

MARCELO GIULIAN MARQUES

**NOUVELLE APPROCHE POUR LE DIMENSIONNEMENT
DES DISSIPATEURS À AUGES**

Thèse
présentée
à la Faculté des études supérieures
de l'Université Laval
pour l'obtention
du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.)

Département de Génie civil
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

DÉCEMBRE 1995

©Marcelo Giulian Marques, 1995

À Cláudia,
Juliana et
Camila

"Alles vergangliche ist nur ein gleichnis"
(Tout ce qui est transitoire n'est qu'une référence)
Goethe

Remerciements

Je voudrais adresser la plus grande reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail:

Aux membre de ma famille pour l'encouragement, la compréhension et le support qu'elle m'a apporté, mais aussi pour l'incroyable patience dont ont su faire preuve tout au long de mon cheminement.

Au Professeur Jean-Louis Verrette, Dr. ing., pour son orientation, stimulant et ses critiques à mes travaux de recherches.

Au Professeur José Llamas, Dr. ing., pour sa stimulation et son appui pendant la réalisation de ce travail.

À M. Jean Drapeau, ing. M. Sc., pour son aide inestimable dans toutes les parties de ce travail (exécution des essais, analyse des résultats, révision, etc.) et pour son amitié sincère.

À M. Michael Hodgson, ing. M. Sc., pour son aide à la révision de ce travail.

À M. Arfaoui Moncef, ing. M. Sc., pour son aide à la fin de ce travail.

À M. Guy Verret, technicien du laboratoire d'hydraulique, qui ne s'est jamais lassé de répondre à mes interrogations et m'a aidé pendant l'exécution des essais.

À M. Gérard Coté, technicien du laboratoire d'hydraulique, qui était sans cesse disponible pour me donner un coup de main.

Au Conselho Nacional de Pesquisa e Tecnologia (CNPq) pour m'avoir accordé la bourse pour faire ce travail de recherche.

Aux professeurs, étudiants et amis qui, d'une façon ou d'une autre, m'ont aidé à l'exécution de ce travail.

TABLE DE MATIERES

	page
RÉSUMÉ.....	i
REMERCIEMENTS.....	ii
TABLE DE MATIERES.....	iii
Liste de figures.....	viii
Liste de photos.....	xvi
Liste de symboles.....	xvii
Liste de tableaux.....	xxii

CHAPITRE I CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

1.1	Dissipation d'énergie hydraulique.....	1
1.2	But et objectifs de la recherche.....	3
1.3	Méthodologie.....	4
1.4	Organisation du travail.....	5

CHAPITRE II LES STRUCTURES DE DISSIPATION D'ÉNERGIE HYDRAULIQUE

2.1	Généralités.....	6
2.2	Classification des types de dissipateurs.....	8
2.3	Critères pour choisir le type de dissipateur.....	11
2.4	L'utilisation de modèles réduits.....	14
	2.4.1 Les essais à fond mobile.....	15
	2.4.2 Les essais à fond cohésif.....	15
	2.4.3 Les essais à fond fixe.....	16
2.5	Le processus de dissipation et les mécanismes d'érosion.....	16
2.6.	Les structures courtes.....	18
	2.6.1 Saut de ski.....	18
	2.6.2 Bassin court.....	20
	2.6.3 Dissipateur à auge.....	22

2.6.4 Rampe ascendante.....	24
-----------------------------	----

CHAPITRE III

LES DISSIPATEURS À AUGES ET À RAMPE ASCENDANTE

3.1	Introduction.....	25
3.2	Considérations sur les conditions limites.....	26
3.3	La dissipation d'énergie dans un ressaut hydraulique.	29
	3.3.1 Classification des ressauts hydrauliques	30
	3.3.2 Perte de charge dans un ressaut hydraulique....	32
	3.3.3 Hauteurs conjuguées.....	35
	3.3.4 Longueur du ressaut hydraulique.....	38
3.4	La dissipation d'énergie dans un dissipateur à auge ...	41
	3.4.1 Les paramètres de base d'un dissipateur à auge	44
	3.4.2 Le dimensionnement d'un dissipateur à auge ...	45
3.5	Dissipateur de type rampe ascendante.....	64
3.6	Comparaison entre les différents critères.....	66
3.7	Estimation des dimensions de la fosse d'érosion en aval du dissipateur.....	74
3.8	Estimation des efforts hydrodynamiques en aval des dissipateurs.....	77
	3.8.1 Les méthodes pour estimer les efforts hydrodynamiques.....	77
	3.8.2 Les pressions hydrodynamiques.....	80
	3.8.3 Les fluctuations de pression dans le ressaut hydraulique.....	86
	3.8.4 La fluctuation de pression en aval des dissipateurs à auge et rampe ascendante.....	91

CHAPITRE IV

MÉTHODOLOGIE ET ÉLABORATION DU PROGRAMME DE RECHERCHE

4.1	Généralités.....	93
-----	------------------	----

4.2	Installation et modèle physique.....	94
4.3	Conditions des essais.....	96
4.4	Choix des structures étudiées.....	98
4.5	Prise de mesures.....	101
4.6	Méthodologie d'analyse de données.....	103

CHAPITRE V

ANALYSE DES RÉSULTATS

5.1	Introduction.....	105
5.2	Observation visuelle.....	106
	5.2.1 Condition de submersion de structures.....	106
	5.2.2 Fonctionnement des structures.....	112
5.3	Caractéristiques statistiques de la pression en aval du dissipateur.....	114
	5.3.1 Considérations initiales.....	114
	5.3.2 Pression moyenne.....	114
	5.3.3 Fluctuation de pression.....	115
	5.3.4 Fonction de distribution et de densité de probabilité.....	120
	5.3.5 Le coefficient d'asymétrie.....	121
	5.3.6 Le coefficient d'aplatissement.....	126
	5.3.7 Les pressions extrêmes mesurées.....	130
	5.3.8 Les fréquences dominantes et réponses de fréquence	135
	5.3.9 Les fonctions d'auto-corrélation.....	137
5.4	Influence des paramètres géométriques sur la distribution longitudinale de pression moyenne et sur la fluctuation ponctuelle de pression.....	139
	5.4.1 Influence de l'angle de sortie.....	139
	5.4.2 Influence de la longueur de la structure.....	141
	5.4.3 Influence de la cote de fond de la structure.....	143
	5.4.4 Influence de la hauteur de sortie.....	146
5.5	Comportement typique.....	149

5.5.1	Établissement des caractéristiques de la position L_n où se termine l'influence du dissipateur	152
5.5.2	Établissement des caractéristiques de la position auxiliaire L_a	154
5.5.3	Établissement des caractéristiques de la position de tangence (L_t).....	157
5.5.4	Établissement des caractéristiques de la position d'impact du jet (L_{smax}).....	159
5.5.5	Établissement des caractéristiques de la position intermédiaire (L_i).....	162
5.5.6	Établissement des caractéristiques de la position de sortie (L_s).....	166
5.6	L'angle optimal.....	168

CHAPITRE VI

CHEMINEMENT PROPRE AU DIMENSIONNEMENT DES DISSIPATEURS À AUGES

6.1	Critères de dimensionnement.....	174
6.1.1	Cheminement de dimensionnement pour obtenir la plus petite valeur de σ_s	174
6.1.2	Cheminement de dimensionnement pour obtenir la plus petite valeur de σ_s et σ_{max}	180
6.2	Limitations des critères de dimensionnement.....	183
6.3	Comparaison avec les critères proposés par les autres chercheurs.....	184
6.3.1	Angle de sortie - comparaison avec les valeurs proposées par différents chercheurs.....	185
6.3.2	longueur de la structure - comparaison avec les valeurs proposées par différents chercheurs.....	186
6.3.3	Cote de fond - comparaison avec les valeurs proposées par différents chercheurs.....	186

6.3.4 Cote de sortie - comparaison avec les valeurs proposées par différents chercheurs.....	187
6.3.5 Résumé des comparaisons par rapport aux critères proposés par les autres chercheurs.....	188

CHAPITRE VII CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

7.1 Rappel des objectifs.....	190
7.2 Méthodologie.....	191
7.3 Comparaison entre les dissipateurs à auge, à rampe ascendante et à la condition sans dissipateur	191
7.4 Les distributions de pression et de fluctuation de pression en aval des dissipateurs à auge.....	192
7.5 Influence des paramètres géométriques et hydrauliques	193
7.6 Critères de base de dimensionnement.....	196
7.7 Travaux futurs.....	196

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie citée.....	198
Bibliographie complémentaire.....	209

ANNEXES

Tableaux des résultats des essais.....	221
--	-----

LISTE DE FIGURES

Figure	page
2.1 Schéma d'une chute d'eau. (MS. A, fol, 59v.) faite par Léonard de Vinci (O'Malley [1969]).....	7
2.2 1 ^{er} groupe de dissipateurs.....	9
2.3 2 ^e groupe de dissipateurs.....	10
2.4 3 ^e groupe de dissipateurs.....	10
2.5 4 ^e groupe de dissipateurs.....	10
2.6 Dissipateur de type saut de ski.....	19
2.7 Bassin court.....	20
2.8 Bassins type III et V.....	21
2.9 Dissipateur à auge.....	23
2.10 Dissipateur à auge avec seuil denté (slotted bucket).....	23
2.11 Dissipateur de type rampe ascendante.....	24
3.1 Dissipateurs étudiés.....	25
3.2 Condition limite des structures à auge et à rampe ascendante.....	26
3.3 Position du ressaut hydraulique.....	27
3.4 Bassin de type I.....	28
3.5 Classification des ressauts hydrauliques - Sinninger et Hager [1989].....	31
3.6 Schéma de la perte d'énergie dans un ressaut hydraulique.....	32
3.7 Efficacité du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude.....	33
3.8 Pourcentage d'énergie perdue à l'intérieur d'un ressaut - Drapeau, Marques et Verrette [1995].....	34
3.9 Ressaut dans un canal à fond incliné.....	35
3.10 Longueur du ressaut hydraulique.....	38
3.11 Longueur du ressaut hydraulique - Peterka [1957].....	39
3.12 Caractéristiques du ressaut hydraulique.....	40
3.13 Dissipateur à auge (roller bucket).....	41

3.14	Fonctionnement d'une structure à auge (Zhiheng [1988]).....	43
3.15	Paramètres de base du dissipateur à auge.....	44
3.16	Profondeur du rouleau sur l'auge (y_b) et hauteur de la vague (y_s) produits par la sortie du jet - McPherson et Karr [1957].....	48
3.17	Dimensionnement du dissipateur à auge Peterka (U.S.B.R. [1957]).....	50
3.18	Bassin court possédant un comportement similaire à celui d'une auge submergée proposé par Li, Zhu et Fen [1988].....	57
3.19	Submersion de l'auge - Weizhag [1988].....	58
3.20	Schéma d'érosion - Zhenxing [1988].....	59
3.21	Relation entre la longueur minimale (L_s) et la longueur du ressaut (L_n) - Maestri et Marques [1989].....	61
3.22	Coefficient de submersion minimale (D_s) - Maestri et Marques [1989].....	62
3.23	Schéma de localisation des paramètres d'une structure à auge - Maestri et Marques [1989].....	62
3.24	Rampe ascendante.....	64
3.25	Schéma de calcul pour une rampe ascendante.....	64
3.26	Longueur minimale de la structure - Valença [1989].....	65
3.27	Valeurs Ω proposées par différents chercheurs en fonction du nombre de Froude (Fr).....	67
3.28	Influence de l'angle de sortie sur la longueur réduite de la structure selon différents chercheurs.....	68
3.29	Influence du nombre de Froude sur la longueur réduite de la structure selon différents chercheurs.....	69
3.30	Influence de l'angle de sortie (α) sur le degré de submersion (D_s).....	70
3.31	Influence du nombre de Froude (Fr) sur le degré de submersion (D_s).....	71
3.32	Φ^* en fonction de l'angle de sortie (α).....	72
3.33	Φ^* en fonction du nombre de Froude (Fr).....	72

3.34	Coefficient de pression C_R - Reinus [1986].....	78
3.35	Pression moyenne réduite dans un bassin de type I- Drapeau, Marques et Verrette [1995].....	79
3.36	Valeur moyenne de fluctuation de pression dans un bassin type I - (Drapeau, Marques et Verrette [1995])..	79
3.37	Schéma indiquant les paramètres hydrauliques et géométriques à considérer.....	83
3.38	Mise en relation du ressaut hydraulique et des graphiques de pression moyenne, du coefficient d'asymétrie et du coefficient de fluctuation de pression (Drapeau, Marques et Verrette [1995])	89
3.39	Coefficient de fluctuation de pression en aval des structures à auge ($Fr=2,4$) - Tamada [1989].....	91
4.1	Schéma du modèle.....	94
4.2	Schéma du modèle pour la condition sans dissipateur (égal au bassin type I).....	95
4.3	Schéma du modèle pour la structure de type rampe ascendante.....	95
4.4	Relation entre les hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude.....	97
4.5	Paramètres hydrauliques et géométriques.....	98
4.6	Valeur utilise de R_s (350 mm) pour rapport aux valeurs proposées par différents chercheurs.....	99
4.7	Influence de l'angle de sortie (α) et de la longueur (L_s).	100
4.8	Influence de la longueur (L_s) et de la hauteur de sortie (s).....	101
4.9	Influence de la cote de fond (C_f) et de la hauteur de sortie (s).....	101
4.10	Courbe de calibration du capteur de pression.....	102
4.11	Différence absolue entre la lecture du capteur de pression et celle du piézomètre.....	102
5.1	Schéma de la structure.....	109
5.2	Condition pour obetnir la submersion de la structure....	110
5.3	Schéma de l'écoulement sans dissipateur d'énergie.....	113
5.4	Schéma de l'écoulement d'un dissipateur à auge.....	114

5.5	Distribution de la pression moyenne réduite en fonction de x/L_n ($Fr=4,6$; $L_s=350$ mm; $C_f=-64$ mm).....	115
5.6	Distribution du coefficient de fluctuation de pression en fonction de x/y_t ($\alpha=30^\circ$; $C_f=-96$ mm; $L_s=350$ mm; $s=52$ mm).....	116
5.7	Distribution du coefficient de fluctuation de pression en fonction de x/y_t ($Fr=4,6$; $s=57$ mm).....	117
5.8	Distribution du coefficient de fluctuation de pression en fonction de x/L_n ($Fr=4,6$; $s=57$ mm).....	118
5.9	Distribution du coefficient de fluctuation de pression en fonction de x/L_n ($Fr=3,2$; $\alpha=45^\circ$; $L_s=250$ mm; $C_f=0$ mm et $s=203$ mm et $C_f=-96$ mm et $s=7$ mm).....	119
5.10	Histogramme et fonction de distribution de probabilité ($F_t=4,6$; $\alpha=0^\circ$; $C_f=0$ mm, prise #6).....	120
5.11	Histogramme et fonction de distribution de probabilité ($Fr=4,6$; $\alpha=15^\circ$; $C_f=-96$ mm; $L_s=650$ mm; $s=66$ mm; prise #13).....	120
5.12	Histogramme et fonction de distribution de probabilité ($Fr=4,6$; $\alpha=30^\circ$; $C_f=-96$ mm; $L_s=350$ mm; $s=52$ mm; prise #12).....	121
5.13	Histogramme et fonction de distribution de probabilité ($Fr=4,6$; $\alpha=45^\circ$; $C_f=-96$ mm; $L_s=300$ mm; $s=57$ mm; prise #11).....	121
5.14	Distribution du coefficient d'asymétrie en fonction de x/L_n ($Fr=4,6$; $\alpha=0^\circ$; $C_f=0$ mm).....	122
5.15	Distribution du coefficient d'asymétrie en fonction de x/L_n ($Fr=4,6$; $\alpha=15^\circ$; $C_f=-96$ mm; $L_s=650$ mm; $s=66$ mm).....	122
5.16	Distribution du coefficient d'asymétrie en fonction de x/L_n ($Fr=4,6$; $\alpha=30^\circ$; $C_f=-96$ mm; $L_s=350$ mm; $s=52$ mm)....	123
5.17	Distribution du coefficient d'asymétrie en fonction de x/L_n ($Fr=4,6$; $\alpha=45^\circ$; $C_f=-96$ mm; $L_s=300$ mm; $s=57$ mm).....	123
5.18	Distribution du coefficient d'asymétrie en fonction de x/L_n ($Fr=3,2$; $\alpha=45^\circ$; $L_s=250$ mm; $C_f=0$ mm et $s=203$ mm et $C_f=-96$ mm et $s=7$ mm).....	125
5.19	Distribution du coefficient d'aplatissement en fonction de x/L_n ($F_t=4,6$; $\alpha=0^\circ$; $C_f=0$).....	127

5.20	Distribution du coefficient d'aplatissement en fonction de x/L_n ($Fr=4,6$; $\alpha=15^\circ$; $C_f=-96$ mm; $L_s=650$ mm; $s = 66$ mm).....	127
5.21	Distribution du coefficient d'aplatissement en fonction de x/L_n ($Fr=4,6$; $\alpha=30^\circ$; $C_f=-96$ mm; $L_s=350$ mm; $s=52$ mm).....	128
5.22	Distribution du coefficient d'aplatissement en fonction de x/L_n ($Fr=4,6$; $\alpha=45^\circ$; $C_f=-96$ mm; $L_s=300$ mm; $s=57$ mm).....	128
5.23	Distribution du coefficient d'aplatissement en fonction de x/L_n ($Fr=3,2$; $\alpha=45^\circ$; $L_s=250$ mm; $C_f=0$ et $s=203$ mm et $C_f=-96$ mm et $s=7$ mm).....	129
5.24	Distribution des pressions maximales et minimales mesurées ($Fr = 4,6$; $\alpha=0^\circ$; $C_f=0$).....	132
5.25	Distribution des pressions maximales et minimales mesurées ($Fr=3,2$; $\alpha=15^\circ$; $C_f=-96$ mm; $L_s=450$ mm; $s=12$ mm).....	131
5.26	Distribution des pressions maximales et minimales mesurées ($Fr=4,6$; $\alpha=15^\circ$; $C_f=-96$ mm; $L_s=650$ mm; $s=66$ mm).....	131
5.27	Distribution des pressions maximales et minimales mesurées ($Fr=4,6$; $\alpha=30^\circ$; $C_f=-96$ mm; $L_s=350$ mm; $s=52$ mm).....	132
5.28	Distributions des pressions maximales et minimales mesurées ($Fr = 4,6$; $\alpha = 45^\circ$; $C_f = -96$ mm; $L_s = 300$ mm; $s = 57$ mm).....	133
5.29	Diagramme de Pearson.....	135
5.30	Densité spectrale ($Fr=4,6$; $\alpha=15^\circ$; $C_f=-96$ mm; $L_s=650$ mm; prise de pression #11).....	135
5.31	Fréquence dominante pour chaque prise de pression ($Fr=3,2$).....	137
5.32	Autocorrélogramme ($Fr = 4,6$; $\alpha = 0^\circ$; $C_f = 0$ mm; prise #7).....	138
5.33	Autocorrélogramme ($Fr=4,6$; $\alpha=15^\circ$; $C_f=-96$ mm; $L_s=650$ mm; $s=66$ mm; prise #11).....	138
5.34	Autocorrélogramme ($Fr=4,6$; $\alpha=30^\circ$; $C_f=-96$ mm; $L_s=350$ mm; $s=52$ mm; prise #7).....	138

5.35	Autocorrélogramme ($Fr=4,6$; $\alpha=45^\circ$; $C_f=-96$ mm; $L_s=300$ mm; $s=57$ mm; prise #7).....	138
5.36	Influence de l'angle de sortie sur la pression moyenne ($Fr=4,6$; $L_s=350$ mm; $C_f=-64$ mm).....	139
5.37	Influence de l'angle de sortie sur le coefficient de fluctuation de pression ($Fr=4,6$; $L_s=350$ mm; $C_f=96$ mm).....	140
5.38	Influence de la longueur de la structure sur la distribution de la pression moyenne ($Fr=4,6$; $\alpha=45^\circ$; $C_f=-96$ mm).....	142
5.39	Influence de la longueur de la structure sur la distribution du coefficient de fluctuation de pression ($Fr=4,6$; $\alpha=45^\circ$; $C_f=-96$ mm).....	143
5.40	Influence de la cote de fond sur la distribution de la pression moyenne ($Fr=4,6$; $\alpha=45^\circ$; $L_s=250$ mm).....	143
5.41	Influence de la cote de fond sur la distribution de la pression moyenne ($Fr=4,6$; $\alpha=30^\circ$; $s=50$ mm).....	144
5.42	Influence de la cote de fond sur la distribution du coefficient de fluctuation de pression ($Fr=4,6$; $\alpha=45^\circ$; $L_s=250$ mm).....	145
5.43	Influence de la cote de fond sur la distribution du coefficient de fluctuation de pression ($Fr_r=4,6$; $\alpha=30^\circ$; $s=50$ mm).....	145
5.44	Influence de la hauteur de sortie sur la distribution de la pression moyenne ($Fr=4,6$; $\alpha=15^\circ$; $C_f=96$ mm).....	146
5.45	Influence de la hauteur de sortie sur la distribution du coefficient de fluctuation de pression ($Fr=4,6$; $\alpha=15^\circ$; $C_f=-96$ mm).....	147
5.46	Schéma de l'influence de s sur σ	148
5.47	Comportement typique ($Fr=4,6$; $C_f=-96$ mm, $L_s=250$ mm; $\alpha=45^\circ$).....	151
5.48	Détermination de la position réduite ($L_n Fr/\Delta H$) en fonction de l'angle de sortie de la structure.....	153
5.49	Valeur moyenne de la fluctuation de pression (σ_n) à la position L_n	154

5.50	Détermination de la position L_a en fonction de l'angle de sortie de la structure.....	155
5.51	Pression moyenne réduite (P_a/P_n) à la position auxiliaire L_a en fonction de l'angle α	156
5.52	Valeur moyenne réduite de la fluctuation de pression (σ_a/P_n) à la position auxiliaire L_a en fonction de l'angle α	156
5.53	Pression moyenne réduite (P_t/P_n) à la position de tangence L_t en fonction de l'angle α	158
5.54	Valeur moyenne réduite de la fluctuation de pression (σ_t/P_n) à la position auxiliaire L_t en fonction de l'angle α	159
5.55	Coefficient $C_{L\sigma_{max}}$ pour déterminer la position de $L_{\sigma_{max}}$	160
5.56	Pression moyenne réduite ($P\sigma_{max}/P_n$) à la position $L_{\sigma_{max}}$ en fonction de l'angle α	161
5.57	Valeur moyenne réduite de la fluctuation de pression à la position $L_{s_{max}}$ en fonction de la longueur réduite de la structure.....	162
5.58	Détermination de la position réduite (L_i/L_n) en fonction de la longueur réduite de la structure (L_s/L_n)	163
5.59	Pression moyenne P_i à la position intermédiaire L_i en fonction de la longueur de la structure L_s	164
5.60	Valeur moyenne réduite de la fluctuation de pression à la position auxiliaire L_i en fonction de la profondeur réduite.....	165
5.61	Pression moyenne réduite (P_s/P_n) à la position L_s en fonction de la longueur réduite de la structure.....	167
5.62	Valeur moyenne réduite de la fluctuation de pression à la position auxiliaire L_s en fonction de la profondeur réduite.....	168
5.63	Comportement typique de la fluctuation de pression en aval de la structure.....	169
5.64	Distribution typique de la valeur moyenne de la fluctuation de pression en aval de la structure lorsque $s \geq s_2$	171

5.65	Angle optimal basé sur le critère d'effort.....	172
5.66	Angle optimal basé sur lecritère économique (\$ =f(L _s /L _n)).....	173
6.1	Dimensionnement d'une structure à auge pour obtenir la plus petite valeur moyenne de fluctuations de pression à la sortie de la structure (σ _s).....	177
6.2	Schéma des positions caractéristiques de distributions de pression et de fluctuation de pression.....	179
6.3	Dimensionnement des structures à auge pour obtenir la plus petite valeur de σ _s et σ _{max}	182
6.4	Longueur de la structure (L _s /L _n) - comparaison entre les valeurs proposées par différents chercheurs en fonction de l'angle α.....	186
6.5	Calage de la structure (T/y ₁) - comparaison des valeurs proposées par différents chercheurs en fonction de l'angle α.....	187
6.6	Cote de sortie (h _s /y ₁) -comparaison des valeurs proposées par différents chercheurs en fonction de l'angle α	188

LISTE DE PHOTOS

Photo	page
3.1 Ressaut hydraulique ($Fr_r=8,1$ ou $Fr=6,4$).....	32
3.2 Dissipateur à auge (roller bucket).....	41
3.3 Rampe ascendante.....	63
5.1 Condition sans structure ($\alpha=0^\circ$) - ressaut hydraulique - Fr=4,6.....	106
5.2 Structure non submergée ($\alpha=15^\circ$; $C_f=-32$ mm; $L_S=250$ mm et $Fr=4,6$).....	107
5.3 Structure submergée ($\alpha=30^\circ$; $C_f=-32$ mm; $L_S=250$ mm et Fr=4,6).....	107
5.4 Structure submergée ($\alpha=45^\circ$; $C_f=-32$ mm; $L_S=250$ mm et Fr=4,6).....	107
5.5 Structure submergée ($\alpha=30^\circ$; $C_f=-32$ mm; $L_S=250$ mm et Fr=3,6).....	108
5.6 Structure submergée ($\alpha=30^\circ$; $C_f=-32$ mm; $L_S=250$ mm et Fr=5,5).....	108
5.7 Structure non submergée ($\alpha=30^\circ$; $C_f=-32$ mm; $L_S=250$ mm et Fr=6,4).....	108

LISTE DE SYMBOLES

a_0	coefficient
a_1	coefficient
a_2	coefficient
A_d	coefficient d'asymétrie
b	longueur du dissipateur
b_s	largeur pour le bord de la structure
C	coefficient
C_f	cote de fond de la structure
C_p	coefficient de fluctuation de pression
C_R	coefficient de pression qui varie selon l'angle d'inclinaison des fractures du lit (figure 3.34)
C_s	cote de sortie de la structure
C_0	coefficient (tableau 3.1)
C_1	coefficient (tableau 3.1)
C_2	coefficient (tableau 3.1)
D_s	degré de submersion = D_s/y_1
D_1	coefficient (tableau 3.1)
D_2	coefficient (tableau 3.1)
f	coefficient de frottement variant entre 0,03 et 0,08 (Reinus [1970] - tableau 3.7)
f_a	fréquence d'acquisition de données
f_d	fréquence dominante
f_m	fréquence dominante sur le modèle
f_p	fréquence dominante sur le prototype
F_c	nombre de Froude par rapport au fond de l'auge
F_f	force de frottement sur les parois et sur le fond
F_l	nombre de Froude à la sortie du canal.
F_{pr}	composante horizontale (x) de pression à l'entrée
F_{pl}	composante horizontale (x) de pression à la sortie;
Fr	nombre de Froude à l'entrée du dissipateur mesuré au niveau d'eau en aval
Fr_r	nombre de Froude à l'entrée du ressaut hydraulique
g	accélération gravitationnelle

h	charge sur la crête de l'évacuateur
h_c	hauteur critique de l'écoulement
h_s	hauteur entre la sortie de la structure et la crête de l'évacuateur
h_{tx}	perte de charge partiele au point x;
H_l	énergie totale en aval
H_m	énergie totale en amont de l'évacuateur par rapport au fond de la structure
H_p	hauteur de la crête de l'évacuateur par rapport au radier de la structure de dissipation
H_r	énergie à l'entrée du ressaut
H_s	charge totale sur l'auge
k	coefficient d'aplatissement
k_{rj}	coefficient de Rajaratnam, pour la ressaut hydraulique
L	distance entre les deux rayons de concordance
L_a	position où Ad passe par un minimum et où le jet principal atteint toute la profondeur de l'écoulement
L_d	endroit où l'écoulement se décolle du fond
L_e	la distance d'érosion
L_i	position ou l'écoulement ateiend sa cote la plus haute et ou se forme le rouleau de protection
L_n	limite de l'influence de la dissipation provoqe par la structure
L_n^*	longueur du ressaut dans un canal à contre-pente
L_r	longueur du rouleau
$L_{r\theta}$	longueur du ressaut en contre-pente
L_s	longueur de la structure
L_{smax}	longueur maximale de la structure
L_{smin}	longueur minimale de la structure
L_t	position où Ad coupe l'ordonnée et à partir de laquelle la composant verticale de la vitesse commence à être significative
$L_{\sigma max}$	position de la plus haute fluctuation de pression
m	degré de submersion de Zhenxing [1988]
n	coefficient de probabilité
N^*	relation de l'énergie dissipée

N	nombre total d'intervalles de temps
N_a	niveau d'eau aval
P	pression moyenne temporelle
P_a	pression moyenne à la position L_a
P_{Cmax}	pression maximale sur l'auge
P_f	composante horizontale de la force entre les sections d'entrée et de sortie
P_i	pression moyenne à la position L_i
P_n	pression moyenne à la position L_n
P_n^*	pression en hauteur d'eau
P_s	pression moyenne à la position L_s
P_t	pression moyenne à la position L_t
P_T	pression hydrodynamique totale en kg/cm^2
P_x	pression moyenne pour tout le phénomène en hauteur d'eau
$P\%$	pression hydrodynamique à la position du point x avec une certaine probabilité (%)
$P_{\sigma max}$	pression moyenne à la position $L_{\sigma max}$
q	débit spécifique
Q	débit
r_1	rayon de la position intérieure du jet
Re	nombre de Reynolds par rapport au niveau d'eau en aval
R_g	résistance du lit à l'écoulement
Re_r	nombre de Reynolds à l'entrée du ressaut hydraulique
R_s	rayon de concordance de la structure
R_1	rayon de la courbe de concordance entre l'évacuateur et la structure de dissipation.
s	hauteur de sortie de la structure par rapport au lit
S_r	nombre de Strouhal
t	temps
t_e	profondeur d'érosion par rapport au radier
T	calage du fond de l'auge par rapport au niveau d'eau aval
T_a	temps de acquisition des données
T_e	profondeur d'érosion par rapport au niveau d'eau en aval
T_{max}	calage maximal du fond de l'auge par rapport au niveau d'eau aval

T_{\min}	calage minimal du fond de l'auge par rapport au niveau d'eau aval
v	vitesse moyenne de l'écoulement
v_l	vitesse moyenne à la sortie du ressaut hydraulique
v_r	vitesse moyenne à l'entrée du ressaut hydraulique
v_s	vitesse moyenne à la sortie du dissipateur
v_n	vitesse moyenne en aval dans la région non perturbée par la dissipation;
V	volume du rouleau sur l'auge
v_m	vitesse moyenne au fond de l'auge
x	coordonnée du point de mesuré
y	profondeur d'eau de l'écoulement ou coordonnée du point de mesuré de la fluctuation par rapport à un point de référence
y_b	profondeur d'eau mesurée entre le fond de l'auge et la surface du rouleau
y_c	profondeur d'eau sur le fond de la structure
y_l	profondeur conjuguée lente
y_n	profondeur d'eau normale du canal en aval de la structure
y_n^*	profondeur d'eau nécessaire pour avoir la submersion de l'auge
y_r	profondeur conjuguée rapide
y_s	profondeur de la vague provoquée par la sortie du jet de l'auge par rapport au fond de la structure
y_t	profondeur d'eau à entrée du dissipateur, mesurée à la hauteur du niveau aval
z	coordonnée du point de mesuré de la fluctuation par rapport à un point de référence
z_t	hauteur de la chute
α	angle de sortie de la structure
ΣF_{px}	sommation des forces selon la direction x ;
ΔH	différence de niveau entre l'amont et l'aval
ΔH^*	perte de charge totale à la fin de la dissipation
ΔP	amplitude de la fluctuation de pression;
θ	angle d'inclinaison du canal
θ_t	angle d'incidence du jet
λ	échelle géométrique du modèle

γ	pois spécifique du fluide
ψ	$\psi = \frac{v_t \sin \theta_t}{\sqrt{g y_t}}$
$\eta\%$	efficacité (rendement) du ressaut hydraulique - relation entre l'énergie perdue (ΔH) et l'énergie initiale (H_f)
$\eta_{x\%}$	relation en % entre la perte de charge partielle au point x et la perte de charge totale à la fin du ressaut hydraulique
φ	$\varphi = \frac{\sigma_i}{P_n (1 + \tan \alpha)}$
φ_s	facteur de forme $\leq 1,0$
φ^*	$\varphi^* = \frac{h_s}{y_l}$
ϑ	$\vartheta = \frac{y_n - s}{y_t F_t} \cos \alpha$
ρ	masse spécifique de l'eau
ν	viscosité cinématique de l'eau
σ_x	écart type des fluctuations de pression mesurées au point x.
σ_a	fluctuation de pression à la position L_a
σ_i	fluctuation de pression à la position L_i
σ_{max}	fluctuation de pression à la position $L_{\sigma_{max}}$
σ_n	fluctuation de pression à la position L_n
σ_s	fluctuation de pression à la position L_s
σ_t	fluctuation de pression à la position L_t
σ_x	fluctuation de pression à la position x
χ_{FH}	coefficient empirique de Rajaratnam [1965]

LISTE DE TABLEAU

Tableau	page
2.1 Bassin horizontal court.....	22
3.1 Rayon de concordance avec l'évacuateur.....	28
3.2 Coefficients de l'équation de McCorquodale et Mohamed [1994].....	38
3.3 Caractéristiques du ressaut hydraulique et de distribution de la perte de charge long du ressaut (Drapeau, Marques et Verrette [1995]).....	40
3.4 Angles recommandés par Rajan et Rao [1980].....	54
3.5 Variation maximale de la longueur (L_s) en fonction de l'angle de sortie (α).....	69
3.6 Longueur de la structure (L_s).....	70
3.7 Coefficient de friction de Reinus [1970].....	78
4.1 Paramètres du modèle pendant les essais.....	96
4.2 Paramètres significatifs.....	98
4.3 Caractéristiques des structures étudiées.....	100
5.1 Submersion des structures.....	111
5.2 Valeurs du coefficient d'aplatissement et d'asymétrie pour les sections caractéristiques de l'écoulement.....	134
5.3 Valeur de la longueur L_n	153
5.4 Valeur de la longueur L_a	155
5.5 Position de la section de tangence.....	157
5.6 Valeur de L_s/L_n	163
5.7 Influence des paramètres géométriques σ_s , $L^* \sigma_{max}$ et σ_{max}	170
6.1 Calcul des efforts en aval des structures de type à auge.....	179
7.1 Paramètres qui influence la pression moyenne et la valeur moyenne de la fluctuation de pression.....	195

CHAPITRE I

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

1.1 Dissipation d'énergie hydraulique

Le contrôle de la dissipation de l'énergie hydraulique en aval des structures hydrauliques a comme objectif de redonner à l'écoulement des conditions semblables à celles qui prévalaient avant la construction de l'ouvrage. De cette façon, l'énergie créée par la construction doit se dissiper d'une façon adéquate sans provoquer de fortes érosions qui pourraient mettre en danger la stabilité de l'ouvrage. Pour cette raison, le contrôle de la dissipation d'énergie est d'une grande importance en génie hydraulique.

La dissipation de l'énergie hydraulique s'effectue principalement par la création d'une forte turbulence qui provoque de grandes fluctuations de pression et de vitesse. Différents types de structures peuvent être construits pour provoquer ce phénomène devant être stabiliser à une distance bien définie par rapport à la structure. La solution choisie doit être la plus efficace et la plus économique possible.

Il existe de nombreuses études abordant le dimensionnement des structures de dissipation. Cependant, les études comparatives entre les divers types de structures sont rares. Plus encore, il n'y a pratiquement pas d'études comparatives relativement aux critères de dimensionnement pour un même type de structure.

Souvent, l'adoption d'un bassin de dissipation conventionnel, basé sur un ressaut hydraulique, engendre à des coûts très élevés, rendant le projet irréalisable au point de vue économique. Aujourd'hui la tendance est de choisir des structures compactes, moins dispendieuses que les structures traditionnelles. Ces structures sont utilisées en fonction de la résistance du lit versus les efforts provoqués par la dissipation de l'énergie. Ces structures présentent, par contre, un faible rendement et provoquent une grande agitation de l'écoulement. Règle générale, la dissipation se produit dans la masse d'eau située immédiatement en aval de la structure et par impact de l'écoulement contre le lit. Les efforts provoqués par l'impact varient à mesure que l'érosion se développe. Au début, le gradient de pression est élevé et c'est ce dernier qui provoque l'érosion. Il diminue à mesure que l'érosion augmente. Dans le cas des dissipateurs courts, il est fréquent de laisser l'écoulement créer naturellement son propre bassin de dissipation en fonction des caractéristiques de l'écoulement et du site. Il faut alors s'assurer que ce dernier ne met pas la stabilité de la structure en danger. Ainsi, il faut porter une attention particulière au site où se produit l'érosion et au type d'efforts hydrodynamiques qui s'y présentent. Jusqu'à maintenant, peu de tentatives ont été effectuées pour comprendre l'interaction dynamique entre l'eau et la géologie du milieu. Cette compréhension doit sûrement passer par la connaissance des efforts hydrodynamiques (valeurs extrêmes, fluctuation, fréquence, etc.).

