliquent qu'à une plage de débits (tableau 2), pour des mesures effectuées à l'arête de la huitième marche. Pratiquement, une augmentation de débit est accompagnée par un déplacement vers l'aval du point d'apparition de l'eau blanche. A la limite, l'écou-

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier ses collègues et étudiants : Messieurs M. Eastman, G. Illidge, L. Toombes et N. Van Schagen. Il remercie aussi le nombre important de personnes qui lui ont communiqué des informations, en particulier Mr P. Royet, CEMAGREF.

NOTATIONS

a aire interfaciale volumique locale (« specific interface area ») (m^{-1}), définie comme l'aire interfaciale par unité de volume eau-air ;

a_{mean} aire interfaciale spécifique moyennée (« depth-averaged specific interface area ») (m^{-1}) ;

C concentration en air définie comme le ratio du volume d'air sur le volume total ; aussi appelée taux de vide ;

C_{mean} concentration en air moyenne définie comme : $(1 - C_{mean}) * Y_{90} = d$;

D' diffusivité turbulente adimensionnelle, pour la distribution de concentration en air ;

d profondeur de référence mesurée perpendiculairement à la surface libre (m) définie comme :

$$d = \int_{C=0\%}^{C=90\%} (1 - C) dy$$

d_c profondeur critique (m) ; pour un canal rectangulaire :

$$d_c = \sqrt[3]{Q_w^2 / (gW^2)} ;$$

d_p hauteur (m) d'un remblai de marche ;

F fréquence (Hz) de bulles d'air ;

F_{max} fréquence maximale (Hz) de bulles d'air dans une section ;

f coefficient de perte de charge, ou coefficient de Darcy-Weisbach ;

g constante de gravité (m/s^2) ;

H charge (m) ;

h hauteur de marche (m), mesurée verticalement ;

K' constante d'intégration pour la distribution de concentration en air ;

l longueur de marche (m), mesurée horizontalement ;

N exposant de la loi de puissance du profil des vitesses ;

Q_w débit total (m^3/s) ;

U_w vitesse moyenne (m/s) définie comme : $U_w = Q_w / (W * d)$;

V vitesse interfaciale (m/s) ;

V_{max} vitesse maximale sur un coursier (m/s) ;

V_c vitesse critique (m/s) ; pour un canal rectangulaire : $V_c = Q_w / (W * d_c)$;

V_{90} vitesse de référence (m/s) pour $y = Y_{90}$;

W largeur du coursier (m) ;

Y_{90} profondeur de référence (m) où $C = 90\%$;

y distance depuis la surface du coursier (m), mesurée perpendiculairement à la surface du coursier (c.a.d. perpendiculairement à la ligne imaginaire reliant les arêtes des marches) ;

α pente du coursier ;

μ viscosité dynamique ($N.s/m^2$) ;

ν viscosité cinématique (m^2/s) ;

ρ masse volumique (kg/m^3) ;

σ tension superficielle entre l'air et l'eau (N/m) ;

\emptyset diamètre (m) ;

Indices

air écoulement d'air ;

c conditions d'écoulement critique ;