Il existe deux types de dissipateurs compacts qui fonctionnent de façon submergée, soit le type de rampe ascendante et le type à auge (roller bucket). Ils ont comme principe de base que la plus grande partie de la dissipation se produit en aval de la structure, à la fois, dans la masse d'eau et sur le lit.

Bien qu'aujourd'hui les connaissances en informatique nous permettent de résoudre une grande partie des problèmes hydrauliques, seule la modélisation physique permet d'obtenir des mesures précises et d'établir une comparaison sur l'efficacité hydraulique des dissipateurs. Ceci nous rappelle la citation d'un des inventeurs de l'hydraulique et un infatigable constructeur de canaux¹: «Lorsqu'on parle de l'écoulement d'eau d'abord on utilise l'expérience et ensuite la raison.» (Léonard de Vinci, d'après Kobus [1980]).

Aujourd'hui, nous pouvons utiliser les systèmes d'acquisition de données en temps "réel" et faire le traitement de plusieurs variables (pression, vitesse, etc.). L'utilisation de ces systèmes est d'une grande importance, parce qu'elle nous permet de mesurer, d'estimer et d'analyser des paramètres jusqu'à maintenant difficiles à mesurer. Par exemple, l'évaluation de la fluctuation et des valeurs extrêmes de pression ne pouvaient être obtenues par des équipements traditionnels.

Avant l'utilisation des systèmes d'acquisition en temps "réel", l'analyse de l'efficacité des dissipateurs d'énergie était faite sous forme qualitative (essais à fond mobile ou cohésif) et par des mesures quantitatives des valeurs moyennes de pression, vitesse, etc. (essais à fond fixe). Aujourd'hui, cette analyse se fait à travers l'évaluation des fluctuations de pression et/ou de vitesse, en aval des structures de dissipation, parce que ces systèmes permettent une économie de temps, une grande facilité d'exécution et une meilleure fiabilité des résultats.

1.2. But et objectifs de la recherche

Le but de cette recherche est de faire le point sur les critères de dimensionnement des dissipateurs d'énergie hydraulique à auge afin d'orienter les études des différents scénarios tant techniques

¹ Selon Balzac d'après Robert [1993].

qu'économiques. Pour atteindre ce résultat, nous avons fixé les objectifs suivants:

- a) Comparaison de deux (2) types de dissipateurs courts (auge et rampe ascendante) avec la condition sans dissipateur (ressaut libre sur un lit horizontal de longueur infinie);
- b) Analyse de la distribution de pression moyenne et de la distribution de fluctuation de pression en aval des dissipateurs;
- c) Analyse de l'influence des paramètres géométriques du dissipateur et hydrauliques de l'écoulement sur la distribution de pression moyenne et la distribution de fluctuation de pression;
- d) Définition des critères de base de dimensionnement.

1.3. Méthodologie

Pour faire cette recherche nous ont étudiés 44 structures avec six (6) nombres de Froude différents ($3,0 \leq F_r \leq 8,0$) pour un total de 264 essais. Ceci nous a permis d'analyser l'influence de chacun des paramètres géométriques de la structure. Nous avons ainsi étudié quatre (4) angles de sortie (α), six (6) longueurs (L_s) et quatre (4) cotes de fond (C_f).

Pour évaluer l'efficacité de la dissipation d'énergie, nous avons analysé la distribution de pression moyenne et la distribution de la fluctuation de pression en aval des dissipateurs comme paramètre de comparaison entre les différentes géométries. Pour mesurer la fluctuation de pression nous avons utilisé 22 prises de pression placées sur le radier du canal en aval de chaque dissipateur. À chaque prise nous avons mesuré la pression pendant 200 secondes avec une fréquence d'acquisition de 50 Hz soit 10 000 données par prise.

1.4. Organisation du travail

La première partie de ce travail aborde le problème de la dissipation d'énergie du point de vue théorique et expérimental basé sur une révision bibliographique.

Ensuite nous présentons les études expérimentales faites dans un modèle hydraulique bidimensionnel construit au laboratoire d'hydraulique du département de génie civil de l'Université Laval à Québec - Canada.

L'analyse des données nous permet d'accroître la connaissance du phénomène de la dissipation d'énergie hydraulique, d'estimer les valeurs extrêmes de pression en aval des structures et, surtout, de trouver les dimensions optimales du dissipateur d'énergie hydraulique.

Dans la conclusion, nous présentons un résumé des résultats obtenus sur le fonctionnement des dissipateurs ainsi que l'influence de chacun des paramètres géométriques et hydrauliques, les efforts hydrodynamiques en aval de la structure, les critères de dimensionnement et les recommandations pour la poursuite de la recherche.

CHAPITRE II

LES DISSIPATEURS D'ÉNERGIE HYDRAULIQUE

2.1 Généralités

Généralement les complexes hydrauliques sont des ouvrages de grandes dimensions projetées pour contrôler un grand volume d'eau comme dans le cas d'un barrage. À la base de l'évacuateur, l'énergie cinétique est extrêmement élevée et cette dernière doit être dissipée, de façon à ce qu'elle ne compromette pas la sécurité de l'ouvrage.

Le processus de dissipation d'énergie le plus connu est le ressaut hydraulique. Dans ce phénomène, une partie importante de l'énergie cinétique est transformée en énergie potentielle et en énergie de fluctuation turbulente, cette dernière à la fin dissipée en chaleur. Les dissipateurs ont alors comme rôle d'absorber cette énergie, de résister aux forces induites par la turbulence et de restituer l'écoulement approprié au lit naturel de la rivière.

Léonard de Vinci (XV^e siècle) a été le premier à étudier à la dissipation d'énergie hydraulique et à l'érosion provoquée par l'écoulement. En effet, il a travaillé sur différents projets tels: le projet de canalisation hydraulique de Milan en Italie, le barrage mobile sur l'Isonzo en aval de Gorizia (Frioul-Italie), la régulation du cours de la Loire et du Cher et l'assèchement des marais de Romorantin (France). La figure 2.1 rapporte un dessin de Léonard de Vinci sur un schéma d'une chute d'eau et l'érosion forme par l'écoulement.

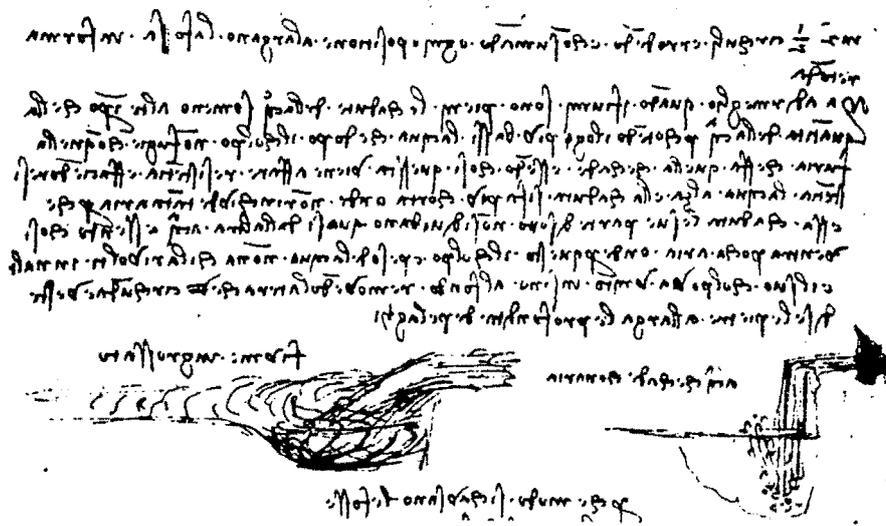


Fig. 2.1 - Schéma d'une chute d'eau. (MS. A, fol, 59v.) faite par Léonard de Vinci (O'Malley [1969]).

Environ 300 ans plus tard (XVIII^e siècle), le ressaut hydraulique a été utilisé pour augmenter la profondeur de l'eau afin de régler des problèmes de drainage. La première étude proprement dite a été réalisée par Bidone [1818]. C'est même en son honneur que le ressaut hydraulique est aussi désigné de "ressaut de Bidone" (Levi [1995]).

La relation entre les profondeurs de l'eau à l'entrée et à la sortie du ressaut (équation 2.1) a été attribuée à Bélanger (en 1828). Cette relation est connue comme l'équation de Bélanger. Elle fournit généralement des valeurs plus fortes que les valeurs réelles, parce qu'elle ne considère pas

la perte de charge par friction (Rajaratnam [1965], Hager et Bremen [1989] et Zhuo-Yi [1991]).

$$\frac{y_l}{y_r} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_r^2} - 1 \right) \quad (2.1)$$

y_l et y_r = hauteurs conjuguées lente et rapide;
 Fr_r = nombre de Froude à l'entrée du ressaut.

À partir de 1900 les recherches sur la dissipation d'énergie hydraulique ont connu de grands progrès, principalement dans l'étude de la forme du ressaut hydraulique.

Depuis cette date, le contrôle de la dissipation d'énergie hydraulique est devenu une préoccupation du génie hydraulique, spécialement dans le secteur des barrages, en fonction de l'augmentation de la hauteur des barrages et des débits. C'est seulement après 1930 que les études en vue de construire des dissipateurs courts ont commencé. Nous pouvons citer: le barrage de Grande Coulée en 1933, les travaux du "Bureau of Reclamation" (U.S.B.R. [1957]), de McPherson et Karr [1957], de Elevatorski [1959], etc.

2.2 Classification des types de dissipateurs

Pour faire le rassemblement des différents types de dissipateurs nous nous sommes basés sur la classification d'Ortiz [1982], qui les a classifiés en 4 groupes selon leur conception de base. Dans le 4^e groupe nous avons aussi mis les petits dissipateurs, qui ne sont pas conventionnels. De cette façon nous avons:

- 1^{er} groupe: Lorsque le lit de la rivière présente peu de résistance à l'écoulement, la dissipation doit survenir à l'intérieur du dissipateur et la restitution de l'écoulement doit se faire de la façon la plus calme possible. Règle générale, ces sont les structures qui utilisent la formation d'un ressaut hydraulique

pour produire la dissipation. La figure 2.2 présente quelques exemples de dissipateurs de ce groupe.

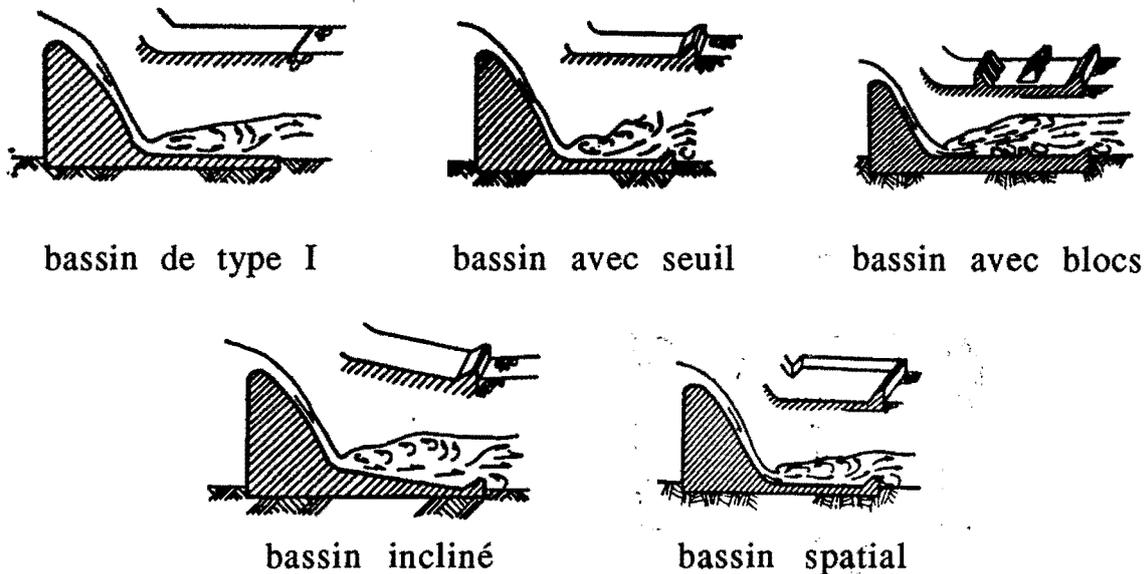


Fig. 2.2 - 1^{er} groupe de dissipateurs

- 2^e groupe: Lorsque le lit de la rivière présente une plus grande résistance à l'écoulement, le dimensionnement de la structure peut être fait de façon à favoriser un écoulement régulier en prenant pour acquis qu'une partie de l'énergie se dissipe au coeur de l'écoulement, en aval de la structure. Dans ce groupe, les structures sont prévues de façon à ce que le jet soit lancé en aval de la structure pour ainsi garantir sa sécurité. La figure 2.3 présente quelques exemples de dissipateurs de ce groupe.
- 3^e groupe: Dans ce groupe de dissipateurs, l'énergie se dissipe pendant la chute. Ce résultat est obtenu à l'aide de singularités localisées à la surface de l'évacuateur. Ils sont utilisés pour des petites hauteurs de chute. La figure 2.4 présente deux exemples de dissipateurs de ce groupe.
- 4^e groupe: Ce groupe rassemble les dissipateurs non conventionnels qui ne font pas partie des 3 premiers groupes.

Dans ce groupe, nous trouvons les dissipateurs où la dissipation est engendrée par des jets d'eau qui se frappent pendant la chute. Ce groupe contient aussi les dissipateurs de petites dimensions qui sont utilisés dans le drainage urbain. La figure 2.5 présente deux exemples de dissipateurs de ce groupe.

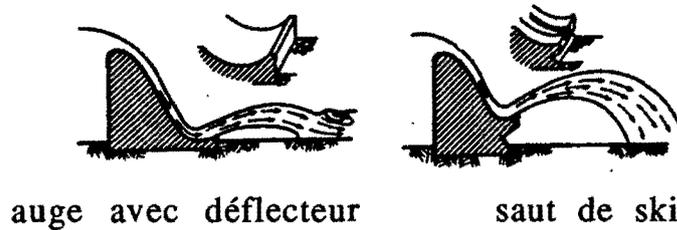
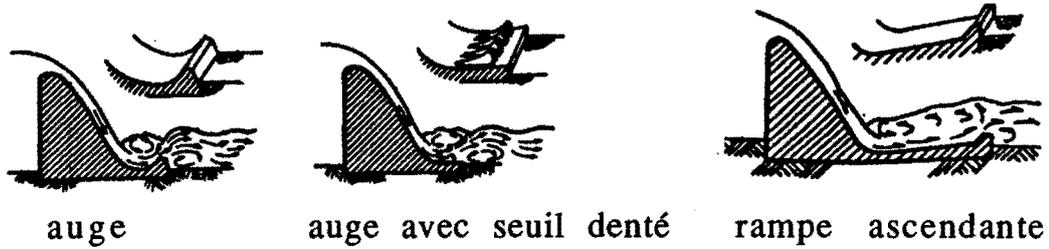


Fig. 2.3 - 2^e groupe de dissipateurs

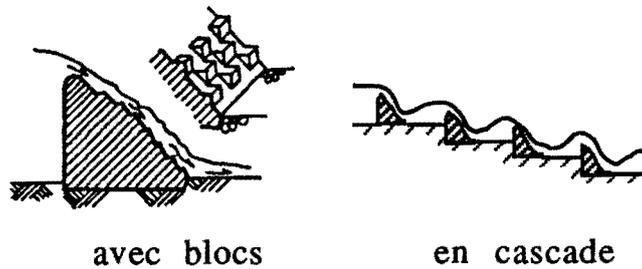


Fig. 2.4 - 3^e groupe de dissipateurs

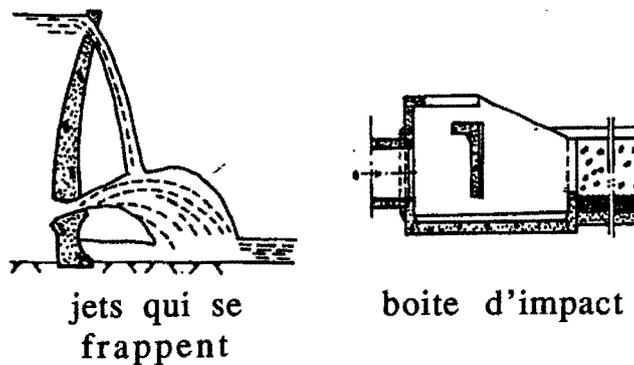


Fig. 2.5 - 4^e groupe de dissipateurs

Dans le travail qui suit, nous allons étudier les structures courtes, plus spécifiquement les structures à auge, rampe ascendante et comme valeur de référence le cas sans structure.

2.3 Critères pour choisir le type de dissipateur

Comme nous l'avons rappelé ci-dessus, il y a différents types de dissipateurs d'énergie et le choix de la structure de dissipation repose sur les principaux facteurs suivants:

- a) la morphologie, la topographie et la géologie du terrain;
- b) le type de barrage utilisé;
- c) la possibilité de pénétration de blocs de glace ou de bois dans le dissipateurs (Llamas [1972]);
- d) la disposition des différentes constructions adjacentes;
- e) les caractéristiques hydrauliques (hauteur de la chute, débit spécifique, etc.);
- f) la fréquence d'opération de l'évacuateur;
- g) les facilités de manutention (moyens techniques disponibles);
- h) les risques associés à des dommages et ruptures causés aux barrages;
- i) la comparaison économique avec d'autres types de dissipateurs.

Le dissipateur doit être choisi de façon à avoir une efficacité appropriée et être économiquement viable. Réduire le débit spécifique est toujours la meilleure solution du point de vue de l'efficacité de la dissipation, toutefois, cela implique une augmentation de la largeur de l'évacuateur et conséquemment du coût de la structure. Nous devons donc chercher le point optimal entre l'efficacité et le coût.

L'étude de la dissipation de l'énergie est reliée au débit spécifique et son objectif est de restituer ce dernier au lit naturel de la rivière avec une énergie résiduelle minimale. Cette énergie doit être compatible avec la

résistance du lit face à l'action de l'écoulement. Cette résistance peut se produire de deux façons différentes:

- a) Faible résistance (alluvions, sables, etc.): la plus grande partie de la dissipation doit être réalisée sur le dissipateur et la restitution doit être faite de la façon la plus tranquille possible;
- b) Forte résistance: la dissipation est faite sur le dissipateur, dans la masse d'eau et par impact sur le fond du lit en aval. Dans ce cas, les structures sont projetées de façon à ce que le jet issu de la structure tombe loin de l'extrémité aval du dissipateur pour garantir sa sécurité.

En fonction du grand nombre de variables et des différentes solutions possibles, les critères utilisés pour le choix de la meilleure structure sont souvent mal définis. Fréquemment, cette décision est prise en fonction de la préférence et de l'expérience de l'ingénieur. Plusieurs auteurs ont étudié les critères de sélection du dissipateur. Par exemple:

- Davis [1952] a essayé de regrouper tous les critères de dimensionnement pour les dissipateurs d'énergie;
- Rouse [1957] a résumé le dimensionnement de plusieurs types de structures ainsi que leurs applications;
- Peterka [1957] a fourni les dimensions pour différents types de dissipateurs en fonction des résultats provenant des modèles hydrauliques;
- Elevatorski [1959] a présenté les bases théoriques des structures de dissipation basées sur les principes de la mécanique des fluides. Il a aussi décrit qualitativement le fonctionnement des structures;
- Berryhill [1964] a fait une étude sur le fonctionnement des dissipateurs basé sur 200 sources d'information de diverses régions du monde;
- Rudavsky [1976] a présenté les critères pour choisir le type de dissipateur par rapport à son fonctionnement en modèles hydrauliques et en prototypes;

- Tamada [1980] a fait la comparaison du fonctionnement hydraulique de bassins de dissipation horizontaux en fonction des résultats des essais sur des modèles physiques avec fond mobile;
- Neidert [1980] a traité la question du fonctionnement des dissipateurs en fonction de la quantité de mouvement et de la puissance d'écoulement par unité de largeur de la structure;
- Manson [1982] a fait la corrélation entre la variation de la charge hydraulique et le débit pour choisir le dissipateur, en faisant ressortir l'endroit où les problèmes arrivent habituellement et en indiquant les mesures nécessaires pour les empêcher. Ce travail est basé sur l'étude de 370 dissipateurs répandus dans 61 pays;
- Ortiz [1982] a étudié la macroturbulence, en aval des bassins de dissipation qui utilisent le ressaut hydraulique, à l'aide de la mesure de la fluctuation de vitesse;
- Avila [1986] a abordé le choix du dissipateur et les mécanismes d'érosion liés à la résistance du lit. Son étude est basée sur les caractéristiques hydrauliques observées sur des modèles, ainsi que sur des prototypes;
- Ruideng [1988] a présenté quelques critères pour le design des structures de dissipation basées sur des expériences réalisées en Chine;
- Tamada [1989] a analysé le fonctionnement de trois dissipateurs d'énergie à rampe ascendante pour des nombres de Froude compris entre 1,5 et 4,5;
- Pereira [1990] a fait une discussion sur le design des structures de dissipation basées sur des expériences réalisées au Brésil.

Pour presque tous les projets, le cheminement adopté pour le choix du dissipateur est le même. Il faut d'abord analyser les facteurs topographiques et géologiques du site du barrage ainsi que le type de barrage. Par la suite, les scénarios de différentes constructions (par exemple, si l'évacuateur est incorporé au barrage ou isolé) sont analysés et, finalement, les considérations hydrauliques (hauteur de la chute, débit, etc.) et économiques des diverses options possibles sont abordées.

De nos jours, la tendance est d'utiliser un des 4 types suivants de dissipateurs:

- a) saut de ski (lorsqu'il y a une chute considérable);
- b) bassin horizontal court;
- c) dissipateur à auge
- d) dissipateur à rampe ascendante.

Même lorsque la géologie n'est pas favorable, nous pouvons prévoir une fosse d'érosion (plunge-pool), pré-excavée pour atténuer les effets du jet et essayer de contrôler l'érosion. Cette fosse augmente la profondeur de l'eau utilisée pour la dispersion du jet et réduit les efforts hydrodynamiques responsables de l'érosion du lit. Cependant, malgré l'importance des efforts hydrodynamiques en aval des dissipateurs, ils sont rarement mesurés ou calculés lors de l'élaboration des projets. Il n'y a pratiquement pas de tentative pour comprendre l'interaction dynamique des conditions hydrauliques face à la résistance du lit. Cette compréhension passe nécessairement par la connaissance des distributions de pression moyenne et de la distribution de la fluctuation de pression.

2.4 L'utilisation de modèles réduits

Nous utilisons souvent, comme outil additionnel, les modèles réduits à partir desquels nous pouvons réaliser les essais avec fonds mobile, cohésif ou fixe. Cependant, ces essais présentent certaines limitations parce que nous ne pouvons pas reproduire à l'échelle certains facteurs de l'écoulement sur les prototypes, comme le degré d'aération de l'écoulement et les conditions géomécaniques du fond du canal ou de la rivière en aval. Toutefois, les modèles réduits ils représentent une excellente méthode pour comparer l'efficacité des dissipateurs, pour prévoir leur comportement et pour avoir une estimation des efforts, de la vitesse, etc. La théorie des modèles hydrauliques est bien expliquée dans différents livres, entre autres Kobus [1980] et Martins [1988].

2.4.1 Les essais à fond mobile

Les essais à fond mobile sont habituellement réalisés avec d'hypothèses qui n'existent pratiquement pas en réalité: l'isotropie et l'homogénéité du sol. Ces deux caractéristiques rendent "qualitatifs" les essais à fond mobile pour les structures de dissipation d'énergie.

Même si ces types d'essais ne permettent pas de prévoir exactement la forme et l'évolution de la fosse d'érosion, ils permettent de:

- a) Déterminer la profondeur limite et la forme de la fosse d'érosion sur la région d'impact du jet si le lit ne possède aucune résistance aux efforts hydrodynamiques;
- b) Vérifier la présence d'une érosion régressive qui pourrait mettre en danger la structure;
- c) Caractériser et identifier l'existence des courants de recirculation, ses effets érosifs sur les talus, les berges et dans la fosse d'érosion.

2.4.2 Les essais à fond cohésif

Les essais avec fond cohésif visent à reproduire les caractéristiques du sol en place et permettent de faire des talus représentatifs du prototype. Ils peuvent montrer les design qui satisfont la tendance du processus érosif. Ces essais sont aussi qualitatifs et permettent simplement une meilleure visualisation de la tendance du processus érosif. Ils sont peu utilisés en raison d'une série de difficultés, entre autres:

- a) Implantation du fond cohésif dans le modèle et
- b) Nettoyage périodique de tout le système d'alimentation du modèle.

Différents types de matériaux peuvent être utilisés pour la composition du fond cohésif:

- a) Ciment aluminium - Rezende [1965];
- b) Gypse - Pinto [1989] et
- c) Colle de céramique - Pinto [1989].

2.4.3 Les essais à fond fixe

Les essais à fond fixe sont effectués pour permettre d'obtenir les informations quantitatives (vitesse, pression, etc.). Dans la plupart des cas, l'utilisation d'un fond fixe représente la situation avant le début de l'érosion qui est considéré comme la condition critique. De nos jours, la tendance est d'utiliser l'essai avec fond fixe pour mesurer les efforts dynamiques, dans la structure et en aval, à partir de la mesure de la fluctuation de pression. L'utilisation de cette méthode a débuté à la fin des années 60 grâce à la mise au point des techniques pour mesurer et interpréter les données presque instantanément. L'étude de la fluctuation de pression en aval de dissipateurs hydrauliques a commencé avec les mesures effectuées sur un ressaut hydraulique en aval de vannes par Vasiliev et Buryev [1967] et Wisner [1967], ainsi qu'en aval d'un évacuateur par King [1967]. Les structures à auge plane et rampe ascendante ont été étudiées par Tamada [1989] et Marques [1991]. Cependant, les conditions sous lesquelles ces structures ont été étudiées étaient trop particulières et limitatives.

2.5 Le processus de la dissipation et les mécanisme d'érosion

“L'eau érode les montagnes et comble les vallées, si elle le pouvait elle réduirait la terre en une sphère parfaite.” (Léonard de Vinci - Codex Atlantis d'après Reti [1974]). Le pouvoir érosif de l'eau est directement proportionnel à l'énergie que possède l'écoulement.

En effet, toute énergie qui n'est pas dissipée par la structure se retrouvera dans la masse d'eau et sur le lit en aval. Ces détails sont bien présentés par Elevatorski [1957]; Peterka [1957] et Rudavsky [1976].

Hartung et Hausler [1973] ont proposé une méthode pour le calcul de la pression hydrodynamique en aval des jets libres ou contrôlés. Selon eux, le processus de la diffusion du jet dans la masse d'eau, en aval de la structure, peut être analysé avec précision par la théorie de la turbulence du jet libre. La dissipation d'énergie se produit durant le processus de changement d'inertie: le jet d'eau à haute vitesse pénètre dans la masse d'eau aval au repos. L'énergie qui n'est pas dissipée dans la masse d'eau sera transmise au lit. Elle peut alors provoquer le développement d'une fosse d'érosion si le lit n'est pas capable de supporter ces efforts.

Spur [1983] et Avila [1986] présentent en détail l'évolution de la fosse d'érosion en aval des évacuateurs. L'impact du jet exerce une combinaison de forces sur le lit qui varie à mesure que la fosse se développe. Initialement, lorsque la fosse d'érosion n'est pas développée, le gradient de pression est élevé et le jet rebondit sur le lit. Les hautes pressions vont pénétrer dans les fractures et fêlures du sol et vont provoquer la hydrofracture du lit. L'érosion va alors se développer. Les caractéristiques du lit qui vont déterminer l'évolution de la fosse d'érosion sont:

- a) La résistance du lit;
- b) la quantité de fractures;
- c) la qualité des fractures (ouvertes, scellées, décomposées, etc.) et
- d) l'orientation des "discontinuités" par rapport à l'angle d'incidence du jet (Reinus [1986]).

Quand le lit est homogène et suffisamment résistant pour confiner les courants dans la zone d'impact du jet, l'érosion est plus concentrée dans cette région et la fosse d'érosion s'approfondit. Sur un lit hétérogène, la forme de la fosse d'érosion peut être affectée. D'une façon générale, les courants de retour ou de re-circulation ont une influence sur les régions latérales et sur la région en amont de la zone d'impact du jet. Elles peuvent ainsi éroder le lit en fonction de sa résistance à l'écoulement. C'est pour cette raison que l'on doit prendre des mesures appropriées

pour éviter l'érosion près de la structure. Les courants de retour peuvent aussi transporter des blocs à l'intérieur du dissipateur, principalement s'il y a une opération asymétrique des vannes de l'évacuateur. Ces blocs peuvent alors provoquer une action abrasive sur la surface de la structure.

2.6 Les structures courtes

D'une manière générale, comme nous l'avons dit auparavant, il y a aujourd'hui une tendance à utiliser des structures courtes et compactes afin de diminuer les coûts de construction. Dans ces conditions, les structures qui présentent des résultats satisfaisants sont notamment:

- a) Le saut de ski;
- b) Le bassin court;
- c) Le dissipateur à auge et
- d) La rampe ascendante (ressaut sur radier en contre-pente).

2.6.1 Saut de ski

Ce type de dissipateur (figure 2.6) a comme objectif de lancer le jet d'eau à une distance qui ne nuit pas à la stabilité de la structure. Avec ce type de dissipateur, la formation d'une fosse d'érosion est inévitable. Il est alors possible de faire une pré-excavation sur la zone d'impact pour essayer d'avoir un contrôle sur cette fosse d'érosion et réduire les efforts hydrodynamiques sur le fond. Lorsque ce type de structure est utilisé, il faut surveiller les aspects suivants:

- a) L'agitation superficielle: l'impact du jet sur l'eau provoque une grande agitation superficielle en produisant des vagues qui se propagent en direction des rives lesquelles nécessiteront alors une protection adéquate;
- b) Le courant de re-circulation: le jet frappe le plan d'eau et déplace une masse d'eau vers l'aval en créant une dépression en amont

de la zone d'impact, laquelle entraîne un retour de courant vers l'amont. Ces courants à vitesse élevée peuvent engendrer des courants hélicoïdaux, qui peuvent provoquer des problèmes d'érosion au pied de la structure. Une façon de minimiser ces courants est d'augmenter l'angle de sortie de la structure, ce qui a pour effet d'augmenter l'angle d'entrée du jet dans la masse d'eau. Cependant, l'augmentation de l'angle de sortie provoque des problèmes lors de la mise en marche de l'évacuateur. Effectivement, s'il n'y a pas une protection spéciale, il pourrait y avoir érosion du parement aval de la structure.

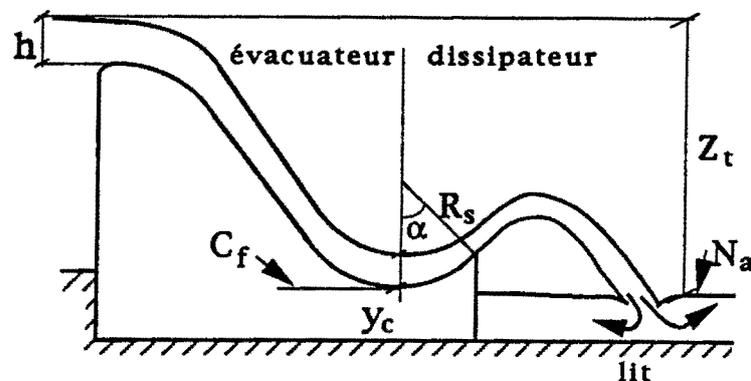


Fig. 2.6 - Dissipateur de type saut de ski

U.S.Army [1977], Grishini [1982], Rao [1982], Pinto [1987], Sinniger et Hager [1989] entre autres, ont présenté des critères de dimensionnement de ce type de structure que l'on peut résumer ainsi:

- a) Charge sur l'évacuateur (h) plus grand que 10 m;
- b) Hauteur de la chute (Z_t) plus grande que 20 m;
- c) Cote de fond de la structure (C_f) plus haute que le niveau aval (N_a);
- d) Angle de sortie (α) entre 30° et 40° (30° est préférable);
- e) Rayon (R_s) entre 5 et 10 fois la hauteur d'eau sur le fond de la structure (y_c).

Note: ce type de structure ne sera pas étudié parce qu'elle possède des particularités qui ne sont pas communes avec les structures à auge et rampe ascendante (ex.: fortement avec l'air, etc.).

2.6.2 Bassin court

Malgré la dénomination de court, cette structure est plus longue que les autres. Elle exige, cependant, une profondeur plus petite et elle présente aussi un écoulement plus régulier. La figure 2.7 montre un schéma de cette structure.

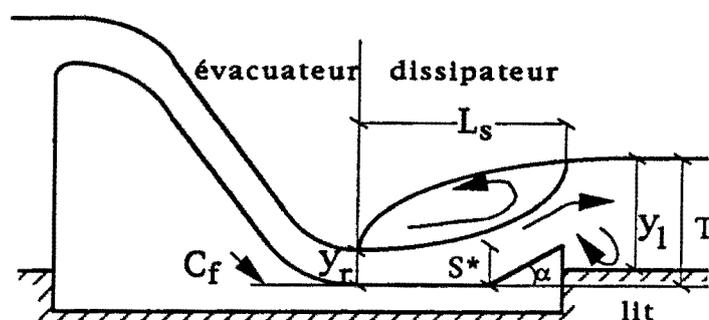


Fig. 2.7 - Bassin court

L_s = longueur de la structure

s^* = hauteur du seuil de sortie par rapport à la cote de fond

T = élévation du niveau aval par rapport à la cote de fond (C_f)

$$C_f = T - y_1 \quad (2.2)$$

y_1 et y_r = hauteurs conjuguées (équation 2.1)

Nous pouvons voir que le bassin court est une variation des bassins type III et V (figure 2.8), qui ne possède ni déflecteurs de dissipation à l'entrée ni déflecteurs intermédiaires (baffle pier).

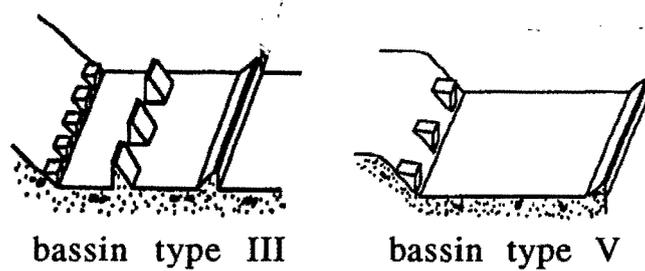


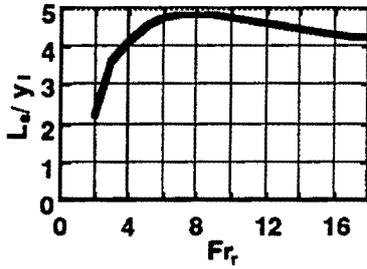
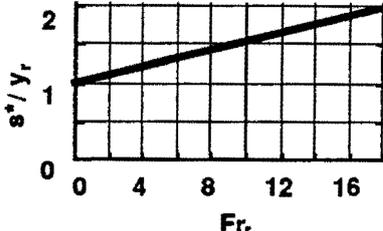
Fig. 2.8 - Bassins type III et V

L'utilisation de blocs dans le bassin pour réduire la longueur est une mesure efficace, mais elle implique un coût élevé d'entretien. L'expérience sur des structures de grandes dimensions a démontré que la cavitation, l'abrasion et les vibrations détruisent ces éléments parfois mêmes durant une seule crue. Pour éviter les problèmes de cavitation, la vitesse d'entrée doit être plus petite ou égale à 15 m/s (U.S.B.R. [1987]).

Le dimensionnement du bassin court fait appel à la théorie du ressaut hydraulique, qui est bien expliquée dans les livres de Chow [1985], French [1987], Sinniger et Hager [1989], entre autres. Ce type de dissipateur provoque une partie du ressaut hydraulique sur la structure. Le déflecteur de sortie (end sill) est disposé à la fin de la structure dans le but de décoller l'écoulement du fond et de le projeter plus loin, là où la dissipation d'énergie va se compléter. Dans le cas d'un lit rocheux, composé de grands blocs, le déflecteur de sortie placée en aval d'un bassin court peut augmenter sérieusement le risque d'érosion près de la structure (Lopardo [1992]). Lorsque nous analysons les différents critères de dimensionnement de ce type de structure (tableau 2.1), nous observons que celui-ci doit avoir une longueur variant entre 0,3 à 1,0 fois la longueur du ressaut hydraulique, selon la référence consultée et la résistance du lit à l'écoulement.

Parmi les chercheurs ayant mesuré la fluctuation de pression dans ce type de structure et dans sa partie aval nous pouvons citer, entre autres, Lopardo [1980], Toso [1985] et Tamada [1989].

Note: Ce type de structure ne sera pas étudié dans ce travail parce qu'il possède une géométrie complètement différente de celles des structures à auge et rampe ascendante.

Auteur	Différence de niveau (T)	Longueur de la structure (L_s)	Déflecteur de sortie (end sill)
Elevatorski [1957]	$T \geq y_l$	$L_s = 6,9 C (y_l - y_r)$ $0,6 \leq C = f(R_g) \leq 1,0$	—
Peterka [1957]	$T \geq y_l$		 et $\alpha \approx 26^\circ$
Li [1988]	$T = 1,2 y_l$	$L_s = T + s^* \tan \alpha$	$\alpha = 20^\circ$ et $s^* \approx 0,2 y_l$

R_g = résistance du lit à l'écoulement;

Tab. 2.1 - Bassin horizontal court

2.6.3 Dissipateur à auge

Des quatre types de structures discutées, le dissipateur à auge est le plus court et le plus compact. Toutefois, selon Rajan et Rao [1982] et Tamada [1989], le dissipateur à auge exige la plus grande différence de niveau (T) entre la cote de fond (C_f) de la structure et le niveau aval (N_a). Son comportement caractéristique est montré dans les figures 2.3 et 2.9. L'angle de sortie se situe entre 30° et 45° .

La dissipation dans ce type de structure est faite par des rouleaux qui se forment en aval de l'évacuateur. Le rouleau dans la structure tourne

dans le sens antihoraire, tandis que le rouleau en aval de la structure, localisé près du pied de la structure, tourne dans le sens horaire. Ce dernier rouleau possède la propriété d'apporter les matériaux érodés au pied de la structure, ce qui contribue à sa protection. Ce sont ces rouleaux qui caractérisent le fonctionnement de ce type de structure. Dans le chapitre 3.3 nous allons présenter les critères de dimensionnement des dissipateurs à auge.

Il existe une variante de ce type de dissipateur (figures 2.3 et 2.9) qui possède un seuil denté (slotted-bucket). Il présente des problèmes de cavitation autour des déflecteurs lorsque la vitesse de l'écoulement est supérieure à 15 m/s (U.S.B.R. [1987]).

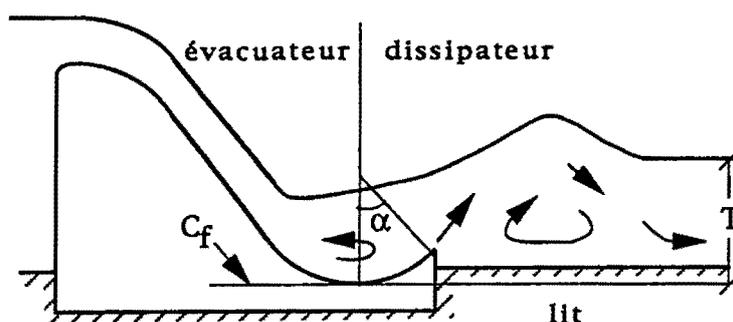


Fig. 2.9 - Dissipateur à auge

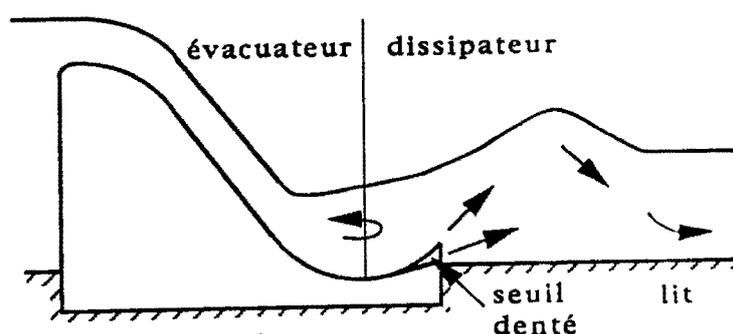


Figure 2.10 - Dissipateur à auge avec seuil denté (slotted bucket)

Note: Cette structure avec seuil denté ne sera pas étudiée dans ce travail en raison de sa géométrie et son comportement qui sont différents.

2.6.4 Rampe ascendante

Nous pouvons considérer que ce type de dissipateur est une variante du dissipateur à auge, mais avec une rampe ayant une inclinaison constante. La figure 2.11 montre un schéma de cette structure. L'angle de sortie (α) est plus petit que celui d'un dissipateur à auge mais sa longueur est plus grande. Dans le chapitre 3.4 nous allons présenter les critères de dimensionnement de ce type de structure.

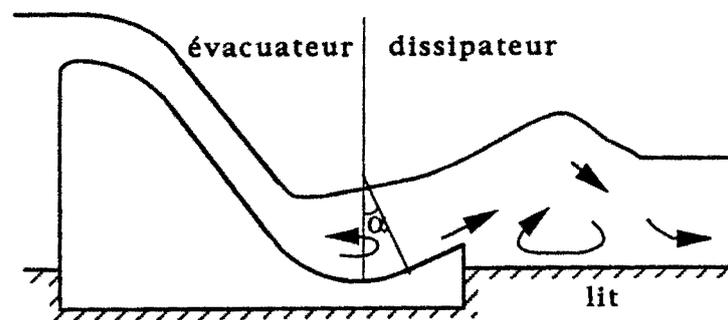


Fig. 2.11 - Dissipateur de type rampe ascendante

CHAPITRE III

LES DISSIPATEURS À AUGES ET À RAMPE ASCENDANTE

3.1 Introduction

Un des objectifs de ce travail de recherche est d'étudier le fonctionnement des dissipateurs à auge et à rampe ascendante, tel que schématisé à la figure 3.1.

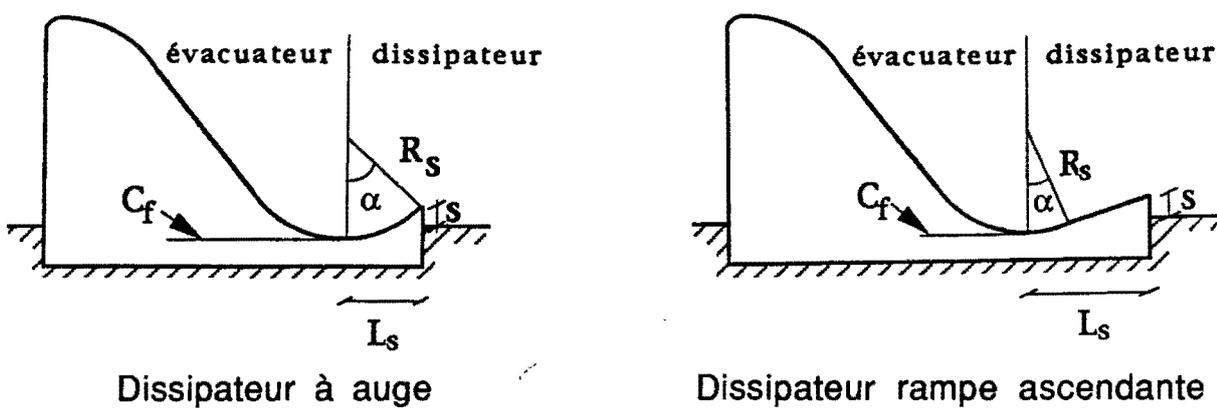


Fig. 3.1 - Dissipateurs étudiés

Les deux types de dissipateurs possèdent les mêmes paramètres géométriques suivants:

- a) rayon (R_s);
- b) angle de sortie (α);
- c) cote de fond (C_f);
- d) hauteur de sortie (s);
- e) longueur de la structure (L_s).

3.2 Considérations sur les conditions limites

Comme ces deux structures font partie de la même classe (groupe), nous allons considérer le dissipateur à auge comme étant le cas limite de la structure à rampe ascendante pour un certain rayon (R_s). La condition de limite extrême de ces structures s'obtient lorsqu'il n'y a plus de dissipateur en aval de l'évacuateur. C'est la situation où l'angle de sortie (α), la longueur (L_s) et la hauteur de sortie (s) sont alors nuls. Le rayon n'entre plus en ligne de compte. De cette façon on obtient la structure montrée à la figure 3.2. Dans ce cas, toute la dissipation se produit dans la masse d'eau et sur le radier. Au départ, lorsque l'érosion n'est pas encore commencée, la dissipation s'effectue par la formation d'un ressaut hydraulique.

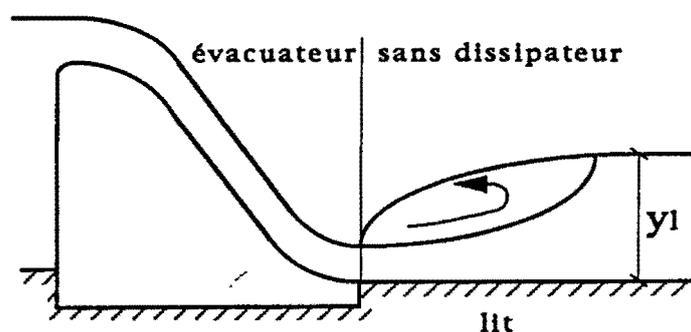


Fig. 3.2 - Condition limite des dissipateurs à auge et à rampe ascendante

Les relations qui existent entre la courbe de tarage du canal ou de la rivière et les hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique sont bien expliquées par différents auteurs, dont U.S.B.R. [1987], Chow [1985], French [1987]. La position du ressaut est fonction du niveau d'eau aval. Nous nous intéressons en ce moment à l'analyse d'un cas générique d'écoulement. En résumé, il peut y avoir trois (3) possibilités: le ressaut apparaît loin en aval de l'évacuateur (remous et ressaut) ou au pied de l'évacuateur (ressaut libre) ou sur l'évacuateur (ressaut noyé). La figure 3.3 présente la forme du ressaut hydraulique pour les trois cas. Elle montre aussi le type d'érosion qui risque de se produire. La longueur et la profondeur de l'érosion sont inversement proportionnelles à la hauteur d'eau en aval.

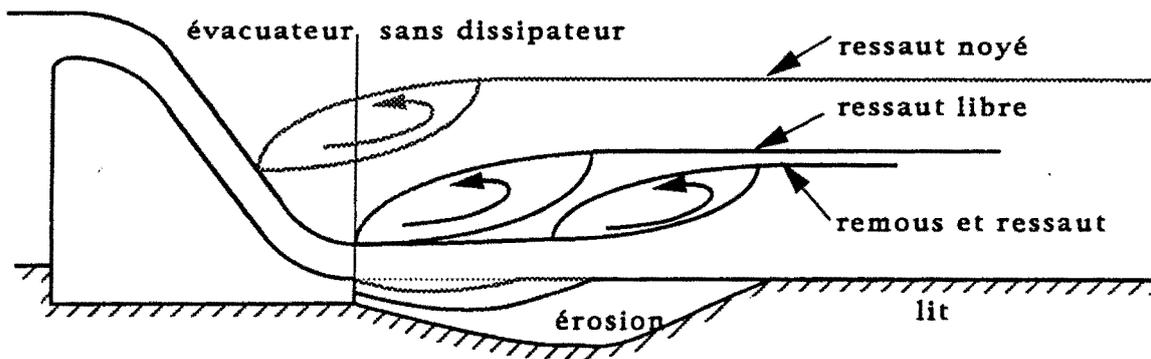


Fig. 3.3 - Position du ressaut hydraulique

Par la condition de ressaut libre, le phénomène ressemble à l'écoulement associé à un dissipateur de bassin de type I, avant érosion. Cette structure est caractérisée par la formation d'un ressaut hydraulique libre en aval de l'évacuateur. Elle peut être décrite comme un simple prolongement horizontal de l'évacuateur sur une cote de fond appropriée ($y_1=f(y_r, Fr_r)$), après le rayon de concordance (figure 3.4). C'est la structure la plus étudiée et elle présente aussi le plus grand consensus sur son dimensionnement. Il est donc important d'étudier cette géométrie de structure parce qu'elle représente la situation sans dissipateur et elle est aussi le cas limite de la géométrie des dissipateurs à auge et rampe ascendante.

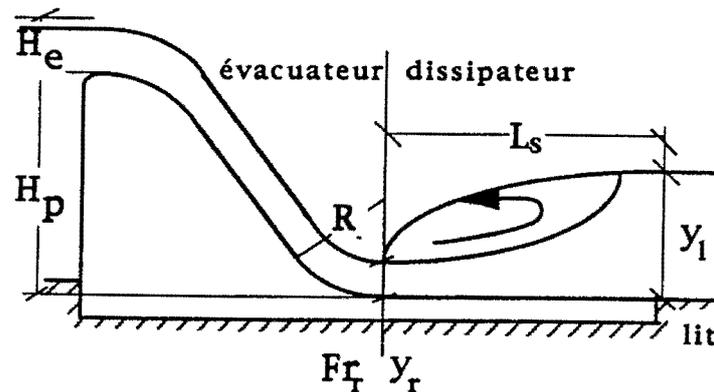


Fig. 3.4 - Bassin de type I

Pour le calcul du rayon minimum de la courbe de concordance (R_1) entre l'évacuateur et la structure de dissipation il existe plusieurs formules. Nous pouvons citer, entre autres, celles proposées par Bandini [1959], Grishin [1982], Chow [1985] et French [1987] (tableau 3.1).

Auteur	Formule
Chow [1985] *	$R_1 = 10 \left(\frac{v_m + 6,4H_m + 16}{3,6H_m + 64} \right)$
French [1987]	$R_1 = 4,0 y_r$
Bandini [1959]	$R_1 = \sqrt{H_p(H_m - H_p)}$
Grishin [1982]	$R_1 = C H_e$ $0,2 \leq C \leq 0,5$

* unité en pied (système anglais)

Tab. 3.1 - Rayon de concordance avec l'évacuateur

où

C = coefficient;

H_e = charge totale sur la crête de l'évacuateur;

H_p = hauteur de la crête de l'évacuateur par rapport au radier de la structure de dissipation;

H_m = $H_p + H_e$ = charge totale sur le fond de la structure;

R_1 = rayon de concordance avec l'évacuateur et

v_m = vitesse de l'écoulement à l'entrée de la structure.

L'angle de tangence entre le profil de l'évacuateur et le rayon de concordance est fonction de la forme de l'évacuateur. Lorsque la concordance est faite directement à un profil Creager, il est commun d'utiliser un angle de 55°. Le point de tangence entre l'évacuateur et le dissipateur doit se situer à 0,33 H_e en bas de la crête de l'évacuateur.

La longueur de la structure (L_s) est définie selon la longueur du ressaut hydraulique (L_n) et selon la résistance du lit.

3.3 La dissipation d'énergie dans un ressaut hydraulique

L'écoulement dans les canaux découverts peut être caractérisé par le nombre de Froude (Fr), qui représente la relation entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle de l'écoulement (équation 3.1).

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g y}} \quad (3.1)$$

où

v = vitesse moyenne de l'écoulement;

g = accélération gravitationnelle;

y = profondeur d'eau de l'écoulement.

En fonction de la valeur du nombre de Froude, nous pouvons noter les conditions d'écoulement suivantes:

- a) Fr = 0: masse liquide en repos (v=0),
- b) Fr < 1,0: écoulement fluvial où la vitesse est relativement faible;
- c) Fr = 1: écoulement critique où la vitesse est égale à vitesse critique (v=v_c) et
- d) Fr > 1,0: écoulement torrentiel où la vitesse est élevée.

Le ressaut hydraulique provoque une perte d'énergie appréciable. Cette capacité dissipatrice est fréquemment utilisée en aval des évacuateurs

pour transformer l'écoulement torrentiel ($Fr > 1$) en écoulement fluvial ($Fr < 1$) compatible aux conditions du canal. Il est l'un des phénomènes hydrauliques les plus complexes. L'écoulement à l'intérieur de celui-ci est fortement varié et instable. Le ressaut est caractérisé par des effets de turbulence importants, qui mènent à des efforts appréciables sur le fond du canal. De plus, le phénomène d'entraînement d'air associé à l'écoulement complique l'étude du ressaut.

Les connaissances actuelles sur le ressaut hydraulique ne sont pas encore suffisamment étendues pour que l'écoulement interne soit parfaitement compris. Par contre, en ce qui concerne le phénomène dans son ensemble, des approches simplifiées permettent d'analyser les caractéristiques les plus importantes. En particulier, un ressaut hydraulique peut être décrit par ses hauteurs d'eau conjuguées et sa longueur.

3.3.1. Classification des ressauts hydrauliques

Essentiellement, le ressaut est classifié selon la configuration qu'il présente. Chacune de ces classes correspond à une plage de valeurs du nombre de Froude (Fr_r), mesuré à l'entrée du ressaut, tel que représenté à la figure 3.5. Il est important de noter que la perte d'énergie varie selon les hauteurs conjuguées et que les limites entre chacune des plages peuvent être légèrement différentes selon les auteurs (Peterka [1957]; Sinninger et Hager [1989], entre autres). La classification de Sinninger et Hager [1989] est la suivante:

- a) Pour $1,0 < Fr_r \leq 1,7$, un ressaut ondulé apparaît. La transition entre l'écoulement torrentiel et l'écoulement fluvial est graduelle et caractérisée par des ondulations à la surface de l'eau. Les pertes de charge sont faibles et elles sont essentiellement dues au frottement sur le radier du canal.
- b) Pour $1,7 < Fr_r \leq 2,5$, nous observons un ressaut faible. La surface du ressaut est encore ondulée mais elle présente des

- zones de séparation. La dissipation d'énergie est encore faible et c'est pour cette raison que le domaine $1,0 < Fr_r \leq 2,5$ est normalement exclus des ressauts hydrauliques proprement dits.
- c) Pour $2,5 < Fr_r \leq 4,5$, il se produit un ressaut oscillant dans lequel l'écoulement est pulsatif. Chaque pulsation produit une vague de période irrégulière qui se prolonge en aval sur une longue distance. Le ressaut hydraulique, dans cette plage de nombre de Froude, n'offre pas une bonne efficacité.
- d) Pour $4,5 < Fr_r \leq 10,0$, nous observons un ressaut stable. Ses caractéristiques sont clairement définies et bien localisées. Environ 50% à 70% de l'énergie de l'écoulement à l'entrée du ressaut est dissipée sous la forme de turbulence (figure 3.7).
- e) Pour $Fr_r > 10$, un ressaut fort apparaît. Les efforts provoqués par le ressaut sont élevés. L'entraînement d'air est alors tellement important que l'écoulement prend l'allure d'une masse blanche et uniforme avec une forte ondulation de la surface en aval.

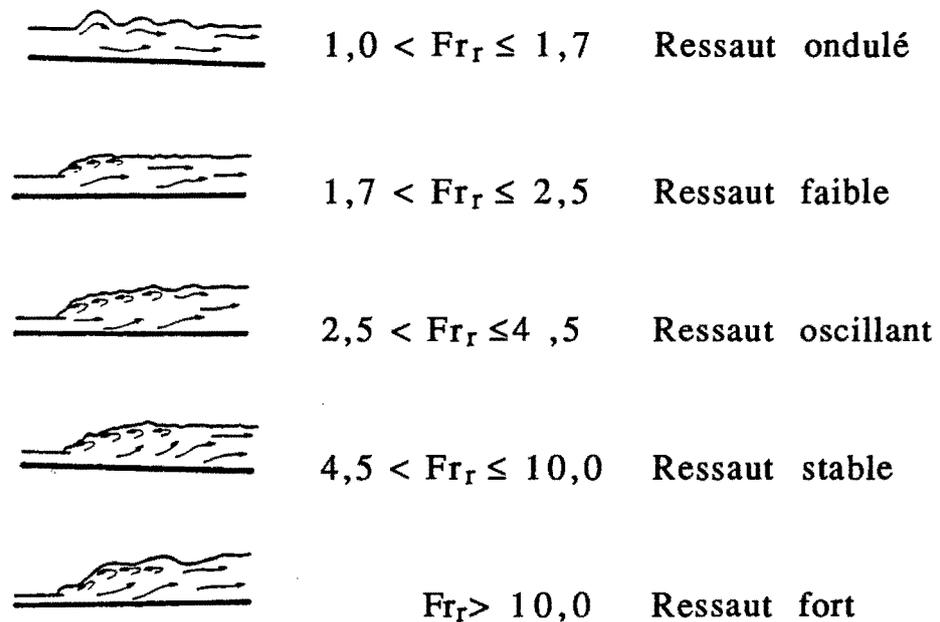


Fig. 3.5 - Classification des ressauts hydrauliques -
Sinninger et Hager [1989]

Le domaine d'utilisation du ressaut dans les dissipateurs d'énergie hydrauliques correspond, d'une façon générale, à un nombre de Froude (Fr_r) compris entre 3,0 et 10,0.

3.3.2 Perte de charge dans un ressaut hydraulique

Le ressaut hydraulique produit toujours une réduction de vitesse et l'écoulement passe de torrentiel à fluvial. De plus, il est accompagné de mouvements très turbulents (photo 3.1) et d'instabilités à la surface (ondulation et entraînement d'air) qui sont très complexes et dépendent fortement des conditions à l'entrée de l'écoulement (Resch et Leutheusser [1972]). La figure 3.6 montre schématiquement la perte d'énergie (ΔH^*) dans un ressaut hydraulique.

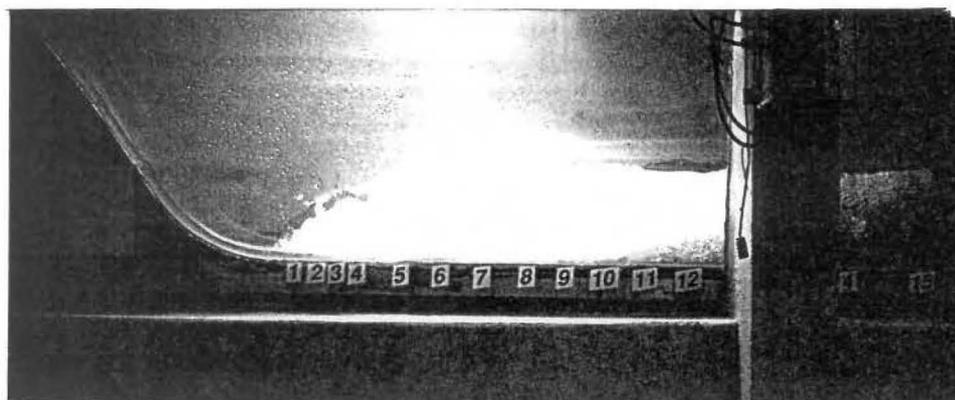


Photo 3.1 - Ressaut hydraulique ($Fr_r=8,1$ ou $Fr=6,4$)

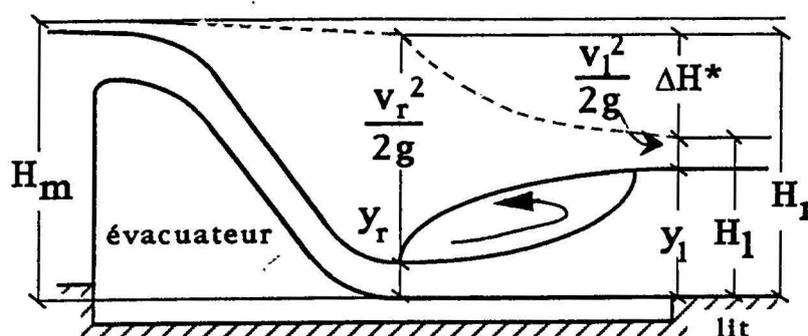


Fig. 3.6 - Schéma de la perte d'énergie dans un ressaut hydraulique

Le théorème de Bernoulli nous permet de calculer la perte d'énergie totale.

$$\Delta H^* = H_r - H_l = \left(y_r + \frac{v_r^2}{2g} \right) - \left(y_l + \frac{v_l^2}{2g} \right) \quad (3.2)$$

Après transformation, cette expression devient:

$$\Delta H^* = \frac{(y_l - y_r)^3}{4y_r y_l} \quad (3.3)$$

La théorie classique définit l'efficacité (rendement) du ressaut comme la relation entre l'énergie perdue (ΔH^*) et l'énergie amont (H_r), on obtient donc:

$$\eta_{\%} = \frac{\Delta H^*}{H_r} \quad (3.4)$$

La figure 3.7 nous montre que si le nombre de Froude augmente, l'efficacité augmente aussi (Peterka [1957]), mais plus lentement après un nombre de Froude de 12 (courbe asymptotique).

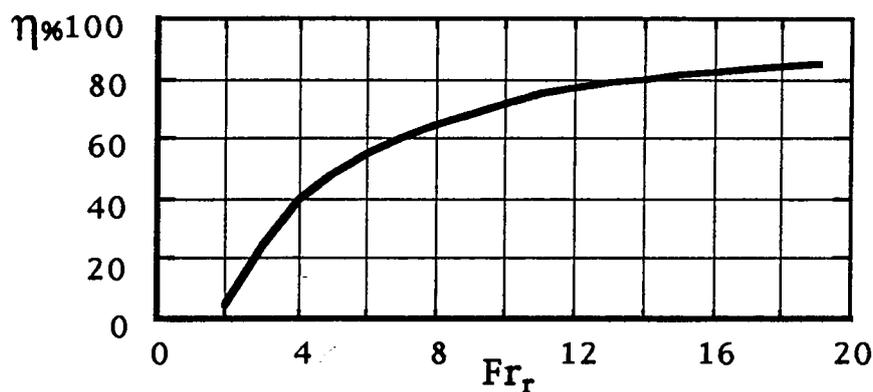


Fig. 3.7 - Efficacité du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude

Drapeau, Marques et Verrette [1995] ont montré que l'on pouvait associer la perte de charge avec la fluctuation de pression dans le ressaut hydraulique. De cette façon, nous pouvons connaître la valeur de la perte de charge en chaque point du ressaut, indépendamment du nombre de Froude en fonction de la position relative du point (figure 3.8).

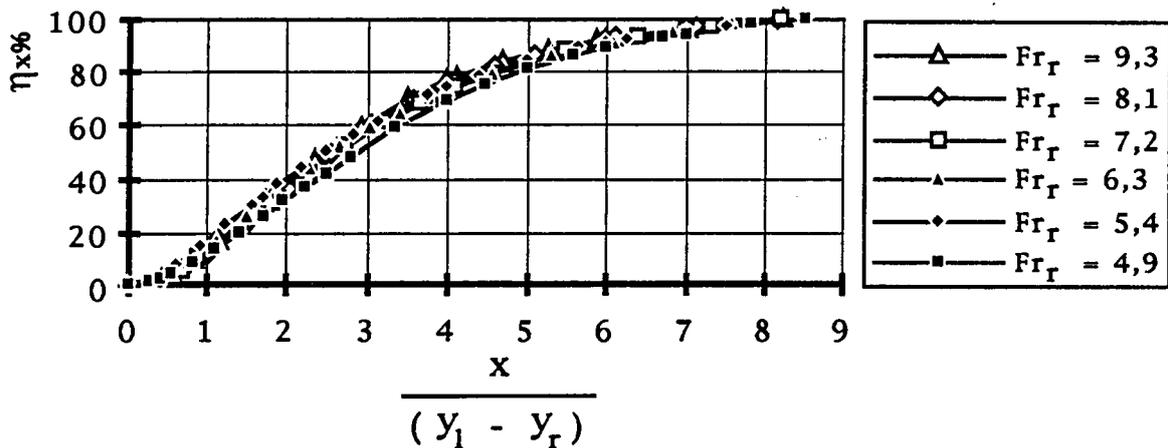


Fig. 3.8 - Pourcentage de l'énergie perdue à l'intérieur d'un ressaut hydraulique - Drapeau, Marques et Verrette [1995]

$$\eta_{x\%} = \frac{h_{tx}}{\Delta H^*} \quad (3.5)$$

et

$$L_n = 8,5 (y_1 - y_r) \quad (3.6)$$

$\eta_{x\%}$ = relation en % entre la perte de charge partielle au point x et la perte de charge totale à la fin du ressaut hydraulique;

h_{tx} = perte de charge partielle au point x;

ΔH^* = perte de charge due au ressaut hydraulique;

L_n = limite de l'influence du ressaut hydraulique;

y_1 = hauteur conjuguée lente;

y_r = hauteur conjuguée rapide.

3.3.3 Hauteurs conjuguées

Les profondeurs amont et aval du ressaut sont appelées hauteur conjuguée rapide (y_r) et hauteur conjuguée lente (y_l). La différence entre ces deux hauteurs ($y_l - y_r$) est nommée la hauteur du ressaut (figures 3.6 et 3.9). Étant donné que l'on ne connaît pas la perte d'énergie dans le ressaut, on ne peut pas utiliser le théorème de Bernoulli (équation 3.2) pour déterminer ces hauteurs. Cependant, nous pouvons utiliser l'équation de quantité de mouvement (équation 3.7).

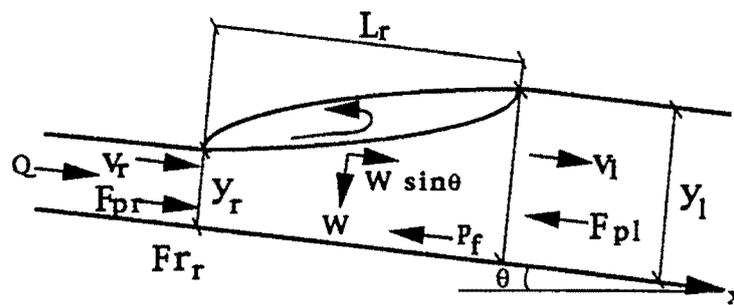


Fig. 3. 9 - Ressaut dans un canal à fond incliné

$$\Sigma F_{px} = F_{pr} + W \sin \theta - F_{pl} - F_f - P_f = \frac{g}{g} Q (\beta_l v_l - \beta_r v_r) \quad (3.7)$$

où

ΣF_{px} = sommation des forces selon la direction x ;

F_{pr} et F_{pl} = composantes, selon l'axe x , de la pression qui agit sur les sections d'entrée et de sortie;

γ = poids volumique du fluide;

W = poids total du fluide entre les sections d'entrée et de sortie;

$$W = \frac{\gamma_s \gamma (y_r + y_l)}{2} L_r \quad (3.8)$$

θ = angle d'inclinaison du canal;

γ = poids volumique du fluide;

F_f = force de frottement sur les parois et sur le fond ≈ 0 (hypothèse);

P_f = composante horizontale de la force entre les sections d'entrée et de sortie;

Q = débit;

g = accélération gravitationnelle;

v_1 et v_r = vitesse moyenne dans les sections d'entrée et de sortie;

ϕ_s = facteur de forme $\leq 1,0$;

L_r = longueur du rouleau;

y_r et y_1 = hauteur d'eau à l'entrée et à la sortie.

En solutionnant l'équation de quantité de mouvement pour les sections d'entrée et de sortie du ressaut, nous pouvons trouver les équations 3.9 et 3.10 qui donnent, pour un canal horizontal à fond plat, le rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude de l'écoulement. Ces équations sont connues sous l'appellation "équation(s) de Bélanger".

$$\frac{y_1}{y_r} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_r^2} - 1 \right) \quad (3.9)$$

$$\frac{y_r}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \quad (3.10)$$

où

$$Fr_r = \frac{v_r}{\sqrt{g y_r}}; \quad (3.11)$$

$$Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g y_1}}; \quad (3.12)$$

Fr_r et Fr_1 = nombres de Froude à l'entrée et à la sortie du ressaut.

Lorsque le fond du canal est incliné (figure 3.9), la correspondante du poids de l'eau ($W \sin \theta$) doit être prise en considération (équation 3.7). Ainsi le rapport des profondeurs conjuguées se calcule à l'aide de l'équation 3.13 (Ragu [1981]).

$$\frac{y_1}{y_r} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8\chi_{Rh}^2 Fr_r^2} - 1 \right) \quad (3.13)$$

où

$$\chi_{Rh} = 10^{0,027\theta}; \quad (3.14)$$

χ_{Rh} = coefficient empirique de Rajaratnam [1965];

θ = l'angle du fond du canal en degrés.

Chow [1985], a présenté la formulation suivante:

$$\frac{y_1}{y_r} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8G_\theta^2} - 1 \right) \quad (3.15)$$

où

$$G_\theta = \frac{F_\theta}{\sqrt{\cos \theta - K_{rj} \frac{\sin \theta}{(y_1 - y_r)}}} \quad (3.16)$$

$$F_\theta = \frac{v_r}{\sqrt{g y_r \cos \theta}} \quad (3.17)$$

K_{rj} = coefficient

Bhutto, Mirani et Chandio [1989] ont présenté un bon résumé des formules utilisées pour calculer les hauteurs conjuguées, en considérant la force de frottement, pour des ressauts hydrauliques dans des canaux rectangulaires horizontaux et inclinés.

D'autre part, McCorquodale et Mohamed [1994] ont présenté aussi des formules (équations 3.18 et 3.19) pour le calcul des différents paramètres d'un ressaut dans un canal en contre-pente. Ces formules sont basées sur l'équation 3.7 (figure 3.9).

$$\frac{y_1}{y_r} = 1 + \frac{Fr_r}{3} \quad (3.18)$$

et

$$\frac{L_{r\theta}}{y_r} = (C_0 + C_1 \sin \theta + C_2 \sin^2 \theta) (Fr_r - 2) + D_1 (1 + D_2 \sin^4 \theta) \quad (3.19)$$

où

Fr_r = nombre de Froude à l'entrée du canal;

$L_{r\theta}$ = longueur du ressaut en contre-pente;

θ = angle du fond du canal;

y_1 = profondeur normale sur le fond du canal à la fin du ressaut;

y_r = profondeur normale sur le fond du canal à l'entrée du ressaut et

$C_0; C_1; C_2; D_1; D_2$ = coefficients (tableau 3.2)

Froude (Fr_r)	C_0	C_1	C_2	D_1	D_2
$Fr_r \leq 9$	7,25	20,8	5	5,0	50
$9 \leq Fr_r \leq 13$	7,20	21,0	19	7,7	175

Tab. 3.2 - Coefficients de l'équation de McCorquodale et Mohamed [1994]

3.3.4 Longueur du ressaut hydraulique

La longueur du ressaut sur un fond horizontal est un paramètre extrêmement difficile à évaluer avec précision. La définition même de la "longueur" ne fait pas l'unanimité entre les différents chercheurs (figure 3.10). Elle est définie comme étant la distance mesurée entre l'endroit où commence la surélévation du niveau d'eau, jusqu'au point où elle se termine, soit:

- La fin du rouleau (L_r) où la hauteur et la pression d'eau atteignent environ 95% de la hauteur conjuguée lente (y_1), selon Peterka [1957], Rajaratnam [1965], Lopardo [1986], entre autres.
- La fin de l'influence de la dissipation (L_n) où la hauteur et la pression (en hauteur d'eau) sont égales à celle du canal (y_n), selon Elevatorski [1959], Maestri et Marques [1991], Drapeau, Marques et Verrette [1995], entre autres.

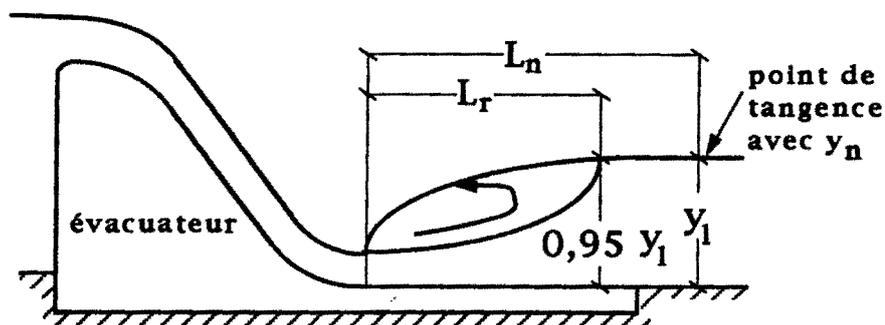


Fig. 3.10 - Longueur du ressaut hydraulique

Dans ce travail, nous considérons la longueur du ressaut comme la distance mesurée entre le début du ressaut et l'endroit où l'influence de la dissipation d'énergie (L_n) se termine. Plusieurs auteurs ont déjà étudié et proposé des expressions et des graphiques permettant de déterminer cette longueur. Elevatorski [1959], Bhutto, Mirani et Chandio [1991] et Drapeau [1995] ont fait un bon résumé de tous ces critères. Si nous comparons les résultats provenant de l'utilisation de ces critères nous pouvons trouver des écarts approximatifs de 50%.