w écoulement d'eau.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BaCaRa (1991). — Etude de la Dissipation d'Énergie sur les Evacuateurs à Marches. *Rapport d'Essais*, Projet National BaCaRa, CEMAGREF-SCP, Aix-en-Provence, France, Oct., 111 pages.
- [2] BaCaRa (1997). — Roller Compacted Concrete. RCC for Dams. *Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, Paris, France, 181 pages.
- [3] BAKHMETEFF, B.A. (1932). — *Hydraulics of Open Channels*. McGraw-Hill, New York, USA, 1st ed., 329 pages.
- [4] BAKHMETEFF B.A., MATZKE A.E. (1936). — The Hydraulic Jump in Terms of Dynamic Similarity. *Transactions*, ASCE, Vol. 101, pp. 630-647. Discussion : Vol. 101, pp. 648-680.
- [5] CHANSON H. (1993). — Stepped Spillway Flows and Air Entrainment. *Can. J of Civil Eng.*, Vol. 20, No. 3, June, pp. 422-435.
- [6] CHANSON H. (1995a). — Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels, Weirs and Spillways. *Pergamon*, Oxford, UK, Jan., 292 pages.
- [7] CHANSON H. (1995b). — Air Bubble Diffusion in Supercritical Open Channel Flow. *Proc. 12th Australasian Fluid Mechanics Conference AFMC*, Sydney, Australia, R.W. Bilger Ed., Vol. 2, pp. 707-710.
- [8] CHANSON H. (1997a). — A Short History of Stepped Cascades in Australia. *ANCOLD Bulletin*, No. 106, Aug., pp. 101-111.
- [9] CHANSON H. (1997b). — Air Bubble Entrainment in Free-Surface Turbulent Shear Flows. *Academic Press*, London, UK, 401 pages.
- [10] CHANSON H. (1998). — Le Développement Historique des Cascades et Fontaines en Gradins. *Jl La Houille Blanche*, No. 7/8, pp. 76-84.
- [11] CHANSON H. (1999). — The Hydraulics of Open Channel Flows : An Introduction. *Butterworth-Heinemann*, Oxford, UK, 512 pages.
- [12] CHANSON H. (2000). — Forum article. Hydraulics of Stepped Spillways : Current Status. *Jl of Hyd. Engrg.*, ASCE, Vol. 126, No. 9, pp. 636-637.
- [13] CHANSON H., YASUDA Y., OHTSU, I. (2000). — Flow Resistance in Skimming Flow : a Critical Review. *Intl Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways*, Zürich, Switzerland, H.E. Minor & W.H. Hager Editors, Balkema Publ., pp. 95-102.
- [14] CROWE C., SOMMERFIELD M., TSUI Y. (1998). — Multiphase Flows with Droplets and Particles. *CRC Press*, Boca Raton, USA, 471 pages.
- [15] CUMMINGS P.D. (1996). — Aeration due to Breaking Waves. *Ph.D. thesis*, Dept. of Civil Engrg., University of Queensland, Australia.
- [16] CUMMINGS P.D., CHANSON H. (1997). — Air Entrainment in the Developing Flow Region of Plunging Jets. Part 2 : Experimental. *Jl of Fluids Eng.*, Trans. ASME, Vol. 119, No. 3, pp. 603-608 (ISSN 0098-2202).
- [17] ESSERY I.T.S., HORNER M.W. (1978). — The Hydraulic Design of Stepped Spillways. *CIRIA Report No. 33*, 2nd edition, Jan., London, UK.
- [18] GOSSE P., GREGOIRE A. (1997). — Dispositif de Réoxygénation Artificielle du Sinnamary à l'Aval du Barrage de Petit-Saut (Guyane). *Hydroécol. Appl.*, Tome 9, No. 1-2, pp. 23-56.
- [19] GOUBET A. (1992). — Evacuateurs de Crues en marches d'Escalier. *Jl La Houille Blanche*, No. 2/3, pp. 159-162. Discussion : No. 2/3, pp. 247-248.
- [20] HENDERSON F.M. (1966). — *Open Channel Flow*. MacMillan Company, New York, USA.
- [21] KNAUSS J. (1995). — S TO PHDHMA, der Altweibersprung. Die Rätselhafte Alte Talsperre in der Glosses-Schlucht bei Alyzeia in Akarnanien. *Archäologischer Anzeiger*, Heft 5, pp. 138-162 (in German).
- [22] OHTSU I.O., YASUDA Y. (1997). — Characteristics of Flow Conditions on Stepped Channels. *Proc. 27th IAHR Biennial Congress*, San Francisco, USA, Theme D, pp. 583-588.

- [23] PEYRAS L., ROYET P., DEGOUTTE G. (1991). — Ecoulement et Dissipation sur les Déversoirs en Gradins de Gabions. *Jl La Houille Blanche*, No. 1, pp. 37-47.
- [24] RAJARATNAM N. (1990). — Skimming Flow in Stepped Spillways. *Jl of Hyd. Engrg.*, ASCE, Vol. 116, No. 4, pp. 587-591. Discussion : Vol. 118, No. 1, pp. 111-114.
- [25] RUFF J.F., FRIZELL K.H. (1994). — Air Concentration Measurements in Highly-Turbulent Flow on a Steeply-Sloping Chute. *Proc. Hydraulic Engineering Conf.*, ASCE, Buffalo, USA, Vol. 2, pp. 999-1003.
- [26] SCHUYLER J.D. (1909). — Reservoirs for Irrigation, Water-Power and Domestic Water Supply. *John Wiley & sons*, 2nd edition, New York, USA.
- [27] WEGMANN E. (1911). — The Design and Construction of Dams. *John Wiley & Sons*, New York, USA, 6th edition.
- [28] WOOD I.R. (1991). — Air Entrainment in Free-Surface Flows. *IAHR Hydraulic Structures Design Manual No. 4*, Hydraulic Design Considerations, Balkema Publ., Rotterdam, The Netherlands, 149 pages.
Page 21