En utilisant la fluctuation de pression, Drapeau, Marques et Verrette [1995] ont déterminé que la différence entre la longueur mesurée à la fin du rouleau (équations 3.21) et celle mesurée à la fin de l'influence de la dissipation provoquée par le ressaut hydraulique (équations 3.22) est d'environ 30%. Ils ont également trouvé que la perte d'énergie à la fin du rouleau correspondait approximativement à 90% de la perte d'énergie totale (ΔH^*) engendrée par le ressaut (figure 3.7).

$$L_r = 6,0 (y_1 - y_r) \quad (3.21)$$

$$L_n = 8,5 (y_1 - y_r) \quad (3.22)$$

La longueur du ressaut (L_n) est utilisée pour déterminer la longueur du dissipateur. Les critères de conception les plus utilisés sont ceux suggérés par Elevatorski [1959] (équation 3.23) et Peterka [1957] (figure 3.11).

$$L_r = 6,9 (y_1 - y_r) \quad (3.23)$$

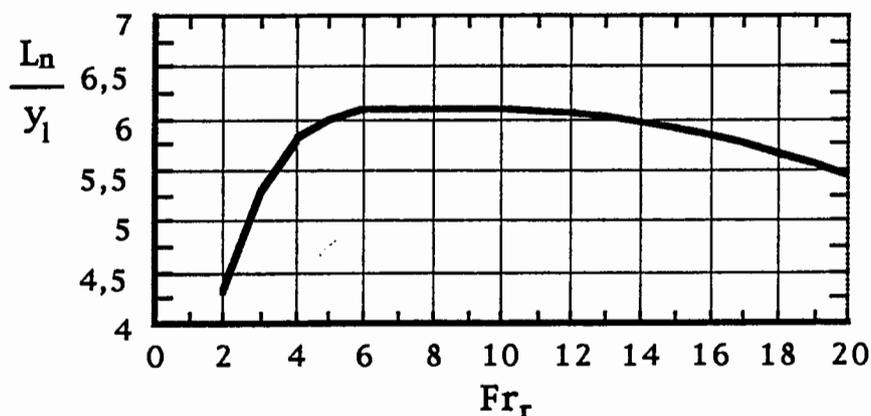


Fig. 3.11 - Longueur du ressaut hydraulique - Peterka [1957]

Elevatorski [1959] a recommandé l'utilisation d'une longueur minimale de conception égale à la longueur du ressaut hydraulique lorsque le lit rocheux est fracturé. Lorsque le lit n'est pas fracturé, il suggère une longueur minimale de 60% de la longueur du ressaut, ce qui représente approximativement l'endroit où l'écoulement commence à décoller du fond (L_d - figure 3.12).

Drapeau, Marques et Verrette [1995] ont montré qu'il est possible de déterminer les points caractéristiques du ressaut (figure 3.12) par les relations indiquées dans le tableau 3.3. Ce tableau indique aussi la valeur approximative de la perte de charge pour chacun de ces endroits.

Représentation	Position	Perte
Fin de l'influence du ressaut	$L_n = 8,5 (y_l - y_r)$	100 %
Fin du rouleau	$L_r = 6,0 (y_l - y_r)$	≈90 %
Endroit où l'écoulement décolle	$L_d = 4,0 (y_l - y_r)$	≈75 %

Tab. 3.3 - Caractéristiques du ressaut hydraulique et distribution de la perte de charge le long du ressaut (Drapeau, Marques et Verrette [1995])

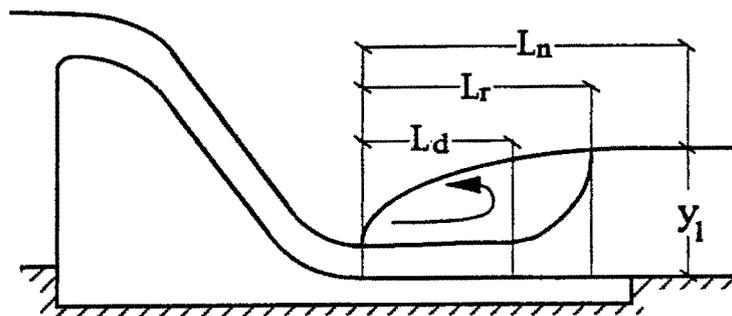


Fig. 3.12 - Caractéristiques du ressaut hydraulique

3.4 La dissipation d'énergie dans un dissipateur à auge

Le dissipateur à auge (roller bucket) est une structure compacte (figure 3.13 et photo 3.2). Elle consiste, en une coquille possédant un rayon (R_s) de concordance uniforme ainsi qu'un angle de sortie (α), situé entre 30° et 45° .

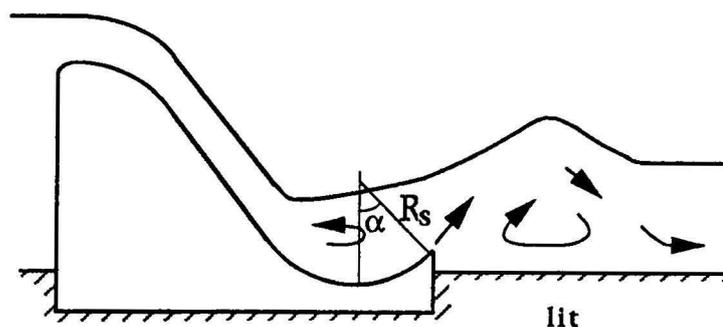


Fig. 3.13 - Dissipateur à auge (roller bucket)

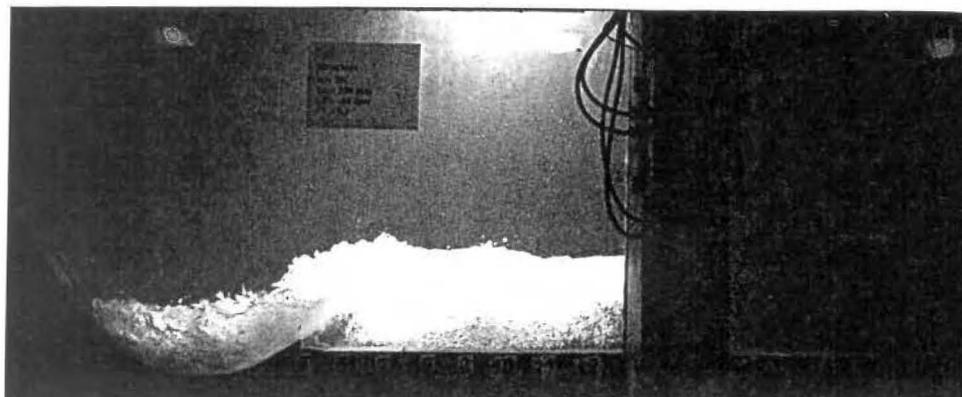


Photo 3.2 - Dissipateur à auge (roller bucket)

Avec ce type de structure, la majeure partie de la dissipation se produit en aval de celle-ci, dans la masse d'eau ainsi que sur le lit du canal. Son fonctionnement est caractérisé par la formation de rouleaux en aval du bassin dissipateur. Un premier rouleau est situé sur la surface de l'auge et tourne dans le sens antihoraire au dessus de la veine de l'écoulement. Un second est situé immédiatement en aval de la structure, près du

radier, il tourne dans le sens horaire. Un troisième est situé en aval de l'intumescence et il tourne dans le sens antihoraire.

Le deuxième rouleau a tendance à ramasser les matériaux meubles près de la structure et, de cette façon, il la protège contre le déchaussement. Cependant, s'il se produit une opération asymétrique des vannes de l'évacuateur et si la hauteur de sortie de la structure est basse, ce rouleau peut même entraîner les matériaux à l'intérieur de l'auge. Ces matériaux peuvent alors endommager la surface de béton s'ils ne sont pas évacués rapidement. Ces problèmes peuvent être résolus avec une certaine facilité en utilisant des "septums" (murs) qui divisent le dissipateur en groupes de vannes. Lorsque le dissipateur ne possède pas de "septums", nous devons suivre à la lettre les instructions du manuel d'opération des vannes, qui est généralement obtenu en fonction des résultats sur un modèle hydraulique. Ces instructions se résument de la façon suivante:

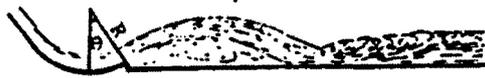
- a) commencer l'ouverture par les vannes centrales;
- b) avoir une différence entre les ouvertures de vannes voisines égales ou inférieures à 50 cm;
- c) ouvrir les vannes de façon symétrique.

La figure 3.14 présente les divers comportements du dissipateur à auge par rapport au niveau d'eau aval, chacun des ces comportements a été décrit par Zhiheng [1988] comme suit:

- Cas A - jet libre: lorsque le niveau d'eau aval est trop bas, la structure fonctionne comme une auge non submergée (flip bucket).
- Cas B - jet presque libre: lorsque le niveau d'eau aval augmente un peu, le jet commence à être freiné par la masse d'eau en aval, mais la structure fonctionne encore comme une auge non submergée (flip bucket).
- Cas C - limite pour la submersion: en augmentant plus le niveau d'eau aval, il se produit alors la formation d'une surélévation à la

sortie de l'auge. Une légère variation du niveau d'eau en aval est cependant suffisante pour transformer l'écoulement selon les cas B ou D.

- Cas D - submersion de l'auge: c'est la situation où il y a submersion de la structure; dans ce cas elle commence à fonctionner comme une auge submergée.
- Cas E - écoulement stable: c'est la situation où la structure présente vraiment les caractéristiques du dissipateur à auge.
- Cas F - rouleau submergé: en fonction de l'augmentation du niveau d'eau en aval, la surélévation à la sortie de l'auge diminue;
- Cas G - rouleau suffoqué: c'est la situation où l'on n'observe plus les caractéristiques de fonctionnement d'un dissipateur à auge, il faut alors utiliser un autre type de dissipateur.



Cas A - jet libre



Cas B - jet presque libre



Cas C - limite pour la submersion



Cas D - submersion de l'auge



Cas E - écoulement stable



Cas F - rouleau submergé



G - rouleau suffoqué

Fig. 3.14 - Fonctionnement d'une structure à auge (Zhiheng [1988])

Peterka [1957] a classifié le comportement du dissipateur à auge avec seuil denté (figure 2.7) en quatre cas semblables à ceux vus ci-dessus (cas A, C, D et E). Ce type de dissipateur a été adopté pour les barrages de faible chute de façon à éviter les problèmes de cavitation sur les déflecteurs. Pour les cas de chutes moyennes et hautes, l'auge lisse est utilisée. Cependant, il existe aujourd'hui une tendance à utiliser l'auge submergée lisse dans tous les cas.

Rajan et Rao [1980] ont présenté un résumé des barrages qui opèrent avec ce type de dissipateurs, ainsi que leurs caractéristiques de fonctionnement.

Schreiber [1978] et BCOLD [1981] ont indiqué quelques autres barrages qui ont eu recours à l'auge au Brésil.

3.4.1 Les paramètres de base d'un dissipateur à auge

Dans notre étude, nous allons faire référence aux paramètres de la figure 3.15.

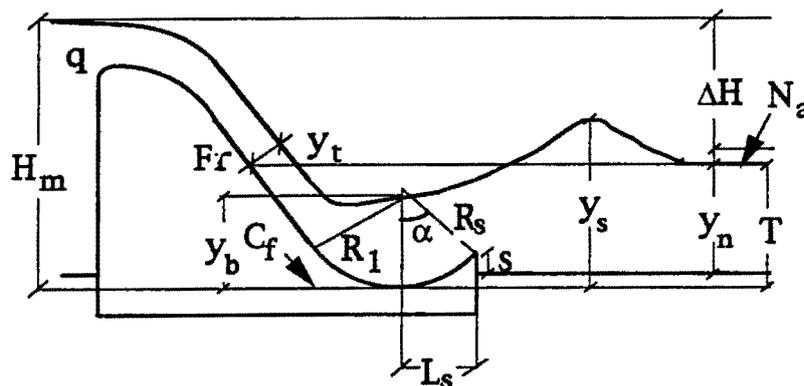


Fig. 3.15 - Paramètres de base du dissipateur à auge

où

C_f = cote de fond du dissipateur;

Fr = nombre de Froude mesuré à l'amont à l'entrée du dissipateur;

- H_m = charge totale sur le fond de la structure;
 ΔH = différence d'énergie entre amont et aval de la structure;
 L_s = longueur de la structure;
 N_a = niveau d'eau en aval;
 q = débit spécifique;
 R_1 = rayon de concordance avec l'évacuateur;
 R_s = rayon de concordance de la structure;
 s = hauteur de sortie de la structure par rapport au radier du canal;
 T = calage du fond de l'auge par rapport au niveau d'eau en aval (N_a);
 y_b = profondeur d'eau mesurée entre le fond de l'auge et la surface du rouleau;
 y_n = profondeur d'eau à la fin de la dissipation;
 y_s = profondeur de l'onde stationnaire provoquée par la sortie du jet de l'auge par rapport au fond de la structure;
 y_t = profondeur de l'eau à l'entrée du dissipateur, mesurée à la hauteur du niveau aval;
 α = angle de sortie de la structure.

3.4.2 Le dimensionnement d'un dissipateur à auge

En 1933, le "Bureau of Reclamation" (U.S.B.R.) a développé le dissipateur à auge (figure 3.13) pour le barrage de Grande Coulée avec l'aide de modèles hydrauliques.

Le dimensionnement d'une auge peut se faire de différentes façons, selon les auteurs consultés, mais nous devons au préalable déterminer les paramètres suivants (figure 3.15):

- a) rayon minimal (R_s) et/ou longueur minimale (L_s);
- b) cote de fond (C_f);
- c) cote de sortie (C_s) ou hauteur de sortie(s);
- d) angle de sortie (α).

L'expérience indique que l'auge fonctionne bien lorsque le calage du fond de l'auge (T) par rapport au niveau d'eau en aval (N_a) est d'au moins 10% supérieure à la hauteur conjuguée lente (y_1). Donc, le bon fonctionnement hydraulique de ce type de structure sera obtenu lorsque le degré de submersion (D_s) est supérieur ou égal à 1,1 (équation 3.24) et quand l'angle de sortie (α) sera approprié. Cela permet de calculer la cote de fond de la structure par l'équation 3.25.

$$D_s = \frac{T}{y_1} \geq 1,1 \quad (3.24)$$

$$C_f = N_a - T \quad (3.25)$$

Les premiers chercheurs à étudier ce type de structure ont été Warnock (d'après Rajan et Rao [1980]), Gandolfo et Cotta [1955], Peterka [1957], McPherson et Karr [1957], Daughatry [1958] et Elevatorski [1959]. Ils ont limité leurs recherches à des structures possédant un angle de sortie de 45° et leurs travaux ont été utilisés comme référence par le U.S.B.R. [1985] et le U.S. Army [1957].

En 1936, Warnock, d'après Rajan et Rao [1980], a analysé le mécanisme de fonctionnement des dissipateurs à auge à partir des études faites pour le projet du barrage de Grande Coulée.

En 1948, Tiffany, d'après Rajan et Rao [1980], a conclu que, pour avoir un bon fonctionnement, le calage du fond de l'auge (T) doit se situer entre les valeurs données par l'équation 3.26.

$$0,95 \leq \frac{T}{y_1} \leq 1,3 \quad (3.26)$$

Gandolfo et Cotta [1955 et 1957] ont étudié deux formes d'auges non circulaires; une parabolique et une sinusoïdale. Ils ont conclu qu'il n'y a pratiquement pas de différence entre le fonctionnement de ces deux formes de structures.

D'après, McPherson et Karr [1957], pour avoir la submersion de la structure, l'angle de sortie doit faire 45° et respecter la relation suivante:

$$\frac{y_b}{T} \geq 0,2 \quad (3.27)$$

Leurs travaux ont été utilisés comme référence pour les critères proposés par le "U.S. Army Corps of Engineers" (U.S.Army [1975]). Deux graphiques sont présentés par eux (figure 3.16). Un graphique pour déterminer la profondeur d'eau sur l'auge (y_b) pour le dimensionnement de la hauteur des murs latéraux et un autre pour calculer la profondeur de l'onde stationnaire provoquée par la sortie du jet de la coquille (y_s). Ces paramètres sont donnés par les relations suivantes:

$$\frac{y_b}{y_t} = f\left(\frac{q}{\sqrt{g y_t^3}}; T\right) \quad (3.28)$$

$$\frac{y_s}{y_t} = f\left(\frac{q}{\sqrt{g y_t^3}}; T\right) \quad (3.29)$$

où

g = accélération gravitationnelle;

q = débit spécifique;

Les travaux de McPherson et Karr [1957] ne permettent pas de tirer des conclusions sur le rayon, parce qu'ils se limitent simplement à la plage des valeurs essayées. Cependant, ils recommandent de faire des essais sur un modèle hydraulique pour vérifier son fonctionnement et s'assurer que l'équation suivante est satisfaite:

$$\frac{q}{\sqrt{g y_t^3}} \geq 0,2 \quad (3.30)$$

Également, ils soulignent que la cote du lit près de la sortie de la structure n'a pas d'influence sur le fonctionnement de la structure.

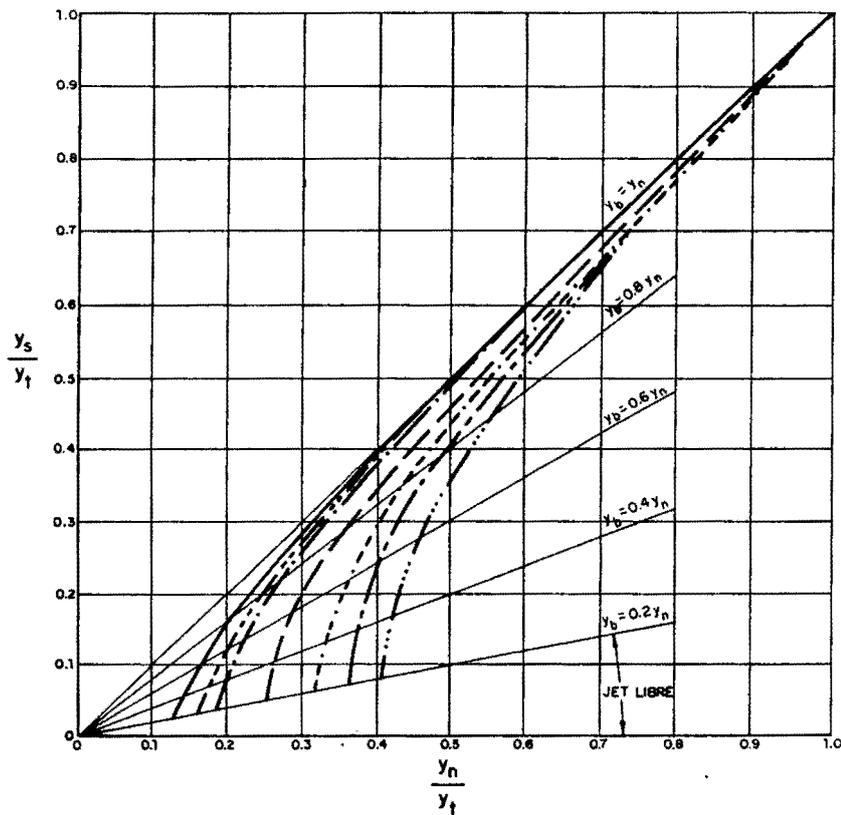
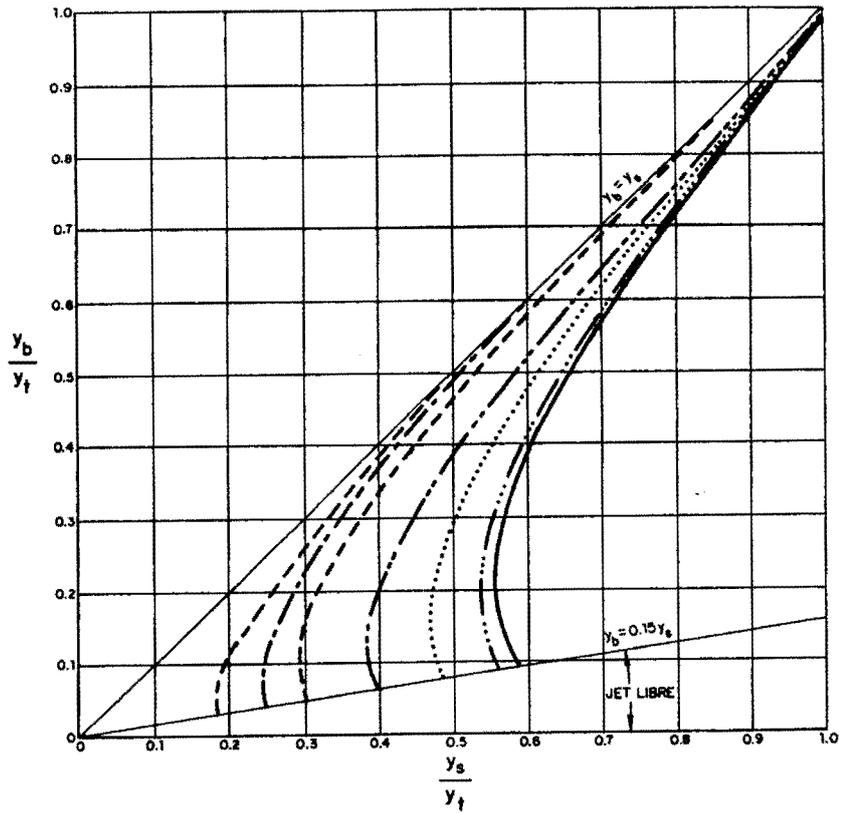


Fig. 3.16 - Profondeur du rouleau sur l'auge (y_b) et hauteur de la vague (y_s) produits par la sortie du jet - McPherson et Karr [1957]

Ils recommandent l'adoption d'une largeur pour le bord de la sortie de la structure (b_s) de:

$$b_s = \frac{1}{10} R_s \quad (3.31)$$

Un autre critère de dimensionnement des structures à auge a été présenté par Peterka [1957]. Ce critère (figure 3.17) a été utilisé comme référence par le U.S.B.R. [1987].

Ces courbes ont été définies pour des dissipateurs à auge avec seuil denté. Elles peuvent cependant être utilisées pour l'auge lisse si l'on ajoute, après le rayon, une partie droite avec un angle de 45° jusqu'à une hauteur de $0,6 R_s$. En connaissant la différence d'énergie (ΔH) entre l'amont de l'évacuateur et l'aval de la structure, nous pouvons déterminer, à l'aide de la dernière figure, les paramètres suivants:

- a) rayon minimal de la structure (R_s);
- b) le calage normal (T) du fond de l'auge, par rapport au niveau d'eau en aval (N_a);
- c) le calage minimal (T_{\min}) du fond de l'auge, par rapport au niveau d'eau en aval (N_a);
- d) le calage maximal (T_{\max}) sur le fond de l'auge, par rapport au niveau d'eau en aval (N_a).

Nous observons sur la figure 3.17 que, lorsque nous augmentons le rayon de la structure pour un nombre de Froude constant, la différence de niveau (T) entre le fond de la structure et le niveau en aval augmente aussi. Nous croyons que ce phénomène est relié à l'augmentation de la cote de sortie de la structure, parce qu'une cote plus haute de sortie a besoin d'une submergence plus grande.

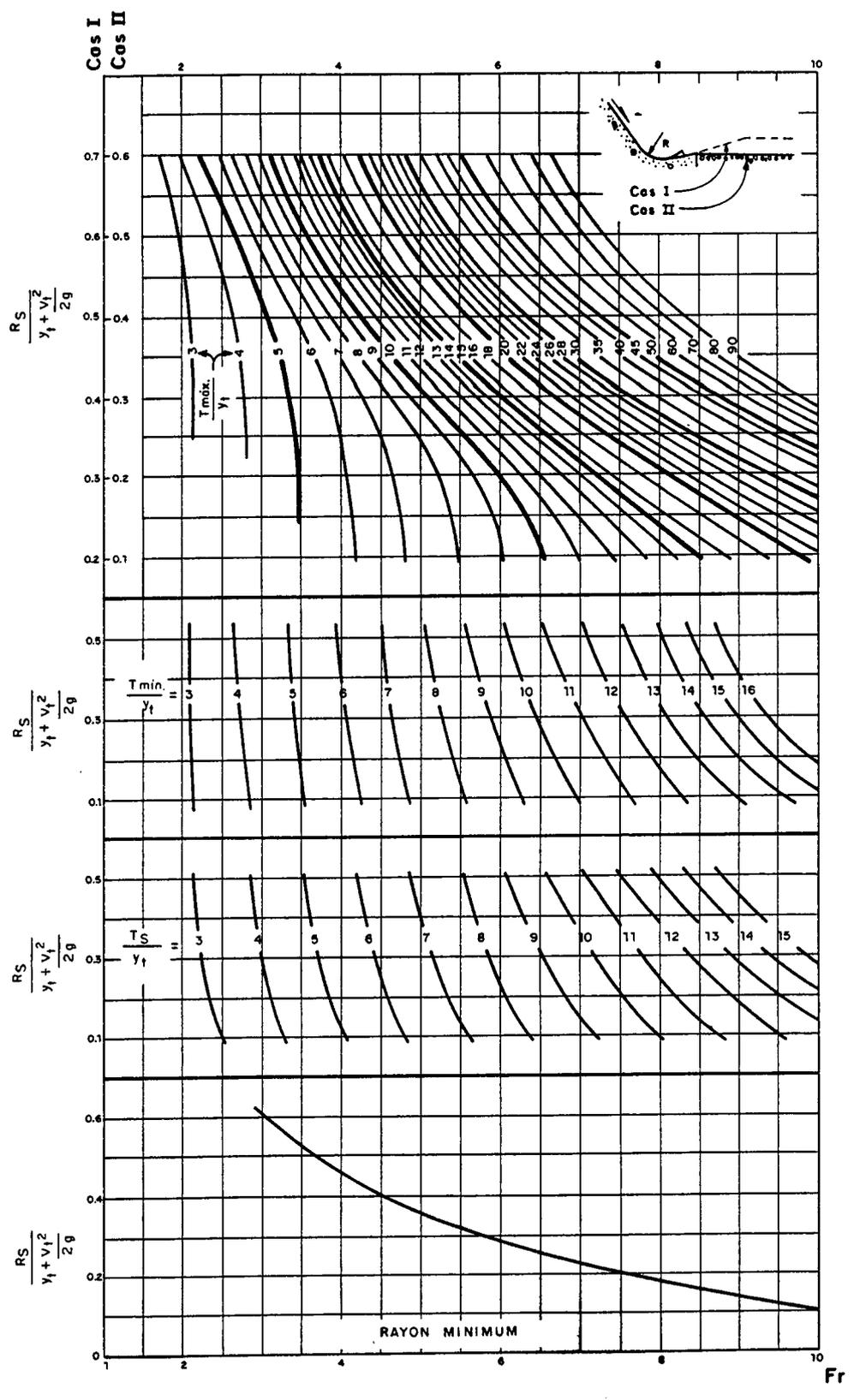


Fig. 3.17 - Dimensionnement du dissipateur à auge Peterka - U.S.B.R. [1987].

Peterka a étudié différentes formes de lit lors des essais sur fond mobile et sur fond fixe. Il a alors constaté que la forme du lit n'avait pas d'influence sur le fonctionnement de la structure.

Daughatry [1958], à partir d'essais sur fond mobile, a conclu qu'un angle de $37,5^\circ$ est meilleur qu'un angle de 45° pour une même cote de sortie.

Elevatorski [1959] a recommandé l'utilisation d'un angle de 45° ainsi que l'équation 3.32 pour déterminer la hauteur de sortie (s) par rapport au fond du canal (figure 3.15). Il souligne, également, que l'utilisation d'une forme parabolique pour la coquille résulte en une surface d'eau plus tranquille sans changer la longueur de la structure.

$$s \approx \frac{Y_n}{6} \quad (3.32)$$

Elevatorski [1961] a indiqué que le rayon (R_s) doit être établi en fonction du nombre de Froude et que le débit spécifique a une influence sur les dimensions de l'auge.

En 1962, Hiranandani et Wadekar, d'après Rajan et Rao [1980], ont conclu que l'utilisation d'un angle variant entre 35° et 40° améliore la dissipation.

Dodiah [1967] a étudié les angles de sortie (α) de 30° et de 45° . Il suggéra l'utilisation de l'angle de 30° parce que celui-ci présente une profondeur d'érosion plus petite et une distance d'impact du jet plus grande qu'un angle de 45° . Il a aussi montré que l'érosion en aval d'une auge augmente avec des rayons plus petits et, est inversement proportionnelle au nombre de Froude.

En 1962, Garg, d'après Rajan et Rao [1980], a observé que la structure ne fonctionne pas bien pour un débit faible quand la profondeur d'eau aval est égale ou inférieure à $1,1 y_1$.

Varshney [1968] a indiqué que la différence de niveau (T) entre le fond de la structure et le niveau aval doit se situer entre les valeurs données par la relation suivante:

$$1,3 \leq \frac{T}{y_1} \leq 1,4 \quad (3.33)$$

Cotta, d'après Machado [1980], a étudié l'angle de sortie de 45° . Il a alors proposé l'équation 3.34 pour déterminer le rayon (R_s) en fonction du débit spécifique (q) et de la différence d'énergie (ΔH) entre l'amont de l'évacuateur et l'aval de la structure. Cependant, il n'a fait aucune allusion au sujet du niveau d'eau minimal en aval de la structure afin de s'assurer qu'elle peut fonctionner submergée.

$$R_s \geq 1,414 \sqrt{q} \sqrt[4]{\Delta H} \quad (3.34)$$

Machado [1979] a développé les équations 3.35 à 3.38 pour calculer les principaux paramètres. Ses résultats sont basés sur les travaux de McPherson et Karr, Vedernikov, Montuori et Cotta. Pour la largeur (b) du dissipateur il a recommandé l'utilisation de l'équation 3.35, pour calculer la hauteur d'eau en aval (y_n) l'équation 3.36, pour déterminer le rayon (R_s) l'équation 3.37 et pour calculer la hauteur du mur sur la coquille (h_b), l'équation 3.38.

$$1,44 \leq \frac{b}{Q \sqrt{H_p + 1,5 h_c y_n}} \leq 2,66 \quad (3.35)$$

$$y_n \geq 1,2 \sqrt{q} \sqrt[4]{H_p + 1,5 h} \quad (3.36)$$

$$R_s \geq 1,2 \sqrt{q} \sqrt[4]{H_p} \quad (3.37)$$

$$h_b \geq 0,75 y_n \quad (3.38)$$

Pour le calcul de la pression maximale (P_{Cmax}) sur l'auge, il a proposé l'utilisation de l'équation suivante:

$$P_{Cmax} = \gamma y_b + \gamma q \frac{v_t}{g} R_s \quad (3.39)$$

Machado [1979] a aussi suggéré une formule (équation 3.40) pour le calcul de la profondeur d'érosion maximale (t_e) par rapport au radier. Ce résultat est basé sur le travail de Veronese [1937].

$$t_e = 0,8 \sqrt{q} \sqrt[4]{H_p} \quad (3.40)$$

Il n'a fait aucune proposition directe au sujet de la position de la cote de sortie (s). Mais, en fonction d'une étude des dessins de la structure et de certaines analyses qu'il a faite, nous pouvons dire que la cote de sortie de la structure était voisine du fond du canal. Il a fait aussi référence aux chercheurs nord-américains, sans citer leurs noms, qui recommandent un rayon (R_s) limite par les équations 3.41 et 3.42.

$$R_s \geq 0,3 H_p \quad (3.41)$$

et

$$R_s \geq y_n \quad (3.42)$$

Machado [1980] a proposé, pour déterminer le rayon (R_s), l'équation 3.43 lorsque l'équation 3.44 est valide.

$$R_s = 20,7 \frac{\Delta H}{Fr_c^{1,65}} \quad (3.43)$$

$$\frac{2,09}{Fr_c^{0,8}} \leq \frac{y_n}{H_c} \leq \frac{2,24}{Fr_c^{0,7}} \quad (3.44)$$

où

Fr_c = nombre de Froude mesure sur le fond de l'auge

H_c = hauteur de l'évacuateur par rapport au fond de l'auge

Rajan et Rao [1980] et Rao [1982] ont présenté l'équation 3.45 pour faire le calcul du rayon en fonction d'un paramètre de débit (F_d) qui représente le nombre de Froude. Ils ont recommandé l'utilisation des angles de sortie de 30° , 35° ou 45° selon la valeur de F_d . Le tableau 3.5 présente les angles de sortie (α) recommandés en fonction de F_d .

$$\frac{R_s}{y_t} = 8,26 \cdot 10^{-2} + 2,07 \cdot 10^{-3} F_d + 1,40 \cdot 10^{-5} F_d^2 \quad (3.45)$$

$$F_d = \frac{q}{\sqrt{g y_t^3}} \quad (3.46)$$

F_d	angle de sortie (α)
$F_d < 30$	30°
$30 \leq F_d \leq 80$	45°
$F_d > 80$	35°

Tab. 3.4 - Angles recommandés par Rajan et Rao [1980]

Pour déterminer la cote de fond (C_f), Rajan et Rao [1980] ont suggéré la relation suivante:

$$1,3 \leq \frac{T}{y_1} \leq 1,4 \quad (3.47)$$

De plus, ils ont aussi recommandé d'adopter une largeur pour le bord de la structure (b_s) définie par la relation suivante:

$$b_s \approx \frac{R_s}{10} \quad (3.48)$$

La hauteur minimale du mur latéral doit être égale à 1,25 fois la profondeur d'eau sur la coquille (y_b) ou, égale au niveau maximal aval (N_a).

La pression maximale sur l'auge (P_{Cmax}) peut être calculée par la relation de Doumas, d'après Rajan et Rao [1980] (équation 3.49). La pression minimale est estimée à 1,25 fois plus petite que la pression hydrostatique.

$$P_{Cmax} = y_b - \frac{1}{2g} \left(\frac{q}{R_s \log\left(\frac{R_s}{r_1}\right)} \right) \quad (3.49)$$

où

$$R_s \log\left(\frac{R_s}{r_1}\right) = \frac{q}{\sqrt{2gH_s}} \quad (3.50)$$

où

P_{Cmax} = pression sur l'auge exprimée en hauteur d'eau;

y_b = hauteur d'eau sur l'auge;

R_s = rayon de la structure;

r_1 = rayon de la position intérieure du jet;

H_s = charge totale sur l'auge.

La dissipation d'énergie provoquée par le rouleau sur l'auge peut être calculée par l'équation empirique de Safranez. Nous remarquons alors qu'elle dépend de la forme et de la dimension du rouleau ainsi que du nombre de Froude à l'entrée.

$$N^* = C V (Fr^{3/7} - 1) \quad (3.51)$$

où

N^* = relation de l'énergie dissipée en t*m/s;

V = volume du rouleau;

Fr = nombre de Froude à l'entrée de la structure;

C = coefficient;

$C = 0,560$ (pour les unités en système mks);

$C = 0,209$ (pour les unités en système anglais).

Basés sur des travaux faits en Inde 1975, Rajan et Rao [1980] ont recommandé de réaliser des études en modèle réduit lorsqu'une des relations suivantes est satisfaite:

$$q \geq 45 \text{ m}^2/\text{s} \quad (3.52)$$

$$v_t \geq 20 \text{ m/s} \quad (3.53)$$

Rajan, Gowda et Raghavenda [1982] ont étudié les formes paraboliques, elliptiques et circulaires pour l'auge. Ils sont arrivés à la conclusion qu'il n'y a pas de grande différence entre un type de forme ou l'autre. La forme circulaire offre cependant une meilleure action du rouleau (hauteur et oscillation), tandis que la forme elliptique résulte en une meilleure trajectoire du jet (distance d'impact plus grande).

Lors du "Symposium International d'Hydraulique des Grands Barrages" (Beijing, 1988) plusieurs chercheurs ont présenté des résultats de travaux réalisés en Chine sur le sujet du dimensionnement des structures de dissipation. Les chercheurs ont la tendance de considérer les structures à rampe ascendante comme une variante de la structure à auge.

Pour le projet hydroélectrique de Yanta en Chine, Li, Zhu et Fen [1988] ont étudié un bassin court avec un déflecteur de sortie (figure 3.18) qui présente un comportement similaire à celui d'une auge. Le dit bassin présente trois rouleaux et une vague stationnaire. Son efficacité a été évaluée à environ 40%. Les auteurs n'ont cependant pas abordé question de l'influence du nombre de Froude sur le rendement du dissipateur.

Li, Zhu et Fen [1988] ont comparé, en modèle réduit, 13 scénarios avec 40 groupes d'essais. Ils ont recommandé l'utilisation d'un rayon de concordance entre l'évacuateur et le fond de la structure (R_1) d'une part et entre le fond et le déflecteur à la sortie (R_s) d'autre part définis par la relation suivante:

$$R_1 = R_s = 4y_r \quad (3.54)$$

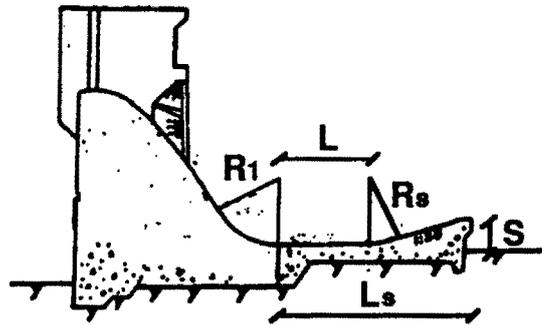


Fig. 3.18 - Bassin court possédant un comportement similaire à celui d'une auge submergée proposée par Li, Zhu et Fen [1988]

Également, ils ont suggéré que la différence de niveau (T) entre le fond de la structure et le niveau d'eau aval doit se situer dans la plage des valeurs données par l'équation 3.55 de façon à obtenir la formation des trois rouleaux et de la vague stationnaire.

$$1,1 \leq \frac{T}{y_1} \leq 1,2 \quad (3.55)$$

Li, Zhu et Fen [1988] ont aussi recommandé que la longueur horizontale de la structure soit égale à la hauteur conjuguée lente (équation 3.56).

$$L = y_1 \quad (3.56)$$

Pour la longueur totale du dissipateur (L_s) nous trouvons les relations suivantes:

$$L_s = 1,8 y_1 \quad (3.57)$$

ou

$$L_s = 0,3 L_n \quad (3.58)$$

où

L_n = longueur du ressaut

Au sujet de l'angle de sortie (α), ils ont fait la recommandation suivante:

$$20^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ \quad (3.59)$$

La hauteur de sortie de la structure (s) a été fixée afin de garder les matériaux érodés hors de la structure. Li, Zhu et Fen n'ont présenté aucune relation pour déterminer s , mais une analyse des dimensions fixées pour le dissipateur de Yanta nous permet de trouver la relation suivante:

$$\frac{s}{y_1} \approx 0,20 \text{ à } 0,25 \quad (3.60)$$

Weizhag [1988] a fait une analyse de la submersion maximale d'un dissipateur à auge. Il a analysé la submersion maximale à partir du paramètre ψ défini par l'équation 3.61. De plus, le jet doit suivre le profil de l'évacuateur et de la coquille si $\psi > 0,3$. Lorsque $\psi \leq 0,3$ et $T > y_n$, le jet suit la direction de la droite AB (figure 3.19) et il va frapper directement le lit proche de la structure.

$$\psi = \frac{v_t \sin \theta_t}{\sqrt{g y_t}} \quad (3.61)$$

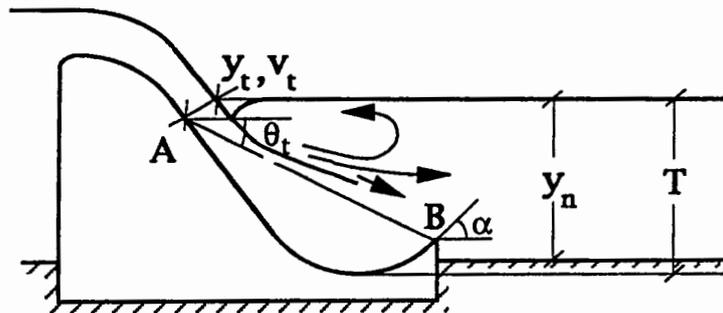


Fig. 3.19 - Submersion de l'auge - Weizhag [1988]

où

v_t = vitesse à l'entrée du dissipateur, mesurée sur le seuil à la hauteur du niveau d'eau aval

θ_t = angle d'incidence du jet

D'autre part, Zhiheng [1988] a appliqué le principe de la conservation de la quantité de mouvement avec quelques simplifications (exemple: il ne considère pas le poids total de l'eau sur la coquille). Il a ainsi réuni un groupe d'équations pour calculer le niveau d'eau aval selon la géométrie de la structure et les conditions d'entrée. Les équations changent selon le type de structure et sa géométrie: auge, rampe ascendante ou bassin court. Sa méthode permet alors de trouver une infinité de solutions. Il n'a cependant fait aucune considération sur les dimensions idéales de la structure.

Zhenxing [1988] a étudié l'érosion en aval d'un dissipateur à auge. Il a observé que l'érosion dépend beaucoup du niveau d'eau aval (y_n). Il recommande l'utilisation de l'équation 3.62 pour calculer la hauteur d'eau nécessaire à la formation des trois rouleaux et de l'onde stationnaire (figure 3.20).

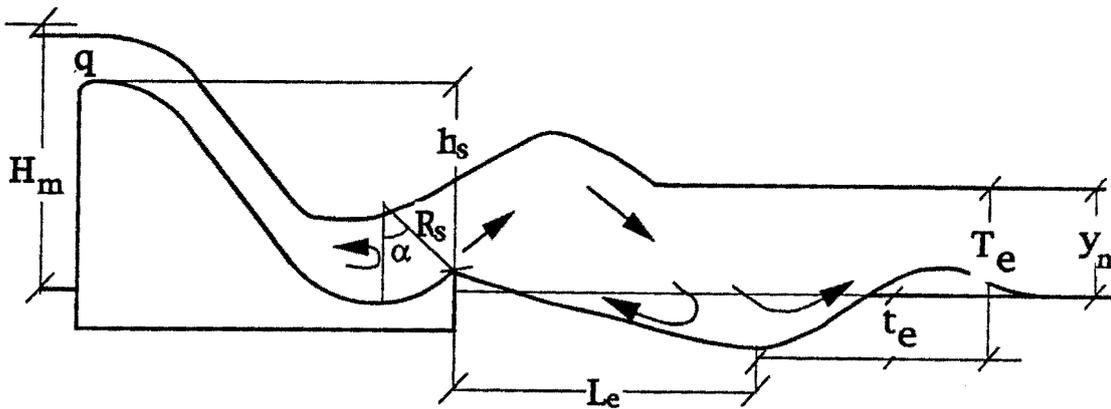


Fig. 3.20 - Schéma d'érosion - Zhenxing [1988]

$$2 F_c^2 \cos \alpha - C_s^* \cos \alpha - C_s^{*2} = \frac{2 F_c^2}{y_n^*} y_c + C_c^{*2} - \frac{0,76}{K_s^{0,04}} C_c^* (\cos \alpha + 2 C_s^*) \quad (3.62)$$

où

$$C_s^* = \frac{s}{h_c} \quad (3.63)$$

$$C_c^* = \frac{y_n^*}{y_c} \quad (3.64)$$

$$F_c = \frac{q}{\sqrt{g y_c^3}} \quad (3.65)$$

$$y_c = 0,67 h_s k_s \quad (3.66)$$

y_n^* = profondeur d'eau nécessaire pour obtenir la submersion de l'auge;
 h_s = hauteur entre la sortie de la structure et la crête de l'évacuateur.

$$k_s = \frac{q}{\sqrt{g h_s^3}} \quad (3.67)$$

Il suggère aussi deux équations pour estimer la profondeur d'érosion (T_e) par rapport au niveau d'eau en aval et la distance (L_e) où doit se situer la partie la plus creuse de la fosse d'érosion. Lorsque nous analysons ces formules nous pouvons remarquer que le degré de submersion (m) exerce une grande influence sur le dimensionnement d'une structure à auge.

$$T_e = 0,846 m^{-0,414} q^{0,67} \left(\frac{\Delta H}{d_m} \right)^{0,182} \quad (3.68)$$

$$L_e = k_2 q^{0,67} \left(\frac{t_e}{d_m} \right)^{0,095} \quad (3.69)$$

où

d_m = diamètre moyen des matériaux du lit

t_e = profondeur de l'érosion mesurée à partir du fond du canal

$$m = \frac{y_n}{y_n^*} \quad (3.70)$$

$$k_2 = 2,844 m^{0,404} \quad (\text{barrage haut } H_m \geq 20 \text{ m}) \quad (3.71)$$

$$k_2 = 2,050 m^{0,660} \quad (\text{barrage bas et moyen}); \quad (3.72)$$

Dans son travail, Tamada [1989] a conclu que l'angle idéal, pour la structure, doit se situer entre 15 et 25°, pour une plage du nombre de Froude (Fr) situé entre 1,5 et 4,5. Ses conclusions sont basées sur l'analyse de la fluctuation de pression mesurée en aval de la structure (3 à 5 endroits). Il a utilisé les recommandations faites par Lencastre [1983] pour faire le dimensionnement des structures avec un angle de sortie de 45°. Ces recommandations sont les mêmes que Peterka [1957]. Cependant, Tamada a assumé que les dissipateurs doivent avoir la même hauteur de sortie que la structure de 45°, peu importe leur angle. De cette façon, il a fait varier l'angle et la longueur de la structure. Il a aussi fait référence aux chercheurs nord-américains (sans citer leurs noms) qui recommandent un rayon défini par les équations 3.40 et 3.41.

Maestri et Marques [1989] se sont basés sur les essais à fond mobile pour présenter un procédé (figures 3.21 et 3.22) visant à déterminer la longueur de la structure (L_s), ainsi que la submersion minimale (D_s), selon l'angle de sortie (α).

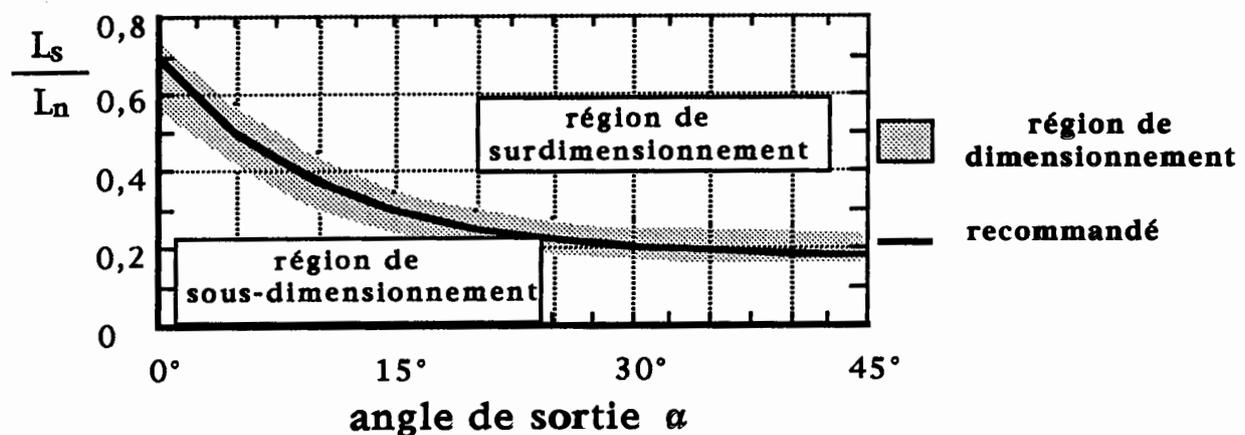


Fig. 3.21 - Relation entre la longueur minimale (L_s) et la longueur du ressaut (L_R) - Maestri et Marques [1989]

Nous observons que l'angle de sortie de la structure est inversement proportionnel à la relation L_s/L_R et proportionnel à D_s . Ils recommandent également d'adopter un angle supérieur à 20° et de respecter les valeurs de L_s et T pour chaque angle.

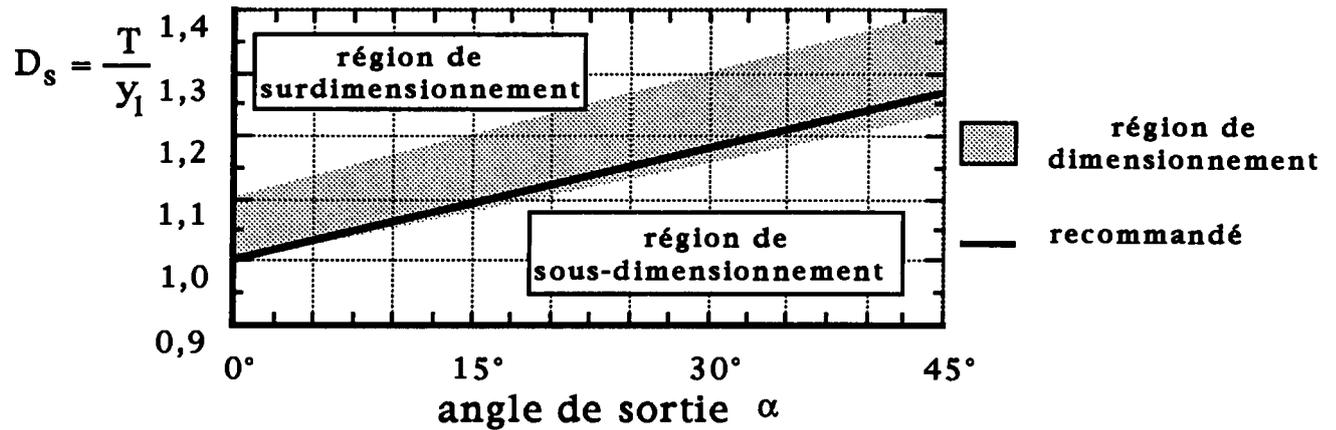


Fig. 3.22 - Coefficient de submersion minimale (D_s) - Maestri et Marques [1989]

Pour les autres paramètres géométriques de la structure (figure 3.23), ils ont recommandé:

$$R_1 = R_s = 4 y_t \quad (3.73)$$

$$s = 0,05 \text{ à } 0,1 R_s \quad (3.74)$$

$$L_w \geq 0,5 y_1 \text{ ou } L_w \geq 10,0 \text{ m} \quad (3.75)$$

$$d_w = 5 \quad (3.76)$$

$$\beta = 180^\circ - \alpha \quad (3.77)$$

$$b_{\text{sidéal}} = 0 \quad (3.78)$$

Pour une question pratique de construction et de recouvrement d'armature on doit utiliser une valeur comprise dans l'intervalle suivant:

$$0,5 \text{ m} \leq b_s \leq 1,5 \text{ m} \quad (3.79)$$

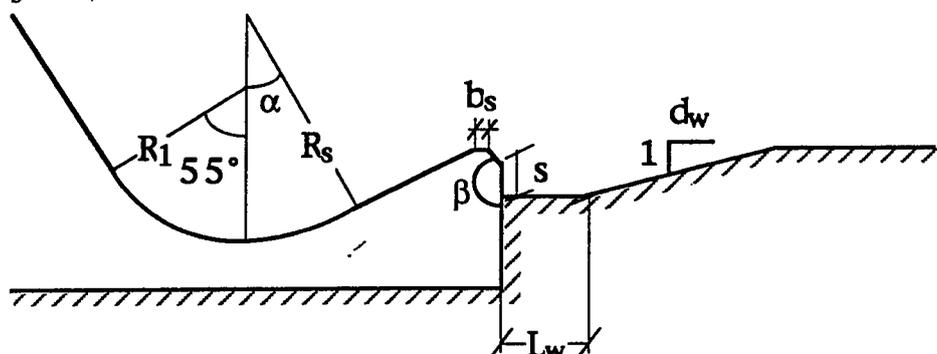


Fig. 3.23 - Schéma de localisation des paramètres d'une structure à auge - Maestri et Marques [1989]

Marques [1991] a étudié les structures à auge pour un degré de submersion égale à 1 et un nombre de Froude compris entre 3,0 et 8,0. Il a utilisé comme méthode d'analyse la mesure de la fluctuation de pression. Il a conclu que:

- a) l'angle de sortie de 45° fonctionne mieux dans le cas présent;
- b) la hauteur d'eau à la sortie de la structure (h_s) a une influence sur le degré de submersion et varie avec l'angle α ;
- c) lorsque l'angle augmente, la différence de niveau (T) entre le fond de la structure et le niveau d'eau aval peut être plus petit, pour que la structure fonctionne comme une auge.

3.5 Dissipateur de type rampe ascendante

Ce type de dissipateur est une variante de l'auge. Il est constitué d'une auge qui se termine par une rampe avec une inclinaison dont l'angle est habituellement compris entre 10° et 30° (photo 3.3 et figure 3.24). La structure résultante est encore compacte et la cote de fond est semblable à celle d'une auge. La démarcation entre ces deux types de structures n'est pas bien définie. Même certains auteurs ne font pas de différence entre les deux et les abordent de la même façon (Zhieng [1988]; Tamada [1989]; Maestri et Marques [1989] et [1990] et Marques [1991]). Le dissipateur à auge montré sur la figure 3.17 (Peterka [1957]) possède une rampe ascendante, avec un angle de 45° .

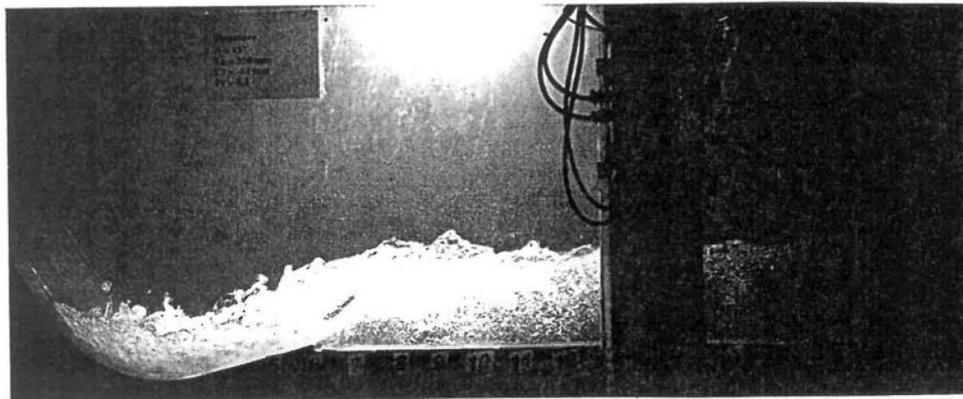


Photo 3.3 - Rampe ascendante

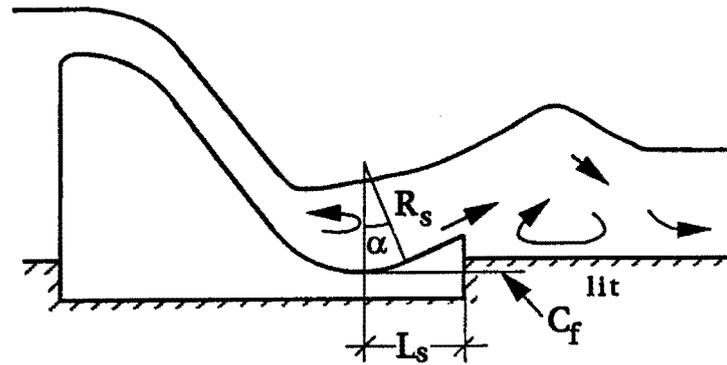


Fig. 3.24 - Rampe ascendante

Le grand avantage de la rampe ascendante ($\alpha \leq 30^\circ$) par rapport à l'auge ($\alpha \geq 30^\circ$) est la diminution de la turbulence et la réduction de la surélévation du niveau d'eau en aval. Les angles plus faibles produisent un écoulement plus régulier avec des vagues plus petites. Par contre l'auge submergée dissipe une plus grande quantité d'énergie, car il permet la formation de plus grands rouleaux. Il faut cependant, optimiser l'angle de sortie (α), de façon à éviter l'apparition de hautes vitesses près du fond du lit. Dans le cas d'un lit rocheux, composé de matériaux grossiers, la rampe ascendante utilisée avec un angle faible, peut diminuer le risque d'érosion près de la structure.

Valença [1989] a présenté une méthode de calcul basé sur la quantité de mouvement (figure 3.25 et équation 3.80).

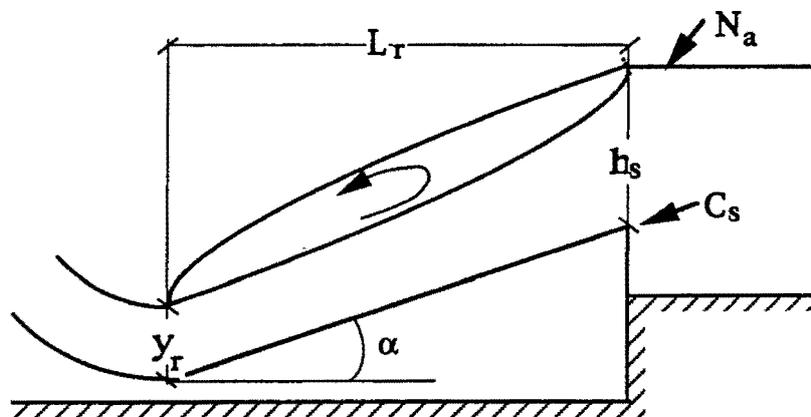


Fig. 3.25 - Schéma de calcul pour une rampe ascendante

$$\frac{q}{g}(v_s - v_r) = \frac{1}{2} [y_r^2 - h_s^2 - (y_r + h_s)] L_r \tan \alpha \quad (3.80)$$

où:

$$N_a = C_s + h_s \quad (3.81)$$

q = débit spécifique;

g = accélération gravitationnelle,

v_s = vitesse moyenne à la sortie;

v_r = vitesse moyenne à l'entrée;

y_r = hauteur conjuguée rapide;

h_s = profondeur à la sortie;

$$h_s > h_c \quad (3.82)$$

h_c = profondeur critique de l'écoulement.

L_s = longueur de la structure

α = angle du fond du canal.

Pour le dimensionnement du dissipateur, nous choisissons un angle de sortie α et une cote de fond (C_f) et, par tâtonnement, nous obtenons la longueur (L_s) et la cote de sortie (C_s) de la structure.

Pour chaque ensemble de valeurs de α et C_f adoptées, nous trouvons les valeurs correspondantes de L_s et C_s . La figure 3.26 présente un exemple des résultats obtenus pour des angles variant entre 5° et 45° pour cinq (5) cotes de fond différentes (C_{f1} à C_{f5}).

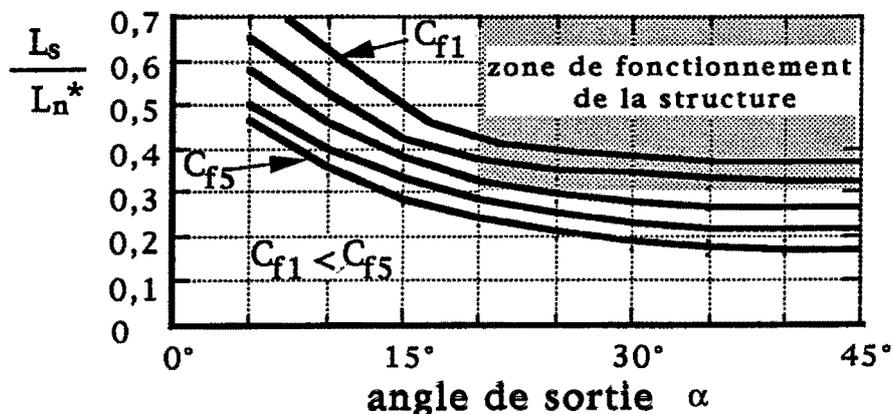


Fig. 3.26 - Longueur minimale de la structure - Valença [1989]

Nous devons alors choisir les ensembles pour lesquels L_s est plus grande ou égal à $0,3L_n^*$ et l'angle de sortie est plus grand ou égal à 20° . Après avoir déterminé la zone de fonctionnement de la rampe ascendante, nous pouvons choisir la géométrie de la structure qui s'adaptera le mieux aux conditions du projet d'étude. Pour L_n^* , Valença adopte la relation suivante:

$$L_n^* = 6,1 h_s \quad (3.83)$$

3.6 Comparaison entre les différents critères

En analysant les différents critères de dimensionnement pour le dissipateur à auge, nous pouvons remarquer qu'il n'y a pas de consensus ni d'étude comparative entre les critères proposés. La majorité de ces critères a été obtenue à partir d'études réalisées sur des modèles à fond mobile, qui rarement représentent la situation réelle du prototype. De plus nous savons que le comportement de l'écoulement diffère entre un fond fixe et un fond mobile. Dans ce dernier l'écoulement change sa condition d'équilibre à mesure qu'il érode le lit. Cependant, pour l'essai à fond fixe, les conditions d'équilibre sont constantes et elles représentent le cas avant le début de l'érosion qui est le plus critique (vitesse plus haute, variation de pression, etc.).

Jusqu'à récemment, la recherche sur les dissipateurs a porté essentiellement sur les modèles à fond mobile. Ce n'est que récemment que la mesure de la fluctuation de pression a commencé à être utilisée comme outil pour déterminer les efforts sur la structure ainsi qu'en aval de cette dernière en utilisant des modèles à fond fixe (Bowers et Toso [1988]; Lopardo, Lio et Henning [1987] entre autres). De plus, cette technique permet de comparer l'efficacité entre les différentes structures (Tamada [1989], Marques [1991]).

Il y a plusieurs années, on utilisait des structures avec des angles de 45°, mais aujourd'hui on a tendance à utiliser des angles variant entre 15° et 30° (Tamada [1989], Maestri et Marques [1989], Valença [1989]). Cependant, il n'y a pas eu d'étude pour fixer le meilleur angle à utiliser.

Les critères de dimensionnement conduisent au dimensionnement de la structure, mais ne fournissent aucune indication sur le degré d'efficacité de cette dernière.

Le dimensionnement du rayon de la structure (R_s), tel que proposé par les différents chercheurs, couvre un gamme de valeur très vaste comme nous pouvons le constater sur la figure 3.27, à l'aide du paramètre adimensionnel Ω , en fonction du nombre de Froude (Fr).

$$\Omega = \frac{R_s}{\Delta H} \quad (3.84)$$

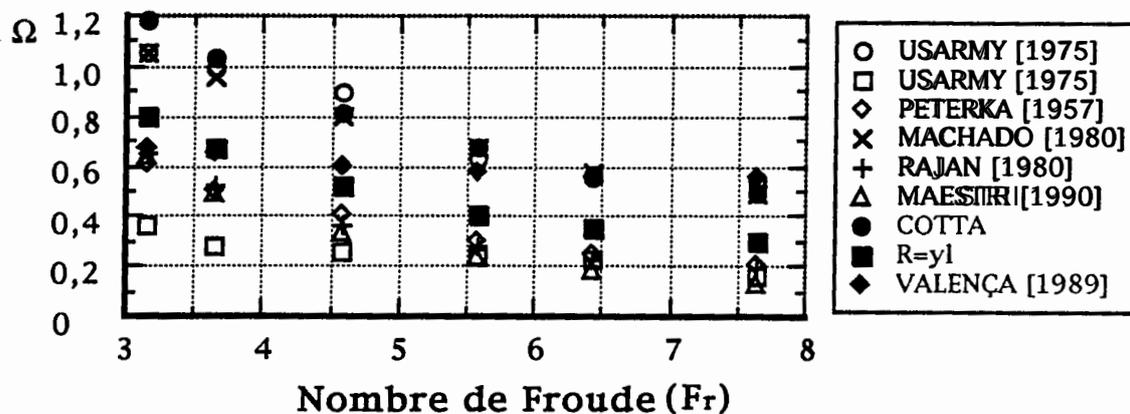


Fig. 3.27 - Valeurs Ω proposées par différents chercheurs en fonction du nombre de Froude (Fr)

Lorsque le nombre de Froude (Fr) diminue, le paramètre Ω augmente, indiquant que le rayon augmente plus rapidement que la valeur de ΔH , laquelle diminue également lorsque le nombre de Froude diminue. Le rapport maximal entre les différentes valeurs de Ω est d'environ 3,5 pour un même nombre de Froude.

Nous remarquons également une tendance des chercheurs à considérer le rayon comme une variable dépendante des autres paramètres et dont le but est de faire la concordance entre l'évacuateur et le dissipateur. De plus, le rayon permet de changer la longueur de la structure (L_s) sans changer, par exemple, la hauteur de sortie de la structure (s).

En outre, la longueur de la structure (L_s) commence à prendre une plus grande importance et elle varie en fonction de l'angle de sortie α et du nombre de Froude (Fr). La figure 3.28 montre la zone où se situent les valeurs de la longueur de la structure selon les différents chercheurs par rapport à l'angle de sortie (α).

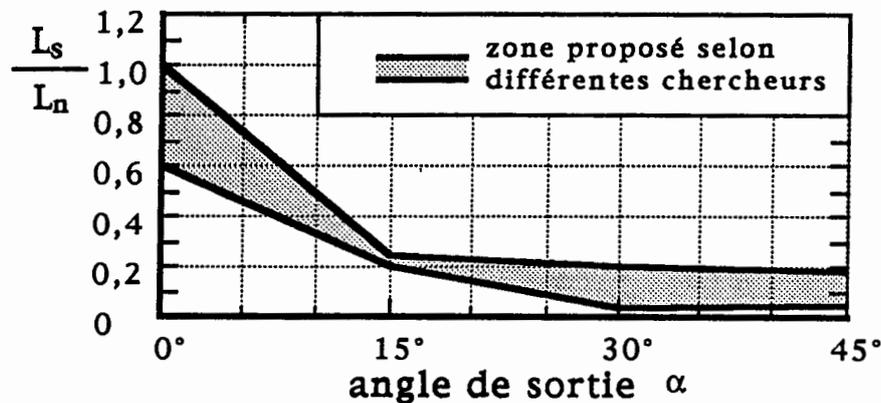


Fig. 3.28 - Influence de l'angle de sortie sur la longueur réduite de la structure selon différents chercheurs

Nous observons que la longueur diminue lorsque l'angle augmente. Pour les angles plus grands que 15° , la longueur diminue lentement et est inférieure à $0,3 L_n$.

D'après la figure 3.29 le rapport L_s/L_n est indépendant du nombre de Froude Fr .

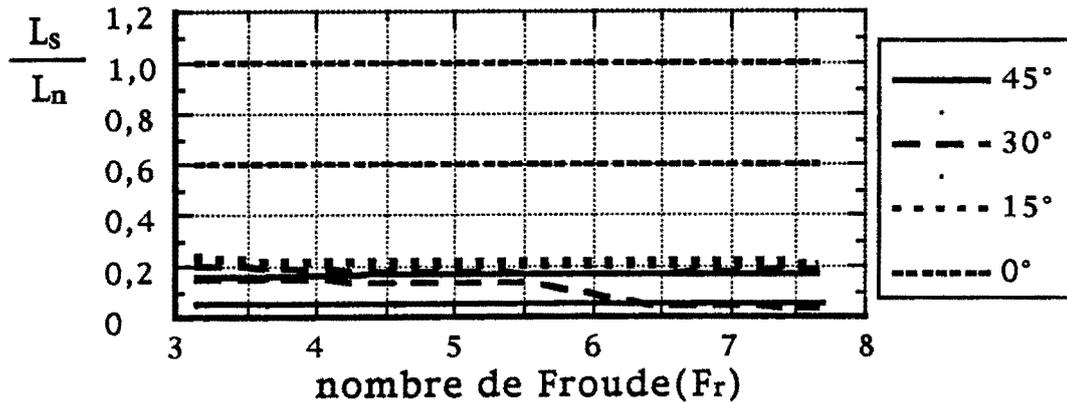


Fig. 3.29 - Influence du nombre de Froude sur la longueur réduite de la structure selon différents chercheurs

Le tableau 3.5 présente le rapport entre la valeur maximale (L_{smax}) et la valeur minimale (L_{smin}) de la longueur du dissipateur trouve par entre les différents critères de dimensionnement en fonction de l'angle de sortie. Nous constatons que ce rapport peut atteindre un ordre de grandeur de 4 pour un angle de 45° .

Angle de sortie (α)	$\frac{L_{smax}}{L_{smin}}$
45°	$\cong 4,0$
30°	$\cong 4,1$
15°	$\cong 1,1$
0°	$\cong 1,6$

Tab. 3.5 - Valeur maximale de la longueur (L_s) en fonction de l'angle de sortie (α)

Le tableau 3.6 montre d'une façon schématique la tendance du comportement de la longueur (L_s) en fonction de l'angle de sortie α et du nombre de Froude (Fr). Les flèches doubles indiquent la tendance du paramètre à augmenter (\Uparrow) ou à diminuer (\Downarrow), le signe égal (=) indique que le paramètre est constant. D'une façon générale, nous pouvons dire que, pour un angle donné, les valeurs de Fr et L_s sont directement

proportionnelles à la valeur de l'angle. Pour un même écoulement donné avec un nombre de Froude constant, la longueur L_s diminue lorsque α augmente.

Angle de sortie (α)	Nombre de Froude (Fr)	Longueur (L_s)
=	\uparrow	\uparrow
\uparrow	=	\downarrow

Tab. 3.6 - Longueur de la structure (L_s)

Nous avons regroupé sur la figure 3.30 les valeurs relatives au degré de submersion (D_s) en fonction de l'angle α tel que proposé par les différents chercheurs. Nous observons que la limite supérieure D_s augmente graduellement de 1,0 à 1,5 en fonction de l'angle. La limite inférieure augmente de 0,90 à 1,05 lorsque α passe de 0° à 15° . Au-delà de 15° , la valeur D_s diminue graduellement jusqu'à 0,9 lorsque α atteint 45° . Pour des valeurs de α inférieures à 10° et supérieures à 30° , D_s est plus petit que 1, ce qui indique que la cote de fond peut être placée plus haut que le fond du canal.

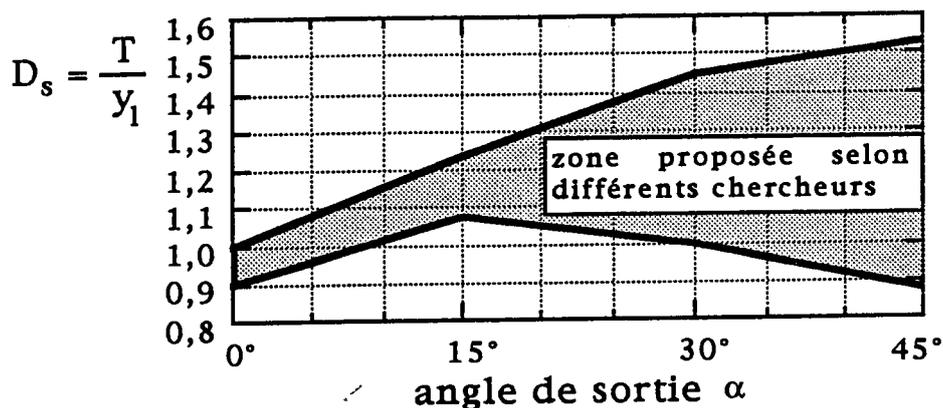


Fig. 3.30 - Influence de l'angle de sortie (α) sur le degré de submersion (D_s)

L'analyse de la figure 3.31 permet d'observer le degré de submersion (D_s) en fonction de nombre de Froude.

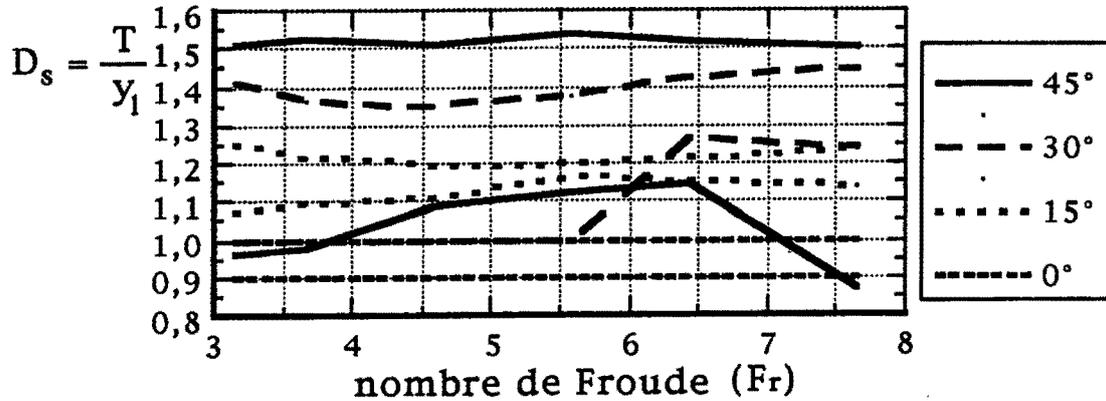


Fig. 3.31 - Influence du nombre de Froude (Fr) sur le degré de submersion (D_s)

Nous constatons que la valeur maximale D_s pour un angle donné est presque constante par rapport au nombre de Froude (Fr). La situation est sensiblement la même pour la limite inférieure de D_s lorsque α est inférieur à 30°. Au-delà de cette valeur, D_s ne présente pas tendance bien définie en fonction de l'angle.

Un autre paramètre qui commence à prendre une certaine importance auprès des chercheurs est la cote de sortie de la structure (C_s). Pour analyser les critères proposés par les différents auteurs nous allons utiliser le paramètre Φ^* (équation 3.85). Ce paramètre représente le rapport entre la hauteur d'eau à la sortie de la structure (h_s) et la hauteur conjuguée lente (y_1).

$$\Phi^* = \frac{h_s}{y_1} \quad (3.85)$$

Sur la figure 3.32, nous pouvons observer la valeur de Φ^* en fonction de l'angle de sortie. Nous constatons que la longueur varie d'une façon

irrégulière. Cependant, la différence entre les valeurs supérieures et inférieures augmente avec l'angle.

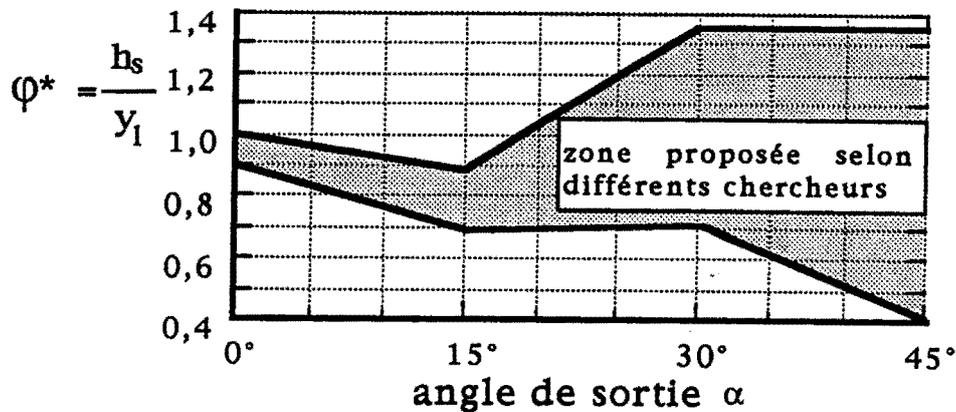


Fig. 3.32 - Φ^* en fonction de l'angle de sortie (α)

La figure 3.33 présente la variation de Φ^* en fonction du nombre de Froude pour différents angles de sortie. La différence entre les valeurs maximales et minimales pour un même angle est indépendante du nombre de Froude (Fr), sauf pour l'angle de 30° selon lequel la différence augmente significativement pour une valeur de Froude supérieure à 5,5.

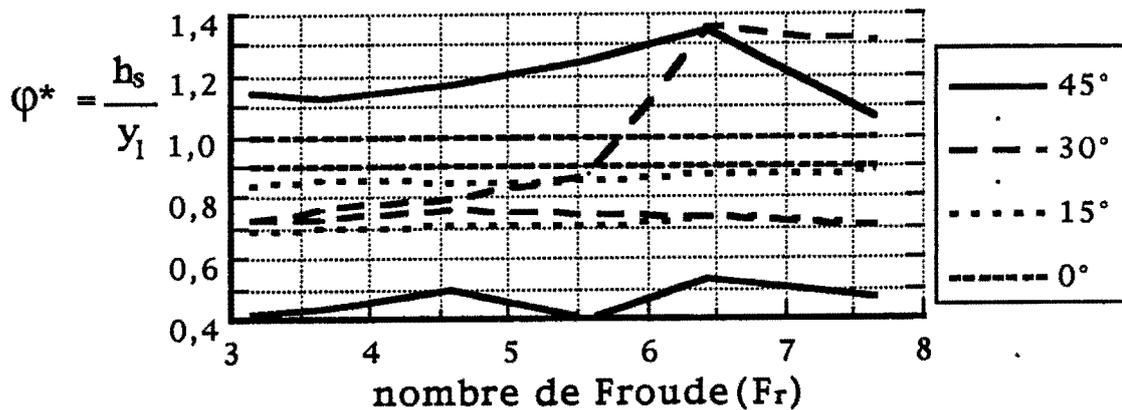


Fig. 3.33 - Φ^* en fonction du nombre de Froude (Fr)

D'une façon générale, pour un écoulement donné, la cote de sortie est indépendante de l'angle de sortie de la structure. La plupart des

chercheurs n'ont pas de critère sur la hauteur de sortie par rapport au fond du lit ou ils soulignent qu'elle n'a pas d'influence. Seuls Elevatorski [1957] et Maestri et Marques [1989] ont présenté une recommandation sur la valeur de la hauteur de sortie s (équation 3.32 et 3.74). Rajan et Rao [1980] ont suggéré que la cote de sortie de la structure (C_s) se situe un peu plus haut que le lit, mais ils ne proposent aucune relation. Cependant, comme nous l'avons dit auparavant, la plus grande partie des critères de dimensionnement a été trouvée suite à des essais à fond mobile où l'influence de s est influencée par l'érosion. Ils ont considéré aussi que le lit du canal était au même niveau que la cote de fond de la structure ce qui laisse la cote de sortie toujours plus haute que le lit. Nous avons trouvé cette conclusion à la suite de l'analyse de leurs travaux, mais aucun n'en a fait mention. Nous croyons qu'il est nécessaire d'avoir une hauteur de sortie (s) minimale pour assurer la formation du rouleau en aval. En résumé, les différents critères présentent qui:

- a) L'angle de sortie (α) optimal doit se situer entre 10° et 45° .
- b) Le degré de submersion (D_s) doit être plus grand ou égal à 1.
- c) Il n'y a pas de détermination précise de la cote de sortie (C_s) ou de la hauteur de sortie (s) par rapport au fond du lit. Seulement, elle doit être plus haute que le fond du lit.
- d) D'une façon générale, il n'y a pas de consensus sur le dimensionnement et chaque critère permet une structure avec une efficacité différente.
- e) Il n'y a pas d'analyse sur l'influence de chacun des paramètres géométriques et hydrauliques de la structure sur l'efficacité de la dissipation.
- f) Jusqu'à récemment, le rayon (R_s) était considéré comme paramètre dominant du dissipateur. Il est maintenant de plus en plus remplacé par la longueur (L_s), tout étant intégré néanmoins dans des relations trigonométriques incluant L_s , R_s , C_f et α . Le rayon conserve cependant son importance puisqu'il agit comme lien de concordance entre l'évacuateur et le dissipateur aval; il donne aussi la possibilité de changer la longueur de la structure sans changer la hauteur de sortie et la cote de fond.
- g) Il n'y a pas de méthode pour comparer l'efficacité des structures.

3.7 Estimation des dimensions de la fosse d'érosion en aval du dissipateur

Étant donné que la plus grande partie des travaux pour déterminer les critères de dimensionnement de dissipateurs à auge a été faite avec un fond mobile et que ce type de structure provoque généralement une érosion aval, nous tenterons de comprendre le processus érosif. Le processus érosif provoqué par les jets libres est bien expliqué par Mason et Arumugam [1985] qui le décrivent comme suit:

- a) Lorsqu'un jet d'eau entre dans une masse d'eau, il se disperse partiellement, il reste cependant un noyau qui diminue graduellement sur une certaine longueur. Cette dispersion produit de grandes fluctuations de pressions dynamiques sur le lit. Celles-ci pénètrent dans les fissures et fêlures. Elles peuvent alors provoquer la rupture du lit et les fissures de la roche en grosseurs variées.
- b) La grande turbulence de l'écoulement à l'intérieur de la fosse d'érosion peut provoquer également la chute des blocs de parois. L'impact et l'agitation désagrègent ensuite ces blocs et les réduisent en morceaux plus petits, plus faciles à transporter hors de la fosse. Ils vont ensuite se déposer dans une région où l'écoulement n'a plus assez d'énergie pour les déplacer.
- c) Le processus d'érosion se poursuit jusqu'à ce que la profondeur où le jet n'a plus assez d'énergie pour fracturer le lit et où les courants ascendants n'ont pas non plus assez d'énergie pour transporter les matériaux érodés hors de la fosse.

La combinaison des facteurs, tels que la dispersion du jet, la géométrie de la fosse, qui est en constante mutation, et le comportement du lit sous l'action du jet, rend l'analyse de l'érosion très difficile. Plusieurs autres facteurs sont aussi à considérer:

- a) la forme du jet incident;
- b) le degré d'aération;

- c) la hauteur d'eau en aval;
- d) les caractéristiques géomécaniques du lit et son degré d'homogénéité;
- e) la fréquence et le type d'opération de l'évacuateur.

La position et la forme de la fosse d'érosion sont conditionnées par les caractéristiques du jet qui frappe le lit (angle d'incidence, épaisseur, forme, vitesse, pression, etc.).

Pour estimer la profondeur de l'érosion (t_e) provoquée par les jets libres (saut de ski), Mason et Arumugan [1985], recommandent l'utilisation des équations 3.86 et 3.87 qui sont basées sur une analyse de 31 équations trouvées dans la bibliographie et sur les données qu'ils ont obtenues en modèle.

$$T_e = 3,27 \frac{q^{0,6} \Delta H^{0,05} y_n^{0,15}}{g^{0,3} d_m^{0,1}} \quad (3.86)$$

où

d_m = diamètre moyen des matériaux du lit

$$t_e = T_e - y_n \quad (3.87)$$

g = accélération gravitationnelle

Pour une évaluation plus précise de la profondeur de la fosse d'érosion, par rapport au niveau d'eau aval (T_e), Mason et Arumugan ont proposé une formule avec des exposants variables en fonction du débit spécifique (q), de la différence d'énergie entre l'amont et l'aval (ΔH) et du coefficient de correction (a_0) (équations 3.88 à 3.91). Cette formule est basée sur les données trouvées à l'aide d'un modèle ainsi qu'un prototype:

$$T_e = a_0 \frac{q^{a_1} \Delta H^{a_2} y_n^{0,15}}{g^{0,3} d_m^{0,1}} \quad (3.88)$$

$$a_0 = 6,42 - 3,10 \Delta H^{0,1} \quad (3.89)$$

$$a_1 = 0,60 - \frac{\Delta H}{300} \quad (3.90)$$

$$a_2 = 0,05 - \frac{\Delta H}{200} \quad (3.91)$$

Nous observons que la profondeur de la fosse d'érosion (t_e) est inversement proportionnelle à la hauteur d'eau aval.

Dans la littérature, nous avons trouvé une seule référence sur l'évaluation des dimensions de la fosse d'érosion (Zhenxing [1988]) pour des dissipateurs à auge. L'étude est basée sur 450 essais réalisés pour différents projets. La détermination de la profondeur maximale de la fosse d'érosion et sa position sont données par les équations 3.92 et 3.68 (chapitre 3.4 et figure 3.20).

$$T_e = 0,846 \frac{q^{0,67} \Delta H^{0,182} y_n^{*0,414}}{d_m^{0,182} y_n^{0,414}} \quad (3.92)$$

Les équations 3.86 et 3.92 présentent cependant des différences au niveau des paramètres, des exposants et des coefficients. Zhenxing a déterminé que la profondeur de l'érosion (T_e) est inversement proportionnelle à la profondeur d'eau aval (y_n) et qu'elle est aussi directement proportionnelle à la différence de niveau entre la cote de fond et le niveau aval (y_n^*) nécessaire pour avoir la formation des trois rouleaux et de l'onde stationnaire. Ceci nous paraît logique. La variation du coefficient a_0 est un autre aspect intéressant. Nous croyons que cette variation serait reliée à la trajectoire parcourue pour le jet dans l'eau

pour frapper le lit. La trajectoire du jet dans l'eau, pour une structure à auge, est deux fois plus longue que celle du saut de ski.

3.8 Estimation des efforts hydrodynamiques en aval des dissipateurs

3.8.1 Les méthodes pour estimer les efforts

Comme nous l'avons montré auparavant, la connaissance des efforts hydrodynamiques en aval des dissipateurs est d'une importance fondamentale pour analyser le processus d'érosion et dimensionner les structures de dissipation.

Ces efforts peuvent être évalués par différentes méthodes, soit:

- a) la mesure de la fluctuation de pression en modèle hydraulique (valide pour toutes les structures).
- b) la théorie des jets libres (valide seulement pour les structures de type saut de ski - Hartung et Hausler [1973]);
- c) la méthode proposée par Reinus [1986] (valide pour les bassins où l'écoulement est parallèle au fond); l'équation 3.93 peut être utilisée pour calculer la pression hydrodynamique totale (P_T) en kg/cm^2 ou la pression de soulèvement (P_L);

$$P_T = (0,5 C_R \pm 0,4f) v^2 \quad (3.93)$$

où

C_R = coefficient de pression qui varie selon l'angle d'inclinaison des fractures du lit (figure 3.34);

f = coefficient de friction qui varie entre 0,03 et 0,08 (Reinus [1970] - tableau 3.7);

v = vitesse moyenne de l'écoulement dans la section considérée.

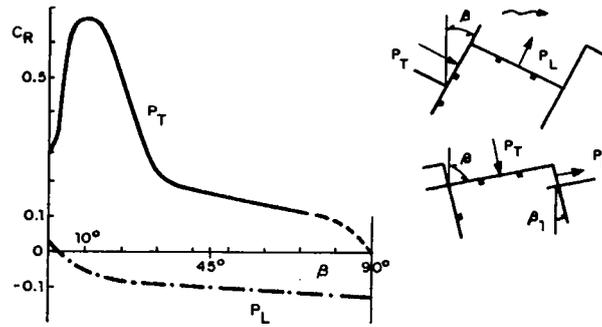


Fig. 3.34 - Coefficient de pression en fonction de l'angle d'inclinaison des fractures du lit - Reinus [1986]

Cas	Rugosité	f
I	fond ondulé lisse, orientation positive	0,036
II	fond ondulé lisse, orientation négative	0,029
III	fond ondulé rugueux, orientation positive	0,055
IV	fond ondulé rugueux, orientation négative	0,047
V	fond ondulé plus rugueux, orientation positive	0,088
VI	fond ondulé plus rugueux, orientation négative	0,086



orientation positive



orientation négative

Tab. 3.7 - Coefficient de friction de Reinus [1970]

Pour estimer les efforts provoqués sur un bassin de type I il est possible d'utiliser l'équation 3.94 et les résultats obtenus par Drapeau, Marques et Verrette [1995] (figures 3.35 et 3.36) en fonction des mesures de fluctuation de pression en modèle hydraulique.

$$P_{x\%} = P_x \pm n\sigma_x \quad (3.94)$$

où:

$P_{x\%}$ = pression hydrodynamique à la position x avec une certaine probabilité (%);

P_x = pression moyenne mesurée au point x;

n = coefficient de probabilité;

σ_x = valeur moyenne de la de la fluctuation de pression (écart type) mesurée au point x.

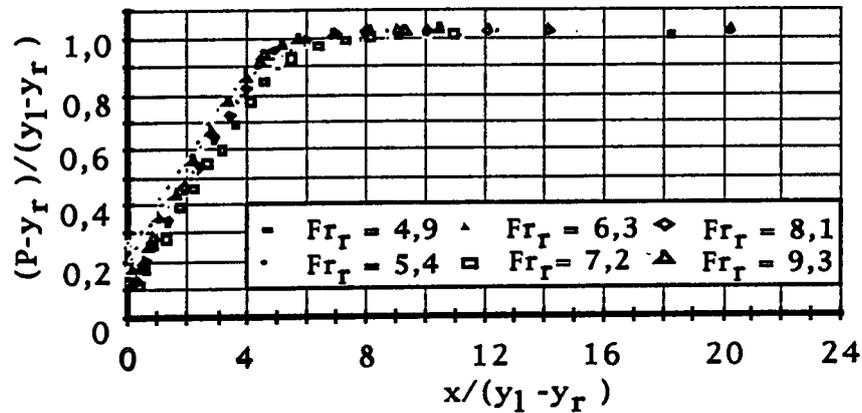


Fig. 3.35 - Pression moyenne réduite dans un bassin de type I - Drapeau, Marques et Verrette [1995]

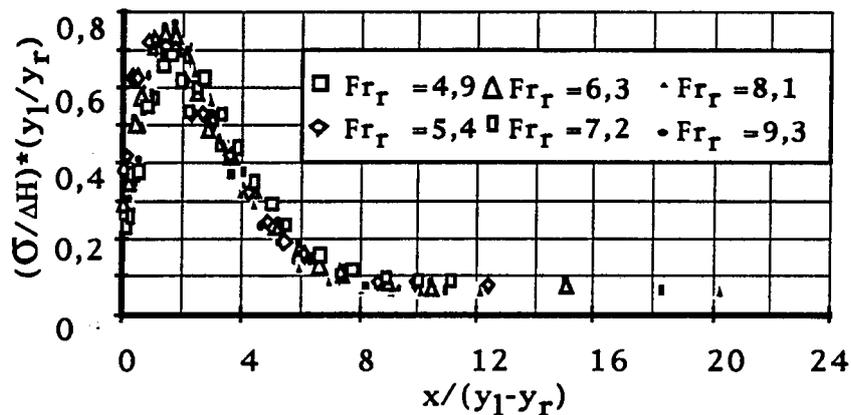


Fig. 3.36 - Valeur moyenne réduite de la fluctuation de pression dans un bassin de type I (Drapeau, Marques et Verrette [1995])

Nous pouvons remarquer qu'il n'y a pas encore d'autre méthode, pour estimer les efforts en aval des dissipateurs d'énergie à auge, que de faire des essais en modèle physique. Dans nos recherches bibliographiques seules deux références font état de mesures de fluctuations de pression en aval des dissipateurs à auge ou rampe ascendante (Tamada [1989] et Marques [1991]). Ces travaux n'avaient pas pour objectif de déterminer les efforts hydrodynamiques, mais d'utiliser la fluctuation de pression

comme paramètre pour déterminer l'efficacité des structures dans des cas bien spécifiques.

3.8.2 Les pressions hydrodynamiques

Le processus de dissipation d'énergie est accompagné de brusques fluctuations de pression, qui peuvent provoquer des dommages à la structure (fatigue, vibration, cavitation ou de soulèvement), ou, de l'érosion en aval. Il importe donc de connaître la distribution spatiale des amplitudes et la détermination des fréquences dominantes.

De nos jours, ces effets peuvent être mesurés, dans les études en modèle hydraulique, à l'aide d'équipements électroniques capables de mesurer des valeurs et des variations presque "instantanées".

Selon Fauvre, Kovazany, Dumas et Cavigilo [1976], les écoulements turbulents sont aléatoires, rotatifs, non linéaires, diffusibles et dissipatifs. Quelques-unes de ces caractéristiques sont facilement observables, tel que la diffusion, la forte vorticité et la fluctuation de vitesse. Pour les autres, on doit faire la mesure et l'analyse avec des équipements sophistiqués.

Hinze [1975] a défini la turbulence comme étant une condition irrégulière du mouvement, où les différentes grandeurs en jeu présentent une brusque variation dans l'espace et dans le temps. Dans l'impossibilité de caractériser la turbulence d'une autre façon, elle est considérée aléatoire. Lorsque les propriétés de l'écoulement se manifestent aléatoirement, l'approche déterministe devient non viable, on doit donc utiliser les méthodes stochastiques. Du point de vue mathématique, les fluctuations de pression d'un écoulement réel peuvent être étudiées comme un processus stochastique, stationnaire et ergodique. Ceci nous permet d'en évaluer les propriétés en fonction d'un

échantillon unique. Les caractéristiques d'amplitude et de fréquence sont définies pour chaque échantillon de fluctuation de pression.

Les caractéristiques d'amplitude peuvent être obtenues à partir de la fonction de densité de probabilité. Cette dernière peut être décrite par ses quatre premières valeurs caractéristiques (Tennekes et Lumley [1972]), qui sont la moyenne (équation 3.95), l'écart type (équation 3.96), le coefficient d'asymétrie (équation 3.97) et le coefficient d'aplatissement (équation 3.98).

$$P = \frac{\sum P_i}{N} \quad (3.95)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (P_i - P)^2}{N}} \quad (3.96)$$

$$A_d = \frac{\sum (P_i - P)^3}{N\sigma^3} \quad (3.97)$$

$$k = \frac{\sum (P_i - P)^4}{N\sigma^4} \quad (3.98)$$

où

P= pression moyenne;

P_i= pression "instantanée"

N= nombre d'observations

Un deuxième type d'information statistique intéressant est la fréquence d'occurrence d'événement qui peut être présentée de deux façons:

- a) le spectre de puissance, résultat en terme de fréquence
- b) la fonction d'autocorrelation, résultat en terme de période.

Ces deux formes sont équivalentes, l'une étant la transformée de Fourier de l'autre (Bendat et Piersol [1971]).

La fluctuation de pression peut être représentée par les paramètres hydrauliques et géométriques de la structure tel que:

$$\Delta P = f(t; x; y; z; \Delta H; v_t; y_t; v_n; y_n; L_n; v; \rho; g; R_s; L_s; C_f; T; s; \alpha) \quad (3.99)$$

où

ΔP = amplitude moyenne de la fluctuation de pression;

t = temps;

x, y, z = coordonnées du point de la mesure par rapport à un point de référence;

v = viscosité cinématique de l'eau;

ρ = masse volumique de l'eau;

Cependant, les paramètres ne sont pas tous indépendants et ne se comportent pas toujours comme des variables. Par exemple, il existe une interdépendance si on prend en considération certaines relations tels: l'équation de continuité (équation 3.100), les équations de vitesse en fonction de la charge (équation 3.101) et les relations géométriques de la structure (équation 3.102).

$$Q = v_t y_t = v_n y_n \quad (3.100)$$

$$v_t = C \sqrt{2 g \Delta H} \quad (3.101)$$

où

C = coefficient de vitesse

$$R_s = f(L_s; C_f; s; \alpha) \quad (3.102)$$

$$C_f = N_a - T \quad (3.103)$$

Si le débit est supposé constant, la dissipation peut être considérée permanente. De plus, si l'écoulement est bidimensionnel, la coordonnée z peut être négligée. Comme l'objectif de la recherche est d'analyser la pression sur le fond, le long de l'axe central du canal, la coordonnée y peut aussi être négligée et seule alors la coordonnée x , demeure importante (figure 3.37).

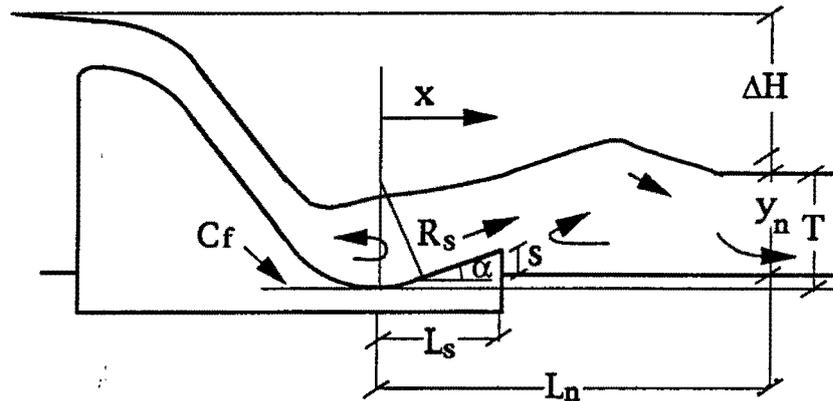


Fig. 3.37 - Schéma indiquant les paramètres hydrauliques et géométriques à considérer

Ainsi, l'amplitude de la fluctuation de pression peut être interprétée par l'expression suivante:

$$\Delta P = f(x; \Delta H; y_t; y_n; L_n; \nu; \rho; g; L_s; T; s; \alpha) \quad (3.104)$$

En utilisant l'analyse dimensionnelle, il est possible de présenter l'équation 3.104 sous plusieurs formes dont l'équation 3.105:

$$\frac{\Delta P}{\gamma y_n} = f\left(\frac{x}{L_n}; \frac{L_n}{\Delta H}; F_t; Re; \frac{y_n}{y_t}; \frac{L_s}{L_n}; \frac{T}{y_t}; \frac{s}{y_t}; \alpha\right) \quad (3.105)$$

$$Fr = \frac{v_t}{\sqrt{g y_t}} \quad (3.106)$$

$$Re = \frac{v_t y_t}{\nu} \quad (3.107)$$

$$\Delta P = \text{variation de pression} \quad (3.108)$$

Lorsque la turbulence est pleinement développée dans l'écoulement, on peut négliger l'effet de la viscosité. Selon Khader et Elango [1974], pour le ressaut hydraulique, cela se produit lorsque l'équation 3.109 est satisfaite. Lopardo [1986] a défini la relation de l'équation 3.110. Nous remarquons qu'il y a un facteur 10 entre ces deux recommandations.

$$Re_r \geq 10\ 000 \quad (3.109)$$

$$Re_r \geq 100\ 000 \quad (3.110)$$

où

Re_r = nombre de Reynolds à l'entrée du ressaut.

L'amplitude moyenne de la fluctuation de pression peut être évaluée de la façon suivante (amplitude moyenne quadratique de la fluctuation - RMS):

$$\Delta P = \sqrt{\frac{1}{T_a} \int_0^{T_a} (P_i - P) dt} \quad (3.111)$$

où

T_a = temps d'acquisition des données

En remplaçant la valeur de $\Delta P/\gamma$ par σ , nous obtenons:

$$\frac{\sigma}{y_n} = f\left(\frac{x}{L_n}; \frac{L_n}{\Delta H}; Fr_r; \frac{y_n}{y_t}; \frac{L_s}{L_n}; \frac{T}{y_t}; \frac{s}{y_t}; \alpha\right) \quad (3.112)$$

L'analyse dimensionnelle du ressaut hydraulique a été utilisée par plusieurs auteurs tels Khader et Elango [1972], Lopardo et Solari [1980], Akbari, Mittal et Pande [1982]. En général, ils ont utilisé la relation suivante:

$$C_p^* = \frac{\Delta P}{\frac{v_r^2}{2g}} = f\left(\frac{x}{y_r}; Fr_r\right) \quad (3.113)$$

où

C_p^* = coefficient de fluctuation de pression: représente une mesure de la fluctuation de pression dans le ressaut par rapport à l'énergie cinétique à l'entrée:

Nous pouvons également analyser les fréquences sous forme adimensionnelle. Pour y arriver, nous utilisons la fréquence dominante (f_d), qui représente la fréquence autour de laquelle l'énergie maximale d'oscillation se concentre qui est fonction des paramètres suivants:

$$f_d = f(t; x; y; z; \Delta H; v_t; y_t; v_n; y_n; L_n; v; \rho; g; R_s; L_s; C_f; T; s; \alpha; \sigma_x) \quad (3.115)$$

La relation suivante est une des représentations possibles que l'on peut obtenir par analyse dimensionnelle.

$$\frac{f_d y_t}{v_t} = f\left(\frac{x}{L_n}; \frac{L_n}{\Delta H}; Fr; \frac{y_n}{y_t}; \frac{L_s}{L_n}; \frac{T}{y_t}; \frac{s}{y_t}; \alpha; \frac{\sigma_x}{y_n}\right) \quad (3.116)$$

Lopardo [1986] a utilisé le nombre de Strouhal (équation 3.118) pour analyser les fréquences dans un ressaut hydraulique, à savoir:

$$S_r = \frac{f_d y_t}{v_t} = f\left(\frac{x}{y_r}; Fr_r\right) \quad (3.117)$$

Avec la relation suivante, nous pouvons aussi calculer l'échelle des fréquences pour un modèle de Froude, ainsi:

$$\frac{f_p}{f_m} = \frac{1}{\sqrt{\lambda_1}} \quad (3.118)$$

où

f_p = fréquence dominante sur le prototype;

f_m = fréquence dominante sur le modèle;

λ_1 = échelle géométrique du modèle.

3.8.3 Les fluctuations de pression dans le ressaut hydraulique

Le phénomène le plus étudié à l'aide de la fluctuation de pression est le ressaut hydraulique. Une des premières études de la turbulence dans le ressaut a été faite par Rouse, Siao et Nagaratanam [1959]. Ils ont étudié l'énergie turbulente en utilisant des modèles d'air.

Elder [1961] a fait une des premières études quantitatives sur la fluctuation de pression dans l'eau. Il a conclu que l'amplitude et la fréquence sont directement liées au nombre de Froude d'écoulement.

Bowers, Tsai et Kuha [1967] ont présenté les résultats des études faites pour le barrage de Karnafuli. Ils ont recommandé de tenir compte des effets de la fluctuation de pression dans l'étude structurale d'un projet.

Vasiliev et Bukreyev [1967] et King [1967] ont abordé la fluctuation de pression en utilisant la transformée de Fourier.

Resch et Leutheusser [1971 et 1972] ont montré que les conditions à l'entrée peuvent changer le développement de la turbulence dans le ressaut.

Abdul-Khader et Elango [1974] ont présenté les résultats de l'étude de la fluctuation de pression pour des nombres de Froude compris entre 4,7 et 6,6. Leurs résultats sont similaires à ceux de Bukreyev [1967]. Ils ont recommandé l'utilisation de Re_T plus grand que 10 000.

Lopardo et Solari [1980] ont étudié la fluctuation de pression pour une plage de nombre de Froude comprise entre 2,5 et 7,5.

Akabari, Mittal et Pande [1982] ont utilisé l'analyse adimensionnelle et ont fait une comparaison de la fluctuation de pression pour un ressaut libre et un ressaut fort.

Spoljaric, Maksimovic et Hajdin [1982] ont présenté un procédé pour obtenir les caractéristiques stochastiques de la force dynamique engendrée par la fluctuation de pression.

Lopardo, Lio et Vernet [1982] ont abordé le phénomène de la cavitation en étudiant la fluctuation de pression.

Lopardo [1986] a mesuré la fluctuation de pression pour des nombres de Froude compris entre 4,5 et 10,0. Il a fait les recommandations suivantes sur les conditions d'essais:

- a) $Re_r \geq 100\ 000$;
- b) $y_r \geq 3$ cm;
- c) temps d'acquisition de données ≥ 60 s;
- d) fréquence d'acquisition entre 50 et 100 Hz;
- e) longueur du tuyau entre la prise de pression et le capteur ≤ 55 cm.

Toso [1986] a étudié l'influence de l'angle à l'entrée de l'évacuateur (0° , 15° , 30° et 45°) sur la distribution de la fluctuation de pression du ressaut hydraulique pour un nombre de Froude compris entre 2,5 et 10,0.

Lopardo, Chividini et Berrilio [1987] ont montré que les ressauts formés en aval des vannes sont plus turbulents que les ressauts formés en aval des évacuateurs.

Endres [1990] a analysé la fluctuation de pression en aval d'un évacuateur pour des nombres de Froude compris entre 4,5 et 10,0. Ses résultats ont la même tendance que ceux de Lopardo [1986].

Marques [1991] a utilisé les données présentées par Endres [1990] et il a montré que la connaissance des conditions d'entrée est très importante pour comparer les résultats des différents auteurs. Il a aussi suggéré qu'on utilise la hauteur du ressaut ($y_1 - y_r$) comme paramètre pour représenter la position relative de la fluctuation de pression, parce que de cette façon, nous pouvons regrouper les points caractéristiques du ressaut.

Fiorotto et Rinaldo [1992] ont utilisé la fluctuation de pression pour déterminer les forces appliquées sur les tirants d'une plaque placée au fond d'un bassin de dissipation.

Drapeau, Marques et Verrette [1995] ont eu recours à des relations adimensionnelles différentes de celles habituellement utilisées (équations 3.119 et 3.120). Elles ont permis de regrouper les résultats de différents écoulements (figure 3.35 et 3.36), de trouver la perte de charge ponctuelle et de caractériser les points d'intérêt du ressaut hydraulique avec l'aide des graphiques des coefficients de fluctuation de pression et d'asymétrie (figure 3.38).

$$\frac{\sigma_x y_1}{\Delta H y_r} = f\left(\frac{x}{y_1 - y_r}\right) \quad (3.119)$$

$$\frac{P_x - y_r}{(y_1 - y_r)} = f\left(\frac{x}{y_1 - y_r}\right) \quad (3.120)$$

où

$\frac{\sigma_x}{\Delta H}$ = relation entre la fluctuation de pression et la perte de charge;

$\frac{y_1}{y_r}$ = relation entre les hauteurs conjuguées.

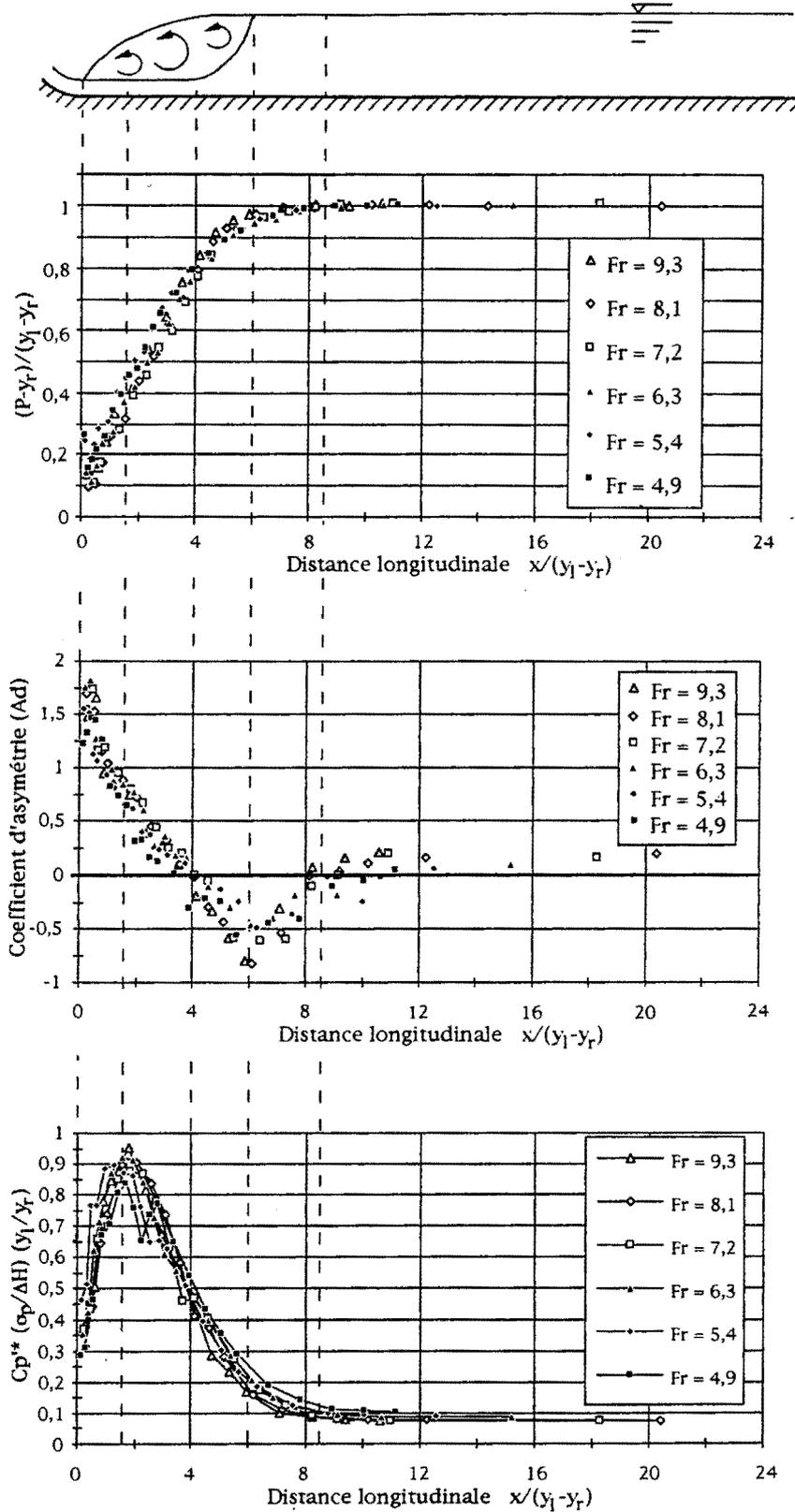


Fig. 3.38 - Mise en relation du ressaut hydraulique et des graphiques de la pression moyenne, du coefficient d'asymétrie et du coefficient de fluctuation de pression (Drapeau, Marques et Verrette [1995])

Ils ont déterminé quatre (4) positions caractéristiques pour décrire le ressaut:

$L_{\sigma_{\max}}$ = position correspondante à la plus haute fluctuation de pression

L_t = position où le coefficient d'asymétrie (A_d) coupe l'axe des l'abscisse.

Cet endroit coïncide avec la position à partir de laquelle la composante verticale de la vitesse commence à être significative.

L_a = position où la distribution du coefficient d'asymétrie (A_d) passe par un minimum. Cet endroit coïncide avec la position où le jet principal est réparti sur toute la profondeur de l'écoulement, mais l'écoulement est encore instable.

L_n = position où fini l'influence du ressaut sur l'écoulement.

En ce qui concerne le ressaut hydraulique libre, les conclusions sont:

- a) La plupart des travaux sont faits pour un ressaut en aval d'une vanne ainsi qu'en aval d'un évacuateur; nous pouvons citer King [1967], Khader et Elango [1974], Toso [1986], Lopardo [1986], Endres [1990], Drapeau [1995];
- b) Le point de fluctuation maximale peut être estimé par les équations 3.121 et 3.121 (Drapeau, Marques et Verrette [1995]).

$$\frac{x}{y_r} = 2(F_r - 1) \quad (3.121)$$

$$\frac{x}{y_1 - y_r} = 1,75 \quad (3.122)$$

- c) La fréquence dominante est plus faible que 3,5 Hz;
- d) Il est difficile de comparer les résultats des différents auteurs parce qu'on ne connaît pas toujours les paramètres d'entrée, de profondeur et de vitesse;
- e) Les travaux effectués jusqu'à aujourd'hui ont beaucoup aidé à comprendre la turbulence dans le ressaut hydraulique et ses effets sur les structures.

Certains auteurs ont étudié le ressaut submergé; Narasimhan et Bhargava [1976], Pinto, Vasconcellos et Seyssel [1988], mais jusqu'à présent, il n'y a pas encore de conclusions à ce sujet.

3.8.4 La fluctuation de pression en aval dissipateurs à auge et rampe ascendante

Pour les dissipateurs à auge et rampe ascendante, le comportement de la macroturbulence en aval de la structure, ainsi que le transfert des efforts sur le radier sont encore inconnus.

Tamada [1988] a fait une étude comparative entre ces types de structure pour un nombre de Froude compris entre 1,5 et 4,5. Il a alors conclu que l'angle idéal de sortie devrait être situé entre 15° et 25° . La figure 3.39, montre une partie de ses résultats.

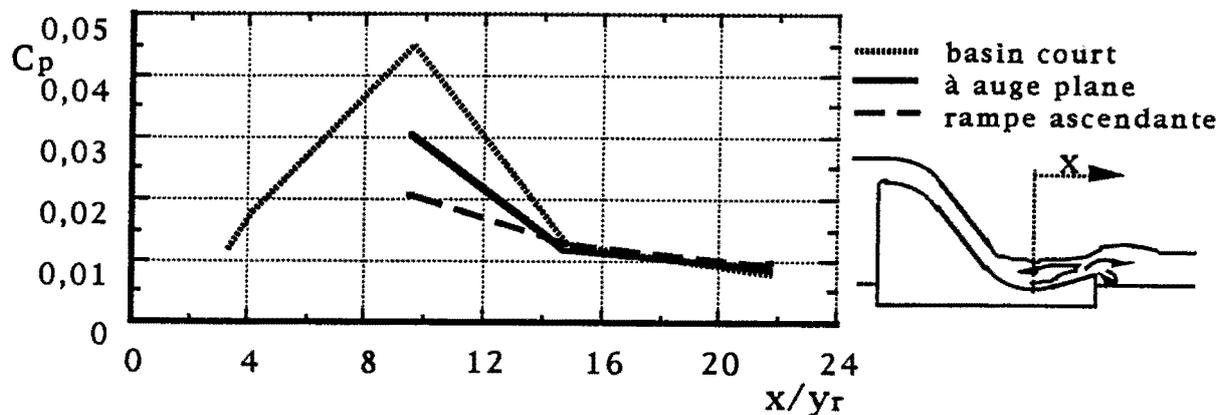


Fig. 3.39 - Coefficient de fluctuation de pression en aval des structures à auge ($Fr=2,4$) - Tamada [1989]

Marques [1991] a étudié les dissipateurs à auge pour des nombres de Froude compris entre 4,5 et 10,0 et un coefficient de submersion (D_s)

égal à 1. Il a conclu que, dans ces conditions, la structure peut fonctionner de façon différente en fonction du nombre de Froude et de l'angle de sortie. Il a également suggéré que la cote de sortie soit un facteur important et qu'elle doit être étudiée comme une variable indépendante.

Les études faites sur la fluctuation de pression en aval des dissipateurs à auge et rampe ascendante ne sont pas concluantes. Ceci est du au fait qu'il manque des études plus détaillées sur la distribution de pression et de la fluctuation de pression et ainsi que sur l'influence des paramètres géométriques et hydrauliques.

CHAPITRE IV

MÉTHODOLOGIE ET ÉLABORATION DU PROGRAMME DE RECHERCHE

4.1 Généralités

Comme nous l'avons dit auparavant, ce travail est une étude expérimentale qui a pour but de regrouper les critères de dimensionnement des dissipateurs d'énergie hydraulique à auge. Pour atteindre ce but, nous avons réaliser les étapes suivantes:

- a) comparer les deux (2) types de structures courtes (auge et rampe ascendante) avec la condition sans dissipateur (égale au bassin type I);
- b) analyser la distribution de pression moyenne et la distribution de fluctuation de pression en aval des dissipateurs;
- c) analyser l'influence des paramètres géométriques et hydrauliques sur la distribution de pression et la distribution de fluctuations de pression;
- d) définir les critères de base de dimensionnement.

4.2 Installation et modèle physique

Pour effectuer la partie expérimental, nous avons construit un modèle réduit dans le laboratoire d'hydraulique du département de génie civil de l'Université Laval. Le modèle est constitué d'un canal à fond horizontal de 12,0 m de longueur par 0,60 m de largeur et 1,5 m de hauteur (figure 4.1). Une des parois du canal comporte trois (3) fenêtres de 2,0 m de longueur par 1,2 m de hauteur, à travers lesquelles nous pouvons observer l'écoulement sur le dissipateur et en aval de ce dernier (voir photos 3.1 à 3.3).

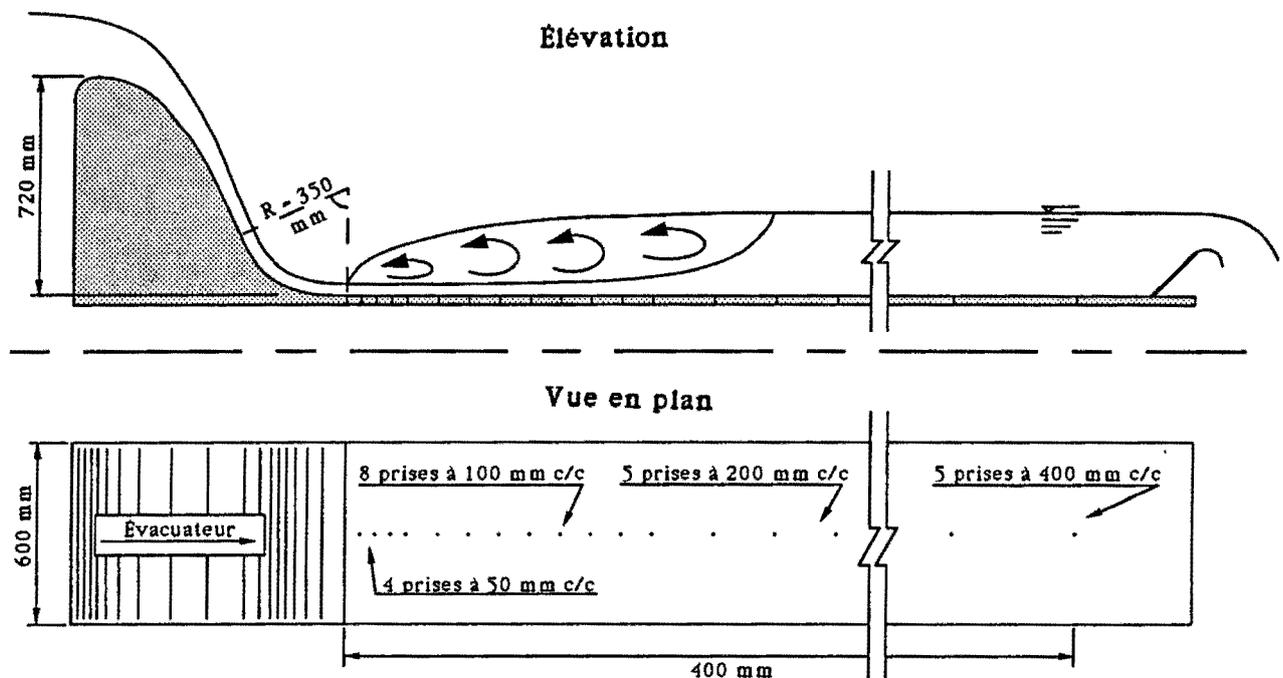


Fig. 4.1 - Schéma du modèle

L'élément de base du canal est formé par un évacuateur de type Creager. Au pied de cet évacuateur, différentes structures furent installées sans modifier la cote du radier du canal. Furent aussi placées le long de l'axe central du canal, vingt-deux (22) prises de pression sur une distance de 4,0 m. L'espacement entre les prises variait entre 50 et 400 mm (figures 4.1 à 4.3), fixé de façon à permettre une bonne connaissance de

la variation de pression dans la région où se produit la dissipation d'énergie. Comme il n'existe pas de travail détaillé sur la fluctuation de pression pour le dissipateur à auge, la position des prises a été basée sur les résultats fournis par Elder [1964], Khader [1973], Lopardo [1987] et Endres [1991] pour le ressaut hydraulique en aval d'un évacuateur.

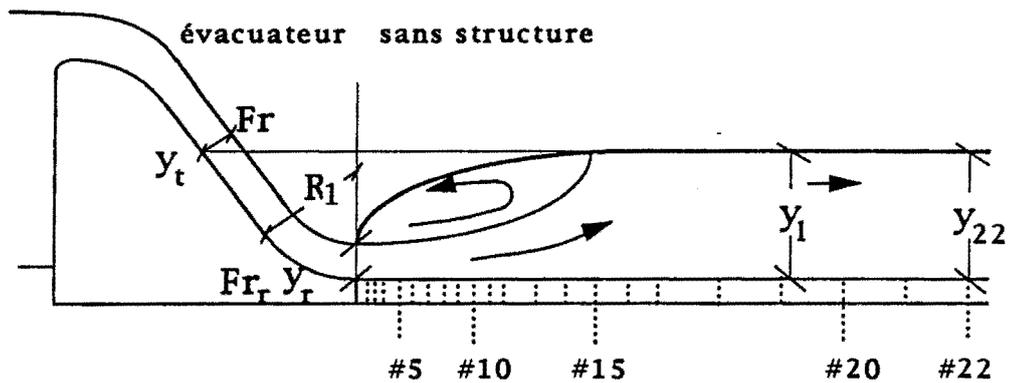


Fig. 4.2 - Schéma du modèle pour la condition sans dissipateur (égale au bassin type I)

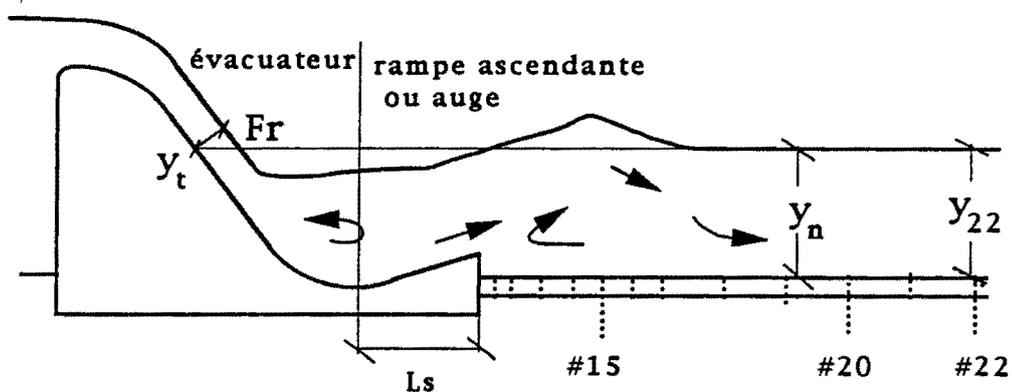


Fig. 4.3 - Schéma du modèle pour la structure de type rampe ascendante

L'alimentation du modèle est assurée par un circuit hydraulique relié à un réservoir de charge à niveau constant ayant une capacité de 200 l/s. La régularisation du débit s'effectue par un système de vannes qui permet d'obtenir le débit désiré. À l'extrémité aval du canal, une vanne permet d'ajuster le niveau d'eau en aval de l'évacuateur (figure 4.1).

4.3 Conditions des essais

Normalement, pour caractériser l'écoulement d'un bassin type I, le nombre de Froude (Fr_r) de référence est calculé à l'entrée de la structure en amont du ressaut (figure 4.2). Pour les structures à auge et rampe ascendante, il n'y a pas site de référence unique pour calculer le nombre de Froude. Chaque auteur adopte une position pour calculer le nombre de Froude ou son équivalent (chapitre 3.4.2). Dans ce travail le nombre de Froude (Fr) de référence qui caractérise l'écoulement est calculé sur l'évacuateur à la hauteur correspondante au niveau d'eau en aval (figures 4.2 et 4.3). Cette position est la même utilisée par Perteka [1957] et le U.S.B.R. [1987]. Elle a été choisie parce que l'écoulement n'a pas encore subi l'influence de la structure de dissipation et il est facile à déterminer.

Le programme de mesure comportait six (6) écoulements bien répartis dans la plage du nombre de Froude (Fr) compris entre 3,0 et 8,0, comme le montre le tableau 4.1.

Q (l/s)	v_r (m/s)	y_r (mm)	Fr_r -	Re_r (10^3)	y_l (mm)	ΔH (mm)	v_t (m/s)	y_t (mm)	Fr -	Re (10^3)
163	4,00	68	4,9	272	426	515	2,98	91	3,2	272
127	3,92	54	5,4	212	373	537	3,03	70	3,6	212
87	3,83	38	6,3	146	301	569	3,11	47	4,6	146
63	3,76	28	7,2	102	247	696	3,17	33	5,5	101
48	3,72	22	8,1	78	218	607	3,19	25	6,4	80
35	3,67	16	9,3	59	186	621	3,22	18	7,6	59

Note: voir les figures 4.2 et 4.3

Tab. 4.1 - Paramètres du modèle pendant les essais

De façon à avoir pour un débit donné la même condition d'entrée et de sortie, nous avons utilisé toujours la même profondeur d'eau à la prise 22 (y_{22}). Cette dernière a été choisie comme prise de contrôle, parce qu'elle se situe toujours hors de la région perturbée par la dissipation. La hauteur d'eau à la prise 22, a été fixée tel que le début du ressaut hydraulique coïncide avec la fin du rayon de concordance (R_1) de l'évacuateur (figure 4.2).

Les valeurs de la hauteur conjuguée lente (y_l) ont été mesurées en aval du ressaut à l'endroit où les pressions minimales, moyennes et maximales et même l'écart type devenaient presque constants. Les valeurs trouvées pour y_l sont légèrement plus faibles que les valeurs suggérées par l'équation de Bélanger (figure 4.4). Rappelons toutefois que ce dernier n'avait pas tenu compte de certains facteurs comme:

- a) la perte de charge par friction;
- b) la fluctuation de vitesse dans les sections d'entrée et de sortie du ressaut.

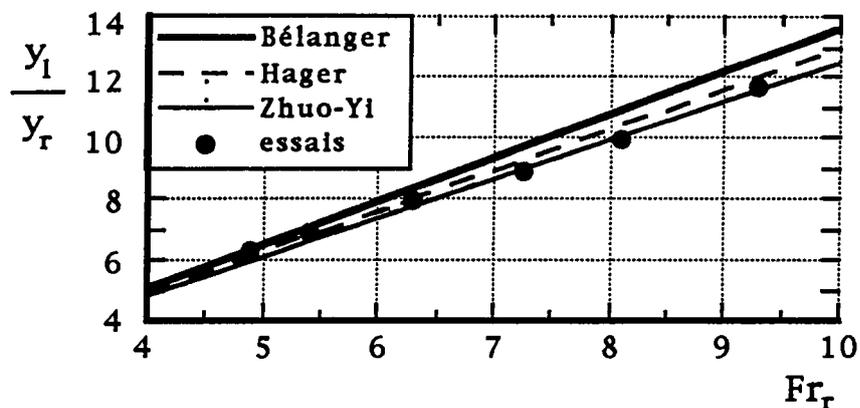


Fig. 4.4 - Relation entre les hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude

Les valeurs de y_l/y_r se comparait par contre très bien avec les valeurs suggérées par Rajaratnam [1965], Hager et Bremen [1989] et Zhuo-Yi [1991] (figure 4.4).

4.4 Choix des structures étudiées

Nous avons partagé les paramètres qui influencent la dissipation d'énergie en paramètres hydrauliques et géométriques (figure 4.5).

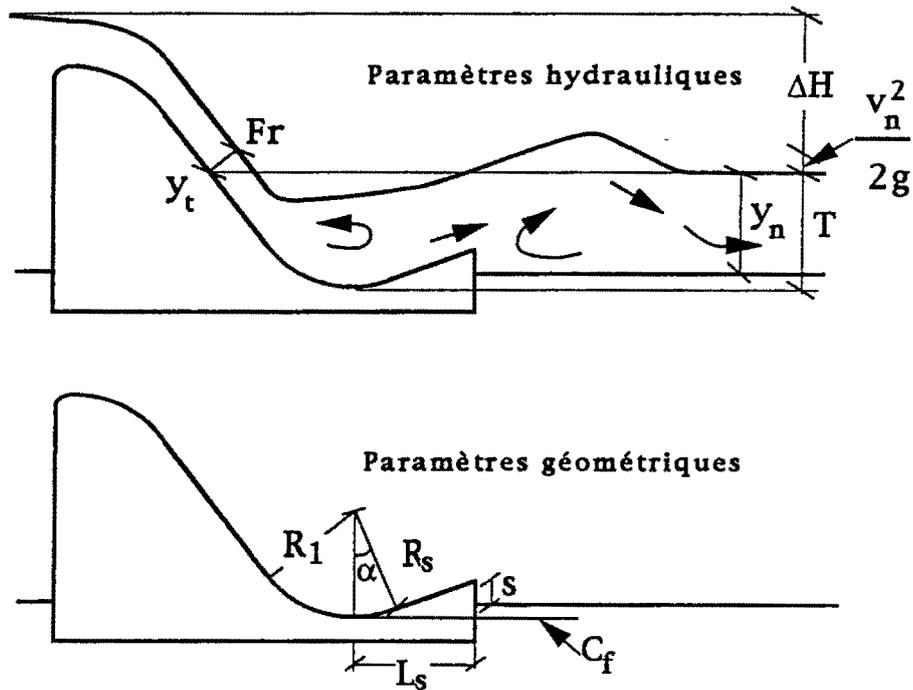


Fig. 4.5 - Paramètres hydrauliques et géométriques

Comme il a été indiqué au chapitre 3.8.2, la plupart de ces paramètres sont dépendants entre eux. Les paramètres jugés les plus significatifs sont regroupés dans le tableau 4.2.

Hydrauliques	Géométriques
Perte de charge totale (ΔH)	Angle de sortie (α)
Hauteur d'eau à l'entrée (y_t)	Hauteur de sortie (s)
Nombre de Froude (Fr)	Rayons (R_s et R_1) $R_s = R_1$
Hauteur d'eau en aval (y_n)	Longueur (L_s) $L_s = f(R_s; C_f; s; \alpha)$
	Calage de l'auge (C_f) $C_f = y_n - T$

Tab. 4.2 - Paramètres significatifs

Pour analyser l'influence de toutes ces variables, il est nécessaire d'étudier un grand nombre de structures¹. Pour réduire ce nombre, nous avons décidé de considérer le rayon (R_s) comme une variable de moindre importance. Son seul rôle est de faire la concordance entre l'évacuateur et le dissipateur. Pour cette raison, nous avons adopté un rayon (R_s) constant égal à 350 mm. Cette valeur représente un rayon moyen obtenu à partir des critères de dimensionnement proposé par différents chercheurs (figure 4.6) pour les conditions d'essais de ce travail (tableau 4.1).

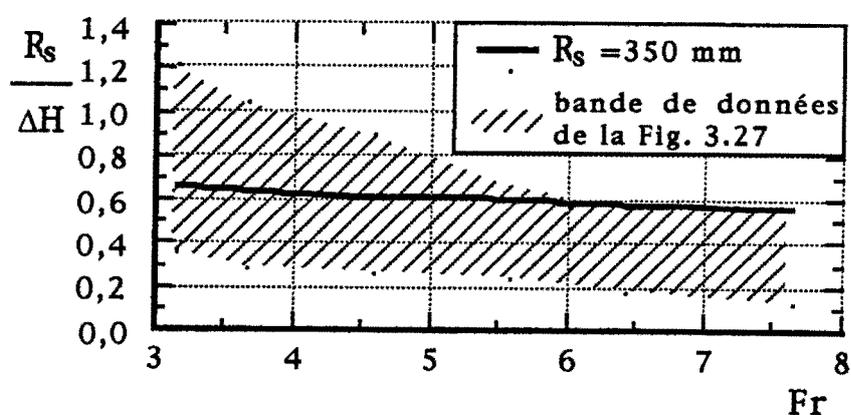


Fig. 4.6 - Valeur utilisée de R_s (350 mm) pour rapport aux valeurs proposées par différents chercheurs

Notre programme propose l'étude de quatre (4) angles de sortie (α), de quatre (4) cotes de fond (C_f) et des longueurs qui variant entre 250 et 750 mm, tel que montré au tableau 4.3. Un total 44 structures différentes ont été étudiés (tableau 4.3).

¹ Par exemple: il faudrait étudier 193 structures différentes pour étudier les dissipateurs à auge avec 4 rayons (R_s), 4 longueurs (L_s), 4 cotes de fond (C_f) et 3 angles de sortie (α) en plus du bassin type I (condition sans dissipateur).

α	R_s	C_f	L_s (mm)							Total	
			0	250	300	350	450	550	650		750
0	350	0	*	-	-	-	-	-	-	-	1
15	350	0	-	*	-	*	*	*	-	-	4
		-32	-	*	-	*	*	*	-	-	4
		-64	-	-	-	*	*	*	*	*	5
		-96	-	-	-	-	*	*	*	*	4
30	350	0	-	*	*	*	-	-	-	-	3
		-32	-	*	*	*	*	-	-	-	4
		-64	-	*	*	*	*	-	-	-	4
		-96	-	-	*	*	*	-	-	-	3
45	350	0	-	*	*	*	-	-	-	-	3
		-32	-	*	*	*	-	-	-	-	3
		-64	-	*	*	*	-	-	-	-	3
		-96	-	*	*	*	-	-	-	-	3
Nb de structures			1	9	8	11	7	4	2	2	44

* structure étudiée

Tab. 4.3 - Caractéristiques des structures étudiées

La comparaison des résultats obtenus sur plusieurs structures permet d'analyser l'influence des différents paramètres sur l'efficacité du ressaut. Par exemple, on peut analyser la relation entre:

- a) l'angle de sortie (α) et la longueur (L_s), pour différents nombres de Froude, pour des valeurs constantes de la cote de fond (C_f) et de la hauteur de sortie (s) - figure 4.7;

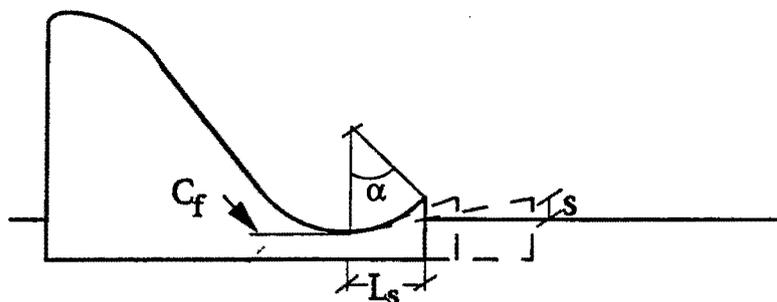


Fig. 4.7 - Influence de l'angle de sortie (α) et de la longueur (L_s)

- b) la longueur (L_s) et la hauteur de sortie (s), selon différents nombres de Froude, avec des valeurs constantes de l'angle de sortie (α) et de la cote de fond (C_f) - figure 4.8;

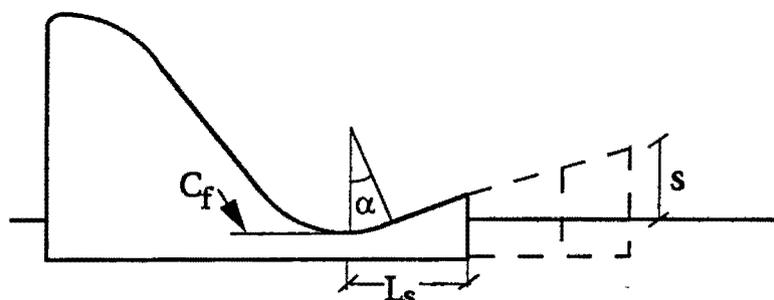


Fig. 4.8 - Influence de la longueur (L_s) et de la hauteur de sortie (s)

- c) la cote de fond (C_f) et la hauteur de sortie (s), selon différents nombres de Froude, avec des valeurs constantes de l'angle de sortie (α) et de la longueur de la structure (L_s) - figure 4.9.

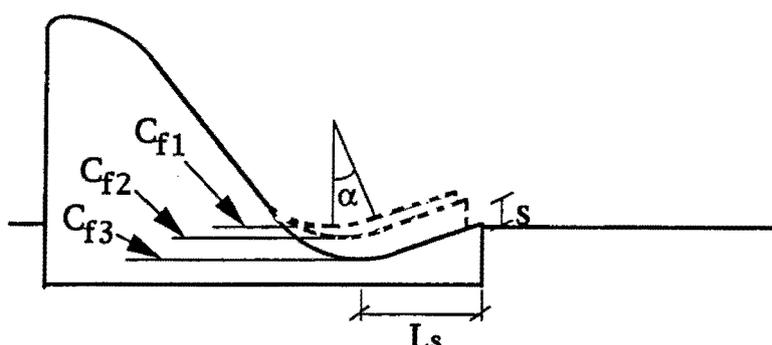


Fig. 4.9 - Influence de la cote de fond (C_f) et de la hauteur de sortie (s)

4.5 Prise de mesures

Nous avons utilisé des capteurs de pression de marque Oméga, modèle PX800-005GV, comportant un diaphragme en cristal de silicium et une jauge de déformation. Ces capteurs peuvent mesurer une pression qui varie entre ± 5 PSIG ($\pm 3,5$ m d'eau) avec une précision de $\pm 0,1\%$ fso (full scale output), ce qui correspond à $\pm 3,5$ mm d'eau. Pour faire la calibration du capteur, ce dernier a été relié à un tube piézométrique

rempli d'eau et nous avons comparé les pressions lues sur le capteur avec les hauteurs d'eau. Ce processus a été répété selon plusieurs autres hauteurs. Cela nous a permis de tracer la courbe de calibration du capteur (figure 4.10).

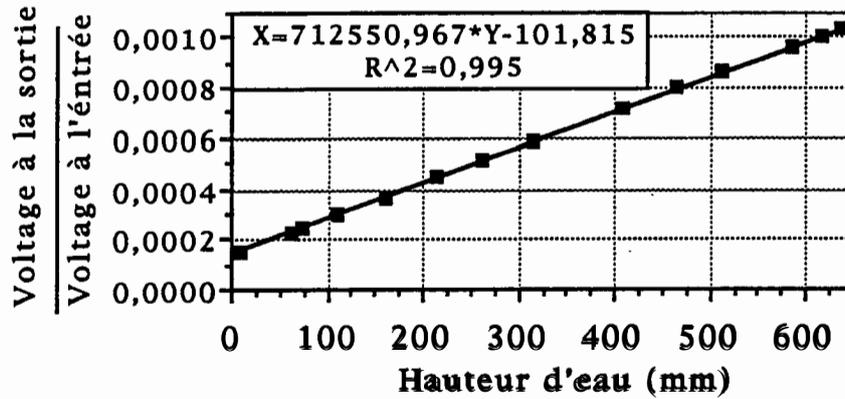


Fig. 4.10 - Courbe de calibration du capteur de pression

La figure 4.11 montre, après calibration, la différence obtenue entre les données mesurées par le capteur et les valeurs lues sur le tube piézométrique. La différence maximale a été de $\pm 2,5$ mm d'eau.

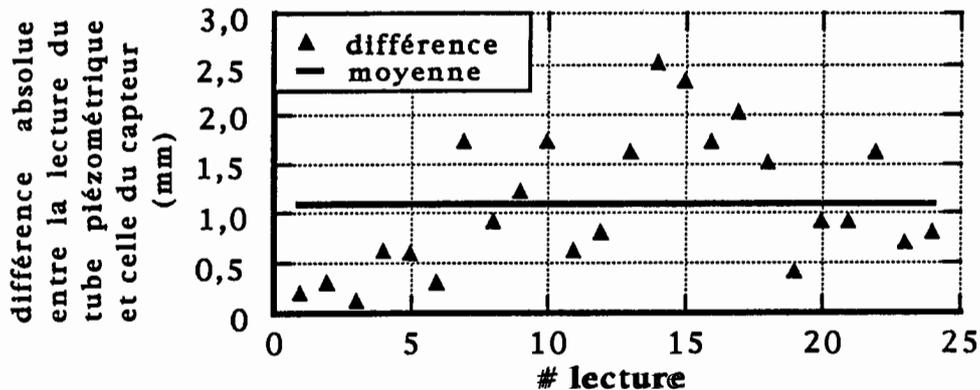


Fig. 4.11 - Différence absolue entre la lecture du capteur de pression et celle du piézomètre

Les pressions mesurées par le capteur étaient recueillies à l'aide d'un système d'acquisition de données de marque Hewlett-Packard, modèle

HP3852A équipé d'un voltmètre à haute vitesse (HP44702A) et d'un multiplexeur FET à haute vitesse (HP44711A).

Le capteur a été installé à l'extérieur du canal, exactement au même niveau que le radier. À chaque site de mesure, le capteur était relié à la prise de pression par un tube de 500 mm de longueur et 6,4 mm de diamètre conformément aux recommandations d'Akbari, Mittal et Pande [1982] et Lopardo et Henning [1985].

Selon Akbari, Mittal et Pande [1982], Lopardo Henning [1985] et Toso et Bowers [1987], il est préférable d'utiliser une fréquence minimale d'acquisition de données de 50 Hz et un temps d'acquisition supérieur à 60 secondes. Nous avons donc fixé notre choix sur une fréquence de 50 Hz et un temps de 200 s, de façon à obtenir des échantillons de 10 000 données.

Pour effectuer les mesures et l'analyse des données, un programme développé par Drapeau [1995] sur un ordinateur de marque Hewlett-Packard, modèle HP-85 a été utilisé. Ce programme permet la mesure de données et procède ensuite aux calculs statistiques (moyenne, maximum, minimum, écart type, coefficient d'asymétrie, coefficient de aplatissement, distribution de probabilité, autocorrélation, spectre de puissance). Ceci a permis de comparer les résultats et de détecter les problèmes de mesure avant même de passer à une autre prise de pression.

4.6 Méthodologie d'analyse des données

Rappelons que dans un écoulement turbulent la pression varie d'une façon aléatoire par rapport à une valeur moyenne. Le phénomène doit donc être analysé sur une base stochastique.

Comme il fut montré au chapitre 3.7.1, il y a plusieurs paramètres qui entrent dans le phénomène de la dissipation d'énergie. Ils peuvent être représentés par des équations réduites. L'équation ci-dessous (égale à équation 3.113) est un des regroupements possibles.

$$\frac{\sigma_x}{y_n} = f\left(\frac{x}{L_n}; \frac{L_n}{\Delta H}; F_t; \frac{y_n}{y_t}; \frac{L_s}{L_n}; \frac{T}{y_t}; \frac{s}{y_t}; \alpha\right) \quad (4.1)$$

Le coefficient de fluctuation de pression (C_p) tel que défini au paragraphe 3.8.2 est utilisé dans cette étude, pour faire l'analyse de la dissipation d'énergie en aval des dissipateurs (chapitre 3.7.2). Ce coefficient est le rapport en un point donné entre l'écart type de l'échantillon (σ_x) et l'énergie cinétique à l'entrée du dissipateur. Dans ce travail la relation suivante fut considérée:

$$C_p = \frac{\sigma_x}{\frac{v_f^2}{g}} = f(x; F_r) \quad (4.3)$$

De plus l'influence de chacun des paramètres de l'équation 4.1 fut établi par l'analyse de la distribution de pression et de la fluctuation de pression en aval de la structure, de façon à déterminer les dimensions optimales de la structure et définir les critères de base de dimensionnement.

CHAPITRE V

ANALYSE DES RÉSULTATS

5.1 Introduction

Cette recherche est basée sur l'analyse des distributions de pression et de la fluctuation de pression en aval de la structure. Pour atteindre ce but, nous avons abordé les aspects suivants:

- a) Comparer le fonctionnement des différentes formes de dissipateurs tels le dissipateur à auge, la rampe ascendante et la condition sans structure. Ce dernier correspond à la forme limite des deux autres (chapitre 3.1);
- b) Analyser les distributions de pression et de fluctuation de pression en aval de ces dissipateurs;
- c) Analyser l'influence des paramètres géométriques et hydrauliques sur la dissipation en aval de la structure;
- d) Proposer les critères de base de dimensionnement.

5.2 Observation visuelle

L'analyse visuelle du fonctionnement des 264 essais¹ a été complétée par un ensemble de photos et d'enregistrements en vidéo qui ont permis de voir le comportement détaillé de l'écoulement pour chaque structure.

5.2.1 Condition de submersion des structures

Nous avons constaté que les structures peuvent fonctionner de façon différente pour des conditions hydrauliques identiques (q , ΔH , y_t , Fr) selon la forme de la structure (α , L_s , C_f). L'écoulement sans dissipateur fonctionne comme un ressaut hydraulique² situé au pied de l'évacuateur (photo 5.1). Les autres structures peuvent ou non fonctionner submergées. Par exemple, sur les photos 5.2 à 5.4, seul l'angle de sortie varie et nous observons que l'écoulement est non submergé pour l'angle de 15° (photo 5.2) et submergé pour les angles de 30° et 45° (photos 5.3 et 5.4).

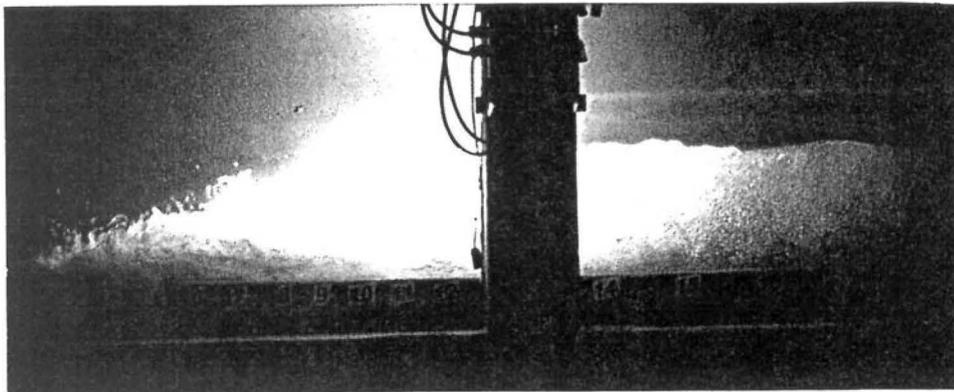


Photo 5.1 - Condition sans structure ($\alpha=0^\circ$) - ressaut hydraulique -
 $Fr = 4,6$

¹ Nous avons essayé 44 structures avec 6 nombres de Froude différents.

² Si la profondeur d'eau en aval (y_n) est égal à profondeur d'eau lente (y_l) - chapitre 3.2.

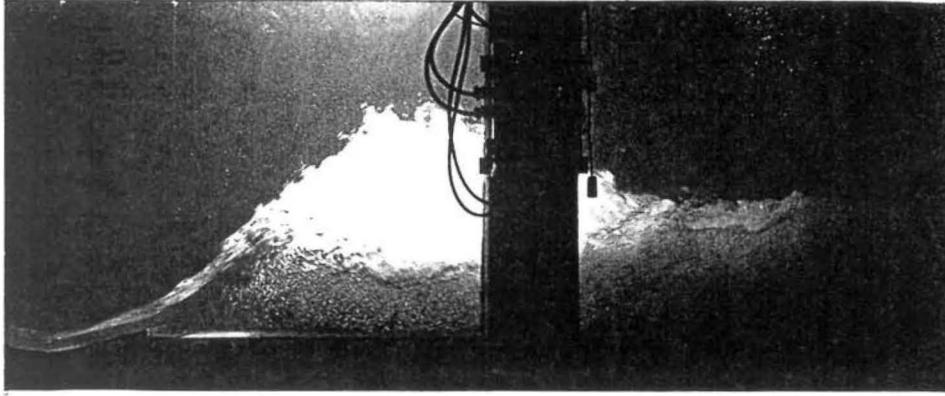


Photo 5.2 - Structure non submergée
 ($\alpha = 15^\circ$; $C_f = -32$ mm; $L_s = 250$ mm et $Fr = 4,6$)

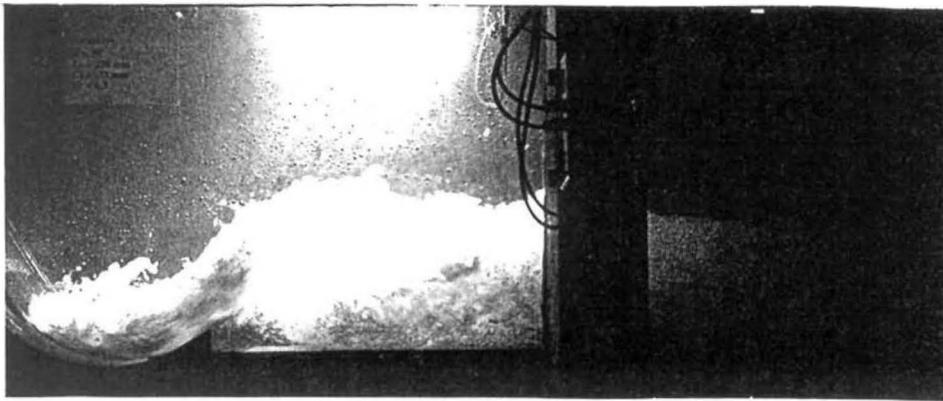


Photo 5.3 - Structure submergée
 ($\alpha = 30^\circ$; $C_f = -32$ mm; $L_s = 250$ mm et $Fr = 4,6$)

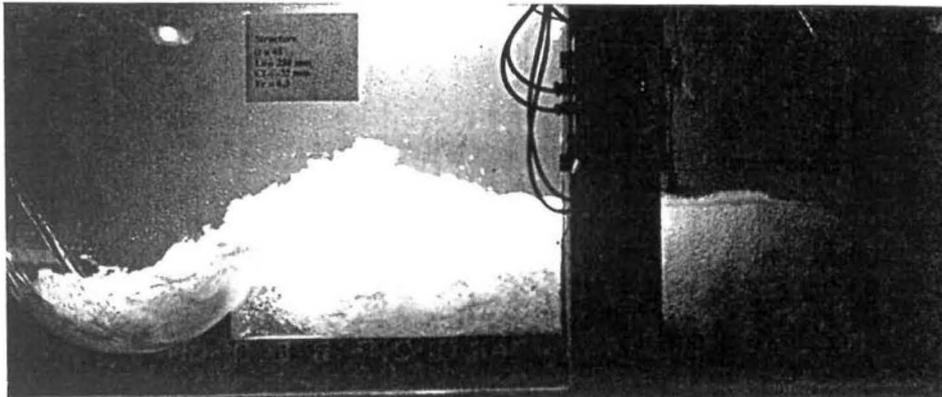


Photo 5.4 - Structure submergée
 ($\alpha = 45^\circ$; $C_f = -32$ mm; $L_s = 250$ mm et $Fr = 4,6$)

Également, nous observons que, selon le nombre de Froude de l'écoulement (Fr), une même géométrie de structure peut fonctionner

submergée ou non. Lorsqu'elle est submergée pour un nombre de Froude, elle le sera aussi pour les nombres de Froude plus faibles (photos 5.3, 5.5 à 5.7).

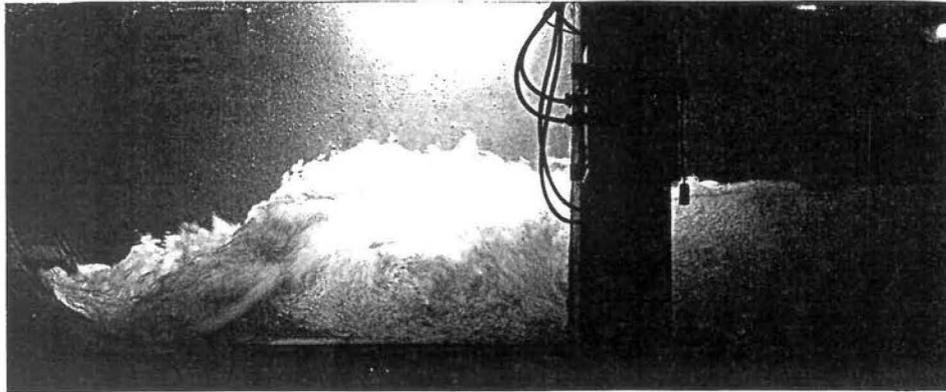


Photo 5.5 - Structure submergée
($\alpha=30^\circ$; $C_f=-32$ mm; $L_s=250$ mm et $Fr=3,6$)

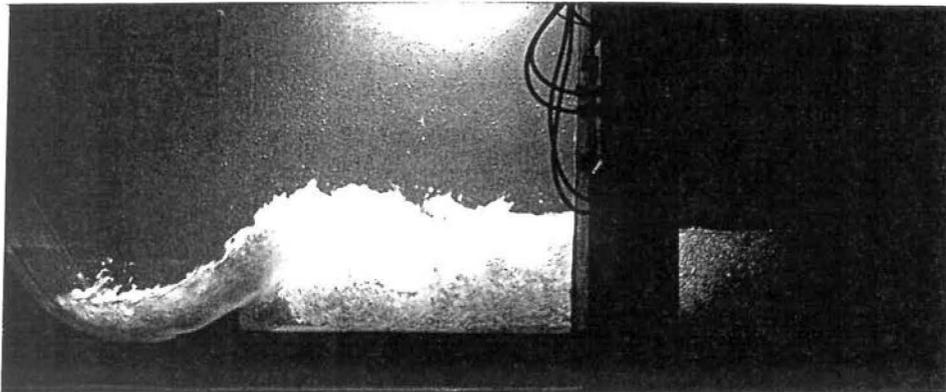


Photo 5.6 - Structure submergée
($\alpha=30^\circ$; $C_f=-32$ mm; $L_s=250$ mm et $Fr=5,5$)

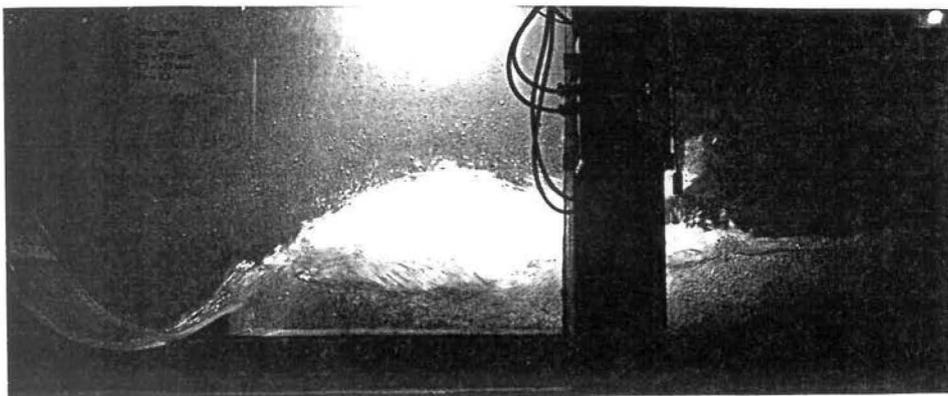


Photo 5.7 - Structure non submergée
($\alpha=30^\circ$; $C_f=-32$ mm; $L_s=250$ mm et $Fr=6,4$)

En conservant les mêmes conditions hydrauliques (q , ΔH , y_t , Fr) et en analysant l'influence de chaque paramètre géométrique isolé (tableau 5.1), nous pouvons constater que la structure a tendance à fonctionner submergé dans les conditions suivantes:

- a) Lorsque la cote de fond (C_f) est haut et l'angle de sortie (α) est élevé, toutes autres conditions demeurant constantes. Ce comportement peut être expliqué par l'augmentation de la composante de la quantité de mouvement (force d'impact) à la sortie de la structure diminue ce qui facilite le déplacement vers l'amont de la profondeur y_n .
- b) Lorsque la cote de fond est plus basse, toutes autres conditions demeurant constantes, sauf la cote de sortie (C_s). Plus la cote de fond (C_f) baisse, plus la submersion de la structure devient facile parce que la hauteur d'eau (T) sur le fond de la structure augmente.
- c) Lorsque la longueur (L_s) est plus courte, toutes autres conditions demeurant constantes sauf la hauteur de sortie (s). Les structures plus courtes présentent une hauteur d'eau à la sortie plus grande ce qui contribue à freiner l'écoulement.

D'une façon générale, nous pouvons conclure à partir de l'analyse des résultats que la submersion de la structure est fonction de Fr , α , T et s (figure 5.1). Les résultats présentés à la figure 5.2 sont bien décrits par l'équation suivante:

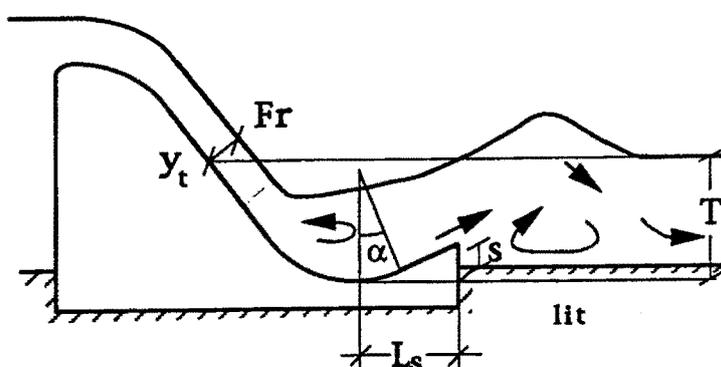


Fig. 5.1 - Schéma de la structure

$$\frac{(T - s)}{y_t} \geq a Fr^b \quad (5.1)$$

$$a = 1,78 - 1,10 \tan \alpha \quad (5.2)$$

$$b = 0,88 + 0,27 \tan \alpha \quad (5.3)$$

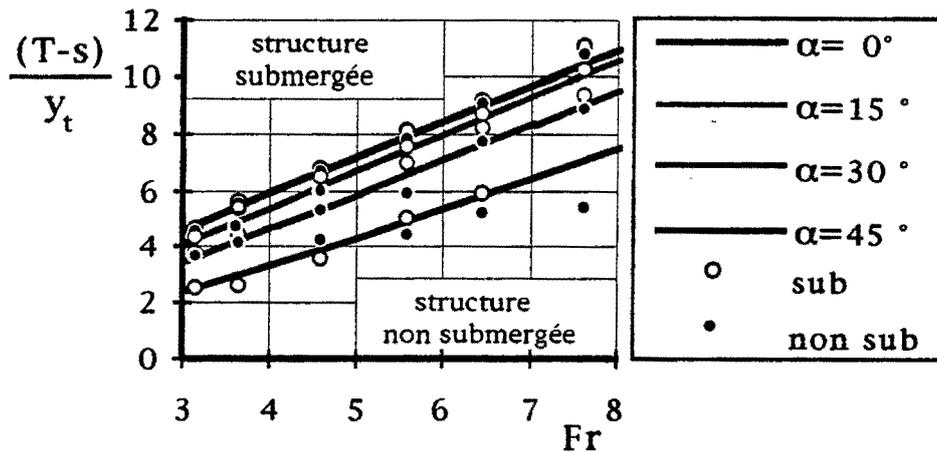


Fig. 5.2 - Conditions pour obtenir la submersion de la structure

L'équation 5.1 peut donner, dans certaines cas, une valeur de T plus petite que la hauteur d'eau en aval de la structure de la profondeur (y_n). Cet aspect est observé, lorsque l'écoulement présente un nombre de Froude faible, une hauteur d'eau aval (y_n) haute et un angle de sortie (α) élevé. Nous arrivons au même type de conclusions quand nous examinons en détail le critère de Peterka [1957] (figure 3.17). Cependant, il est difficile de se prononcer sur ce point étant donné que cette condition n'a pas été étudiée lors de nos essais. A priori, il serait raisonnable d'adopter $T \geq y_1$.

α	C_f (mm)	L_s (mm)	Fr					
			3,1	3,6	4,6	5,5	6,4	7,6
0°	0	0	sub	sub	sub	sub	sub	sub
15°	0	250	non	non	non	non	non	non
		350	non	non	non	non	non	non
		450	non	non	non	non	non	non
		550	non	non	non	non	non	non
	-32	250	sub	non	non	non	non	non
		350	non	non	non	non	non	non
		450	non	non	non	non	non	non
		550	non	non	non	non	non	non
	-64	350	sub	sub	sub	sub	sub	sub
		450	sub	sub	sub	sub	sub	sub
		550	sub	non	non	non	non	non
		650	non	non	non	non	non	non
		750	non	non	non	non	non	non
	-96	450	sub	sub	sub	sub	sub	sub
		550	sub	sub	sub	sub	sub	sub
		650	sub	sub	sub	sub	sub	sub
750		sub	sub	sub	sub	sub	sub	
30°	0	250	non	non	non	non	non	non
		300	non	non	non	non	non	non
		350	non	non	non	non	non	non
	-32	250	sub	sub	sub	sub	non	non
		300	sub	sub	non	non	non	non
		350	sub	non	non	non	non	non
		450	non	non	non	non	non	non
	-64	250	sub	sub	sub	sub	sub	sub
		300	sub	sub	sub	sub	sub	sub
		350	sub	sub	sub	sub	sub	sub
		450	sub	sub	non	non	non	non
	-96	300	sub	sub	sub	sub	sub	sub
		350	sub	sub	sub	sub	sub	sub
450		sub	sub	sub	sub	sub	sub	

Tab. 5.1 - Submersion des structures

α	C_f (mm)	L_s (mm)	Fr					
			3,1	3,6	4,6	5,5	6,4	7,6
45°	0	250	sub	sub	non	non	non	non
		300	sub	sub	non	non	non	non
		350	sub	sub	non	non	non	non
	-32	250	sub	sub	sub	sub	sub	sub
		300	sub	sub	sub	sub	sub	sub
		350	sub	sub	sub	sub	sub	sub
	-64	250	sub	sub	sub	sub	sub	sub
		300	sub	sub	sub	sub	sub	sub
		350	sub	sub	sub	sub	sub	sub
	-96	250	sub	sub	sub	sub	sub	sub
		300	sub	sub	sub	sub	sub	sub
		350	sub	sub	sub	sub	sub	sub

sub = structure submergée
non = structure non submergée

Tab. 5.1 - Submersion des structures (suite.)

5.2.2 Fonctionnement des structures

Quand il n'y a pas de dissipateur et que le niveau aval est adéquat, le ressaut hydraulique se forme pour dissiper l'énergie (chapitre 3.2). Le ressaut est accompagné par des grandes oscillations superficielles qui se propagent vers l'aval. Cette agitation diminue significativement après la fin du rouleau et atteint le régime normal de l'écoulement après la fin de la zone de remontée de bulles d'air (figure 5.3 et photos 3.1 et 5.1).

Pour les structures à auge ou à rampe ascendante nous avons constaté que le phénomène de dissipation d'énergie peut être analysé de façon identique et indépendamment de la structure adoptée. La hauteur de l'onde stationnaire (y_s) et l'agitation superficielle sont directement fonction de l'angle de sortie. À mesure que l'angle de sortie diminue, la hauteur de l'onde diminue et se déplace vers l'aval. En effet, lorsque

l'inclinaison de la structure est faible, le jet à la sortie demeure près du radier et ne permet pas une bonne formation du rouleau de fond. L'érosion a donc tendance à se rapprocher du pied de la structure. Ainsi l'efficacité du rouleau augmente lorsque la longueur (L_s) et la hauteur de sortie (s) augmentent. Le fonctionnement idéal serait obtenu à la façon suivante:

- a) Diminution de la hauteur de l'onde stationnaire (y_s) et réduction de l'agitation superficielle. À cette fin, nous devons diminuer l'angle de sortie (α).
- b) Augmentation de la hauteur de sortie (s) pour permettre une bonne formation du rouleau de fond en aval. Pour y arriver, il faut augmenter l'angle de sortie (α) ou la longueur de la structure (L_s).

Ces deux conditions sont opposées par rapport à l'angle de sortie (α).

De même, en absence du dissipateur proprement dit (photo 5.1), la dissipation d'énergie, en aval des structures à auge, est accompagnée de grandes oscillations superficielles qui se propagent en aval. Cette agitation diminue significativement après la zone d'impact du jet sur le fond et elle atteint le régime normal de l'écoulement du canal après la fin de la zone de remonte de bulles d'air (figure 5.4 et photos 3.2, 3.3 et 5.3 à 5.6).

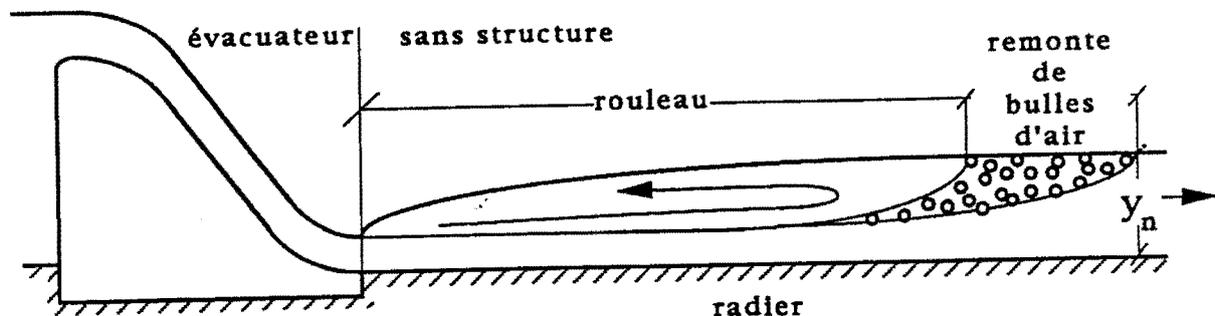


Fig. 5.3 - Schéma d'écoulement sans dissipateur d'énergie

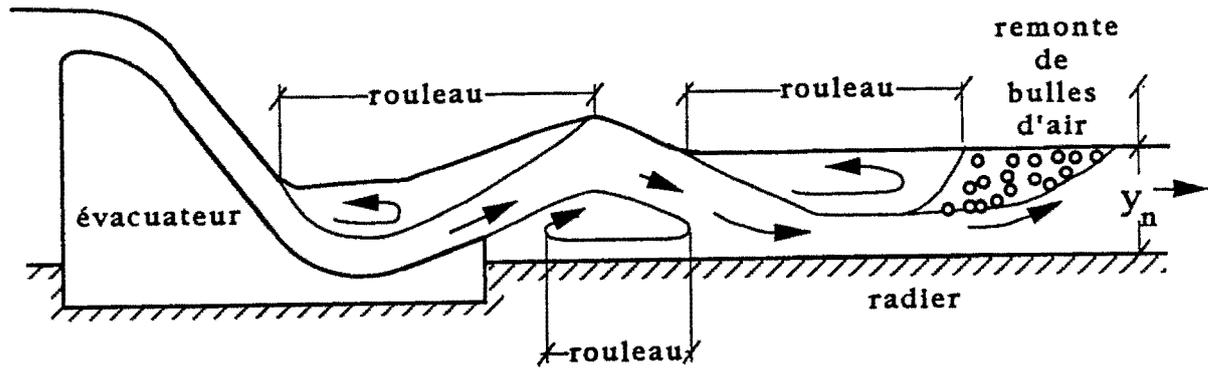


Fig. 5.4 - Schéma d'écoulement avec un dissipateur à auge

5.3 Caractéristiques statistiques de la pression en aval du dissipateur

5.3.1 Considérations initiales

La mesure des pressions a été faite pour la condition sans dissipateur et pour toutes les structures submergées³.

L'objectif de l'analyse statistique de la pression exercée en aval de la structure est de comprendre le comportement de la structure à partir de la structure de l'évolution de certains paramètres, tels la moyenne, la variance, le coefficient d'asymétrie, le coefficient d'aplatissement, etc.

5.3.2 La pression moyenne

Pour simplifier l'analyse de la distribution de pression nous avons exprimé la pression moyenne ponctuelle (P_x) par rapport à la pression moyenne correspondant à la fin de la région d'influence de la dissipation

³ un total de 144 essais sur 264 essais réalisés.

(P_n). Également la distance longitudinale (x) a été exprimée par rapport à la distance où se terminent l'influence de la dissipation (L_n).

L'analyse de la distribution de P_x/P_n pour chaque structure en fonction de x/L_n indique que la distribution de pression moyenne est fortement influencée par l'angle de sortie (α), si les autres paramètres demeurent identiques (exemple: figure 5.5).

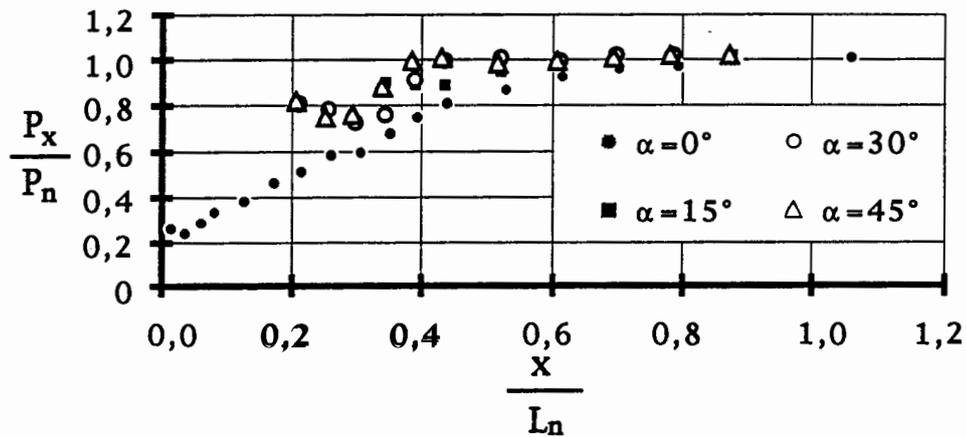


Fig. 5.5 - Distribution de la pression moyenne réduite en fonction de x/L_n ($Fr=4,6$; $L_s=350$ mm; $C_f=-64$ mm)

Cette influence se fait sentir jusqu'à environ $0,7x/L_n$. Plus vers l'aval, la distribution est sensiblement constante. La condition sans dissipateur ($\alpha = 0^\circ$, $C_f = 0$ mm et $s = 0$ mm) présente des valeurs de P_x/P_n plus faibles que pour les autres angles. La pression en aval des structures de 30° et 45° passent par un minimum. Le comportement de la figure 5.5 représente un comportement typique quel que soit le nombre de Froude, la cote de fond et la longueur.

5.3.3 La fluctuation de pression

La fluctuation de pression en aval des dissipateurs est traditionnellement analysée par la variation longitudinale du coefficient de fluctuation de pression (C_p). Ce coefficient a déjà été défini au paragraphe 3.8.2.

$$C_p = \frac{\sigma_x}{\frac{v_t^2}{2g}} = f\left(\frac{x}{y_t}; Fr\right) \quad (5.4)$$

Sur les figures 5.6 et 5.7, les résultats sont présentés de façon traditionnelle soit la valeur de C_p en fonction de la distance longitudinale réduite x/y_t .

La figure 5.6 montre les valeurs de C_p pour une structure de type auge pour différents nombres de Froude. La cote de fond est à -96 mm, la longueur est de 350 mm et la hauteur de sortie est égale à 52 mm. Nous observons que la valeur maximale de C_p diminue lorsque le nombre de Froude augmente. La position de la valeur maximale augmente lorsque le nombre de Froude augmente.

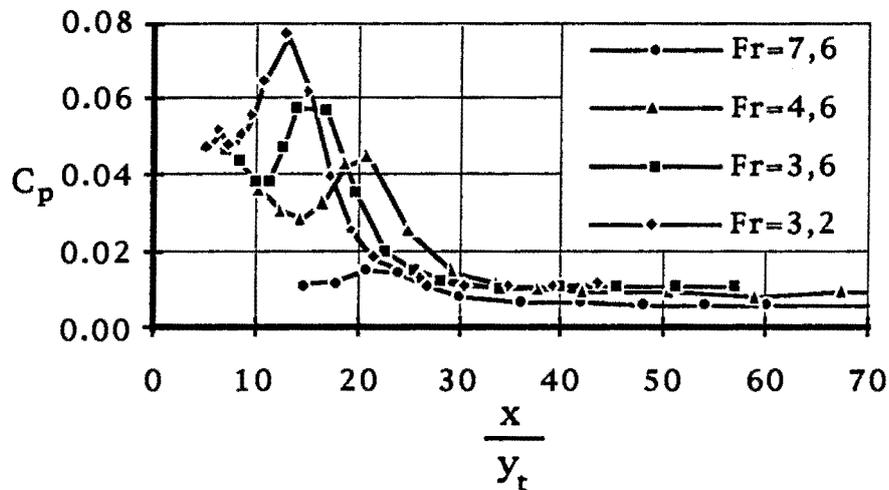


Fig. 5.6 - Distribution du coefficient de fluctuation de pression en fonction de x/y_t ($\alpha=30^\circ$; $C_f=-96$ mm ; $L_s=350$ mm ; $s=52$ mm)

La figure 5.7 présente les valeurs de C_p pour la condition sans dissipateur ($\alpha=0^\circ$; $C_f=0$ mm et $s=0$ mm) et les structures à auge situées à la cote -96 mm avec une hauteur de sortie proche de 57 mm pour un écoulement avec un nombre de Froude de 4,6. Pour ces conditions l'angle

de 15° , qui représente la structure la plus longue, présente la plus basse valeur de C_p .

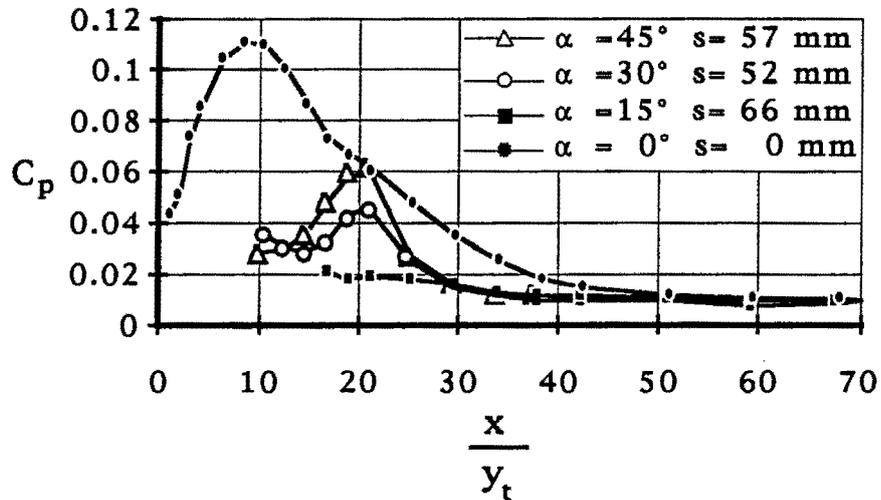


Fig. 5.7 - Distribution du coefficient de fluctuation de pression en fonction de x/y_t ($Fr=4,6$; $s=57 \text{ mm}$)

La figure 5.8 présente la valeur de C_p en fonction de la distance longitudinale représentée par rapport à la longueur de dissipation. La relation x/L_n permet d'associer les points d'intérêt directement à la longueur de la dissipation. D'une façon générale nous observons que:

- a) pour la région comprise entre 0 et $1,0 x/L_n$, la valeur de C_p présente des écarts importants qui traduisent une grande instabilité de l'écoulement et la présence d'une macroturbulence importante;
- b) la différence des résultats des essais avec et sans structure ($\alpha=0^\circ$) est significative. Le cas sans structure présente des valeurs élevées qui augmentent rapidement jusqu'à la position $\approx 0,2x/L_n$. Après, elles diminuent jusqu'à la valeur normale de l'écoulement dans le canal. Pour les autres angles, les valeurs maximales sont plus basses et se situent plus en aval.

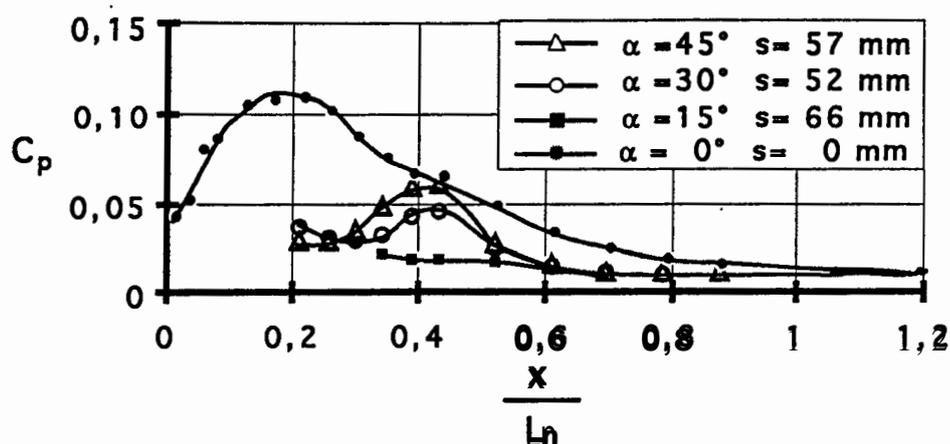


Fig. 5.8 - Distribution du coefficient de fluctuation de pression en fonction de x/L_n ($Fr=4,6$; $s=57 \text{ mm}$)

La figure 5.9 permet de comparer la distribution du coefficient de fluctuation de pression pour deux (2) structures différentes (s et C_f différents, étant les autres caractéristiques identiques). La valeur du coefficient de la fluctuation de pression à la sortie de la structure est influencée par la hauteur de la sortie (s). Lorsque cette dernière est plus petite qu'une certaine valeur (s_2), le coefficient augmenté augmente. Dans le cas contraire, le coefficient reste constant et égal à une valeur minimale. Ce phénomène peut être expliqué par la succion provoquée par l'écoulement lorsqu'il quitte la structure, quand s est plus petit que s_2 , l'effet de la succion se fait sentir jusqu'au radier et augmente la fluctuation. Quand s est supérieur ou égal à s_2 , l'effet de la succion n'atteint pas le fond du canal et la fluctuation reste constante.

À partir de la figure 5.9 nous pouvons déterminer trois (3) positions caractéristiques de l'écoulement:

- a) L_1 = position où le coefficient de fluctuation passe par un minimum, lorsque la hauteur de sortie (s) est inférieure à une certaine valeur s_2 ; elle coïncide avec la position où le niveau d'eau atteint son point le plus haut;

- b) $L_{\sigma_{\max}}$ = position correspondante à la valeur maximale du coefficient de fluctuation de pression; elle coïncide avec la position où l'écoulement frappe le lit;
- c) L_n = position où le coefficient de fluctuation tend asymptotiquement vers une valeur minimale. Cet endroit correspond à la position où se termine l'influence de la dissipation.

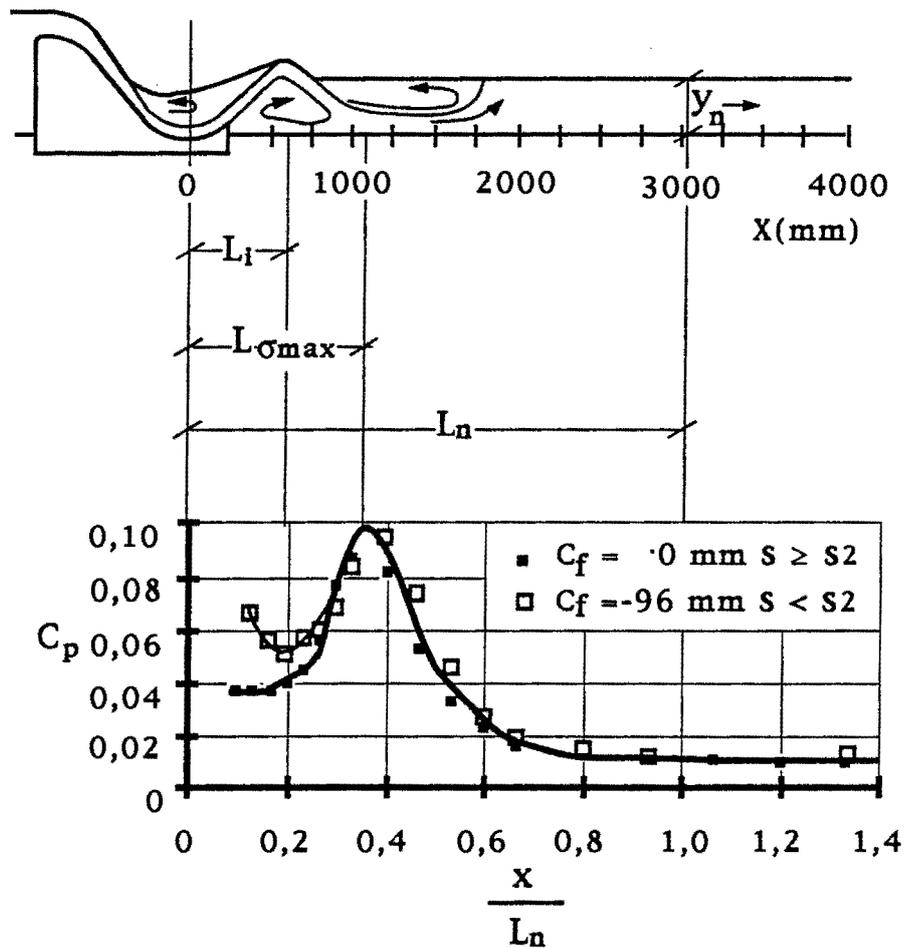


Fig. 5.9 - Distribution du coefficient de fluctuation de pression en fonction de x/L_n

($Fr=3,2$; $\alpha=45^\circ$; $L_s=250 \text{ mm}$; $C_f=0 \text{ mm}$ et $s=203 \text{ mm}$ et $C_f=-96 \text{ mm}$ et $s=7 \text{ mm}$)

5.3.4 Fonction de distribution et de densité de probabilités

Les fonctions de distribution donnent la probabilité d'occurrence des valeurs de pression (amplitude) plus petites ou égales à une certaine valeur. Avec ces informations, nous sommes capables d'évaluer les valeurs extrêmes de pression. Dans la pratique, il est commun d'utiliser comme valeurs d'occurrence exceptionnelles les probabilités de 1 % et 99 %. Les figures 5.10 à 5.13 montrent à titre d'exemple les histogrammes et la fonction de distribution de probabilité par rapport à la distance $L_{\sigma_{max}}$ pour différents angles de sortie.

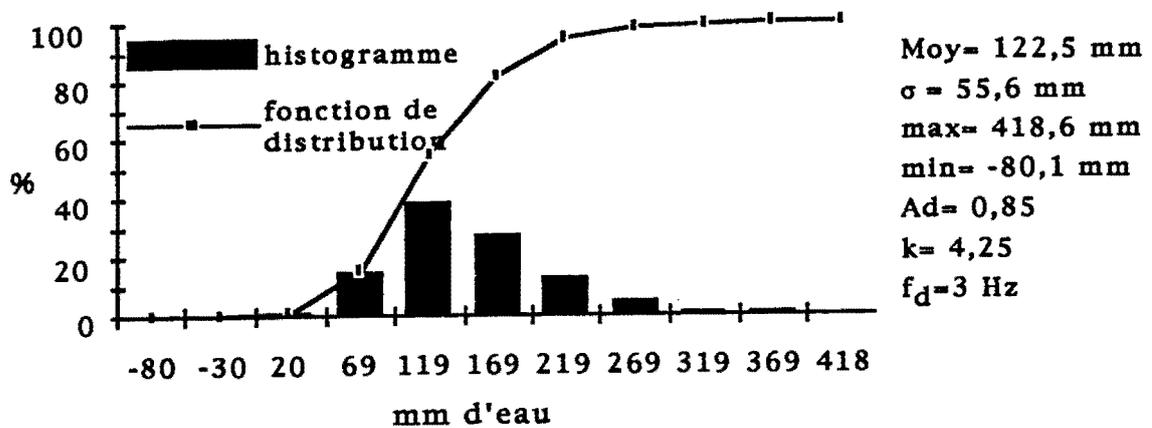


Fig. 5.10 - Histogramme et fonction de distribution de probabilité
 ($Fr = 4,6$; $\alpha = 0^\circ$; $C_f = 0$ mm, prise #6)

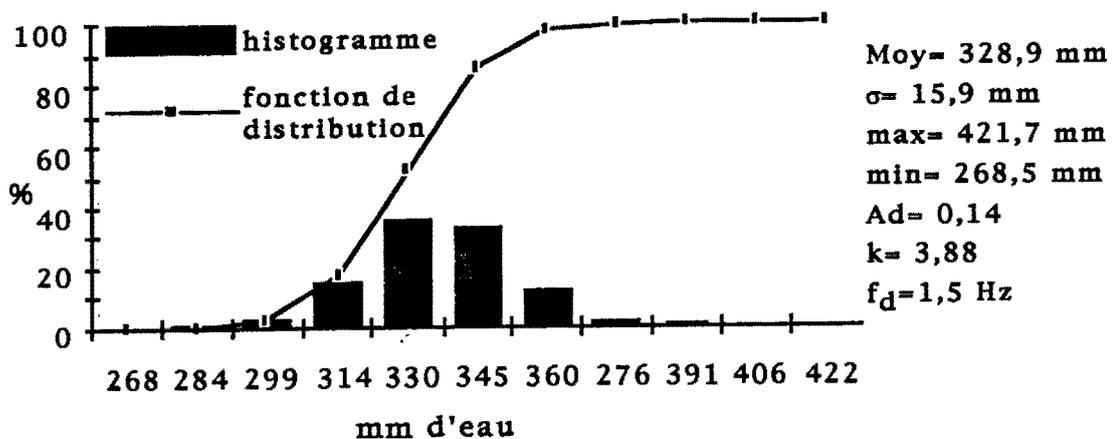


Fig. 5.11 - Histogramme et fonction de distribution de probabilité
 ($Fr = 4,6$; $\alpha = 15^\circ$; $C_f = -96$ mm; $L_s = 650$ mm; $s = 66$ mm; prise #13)

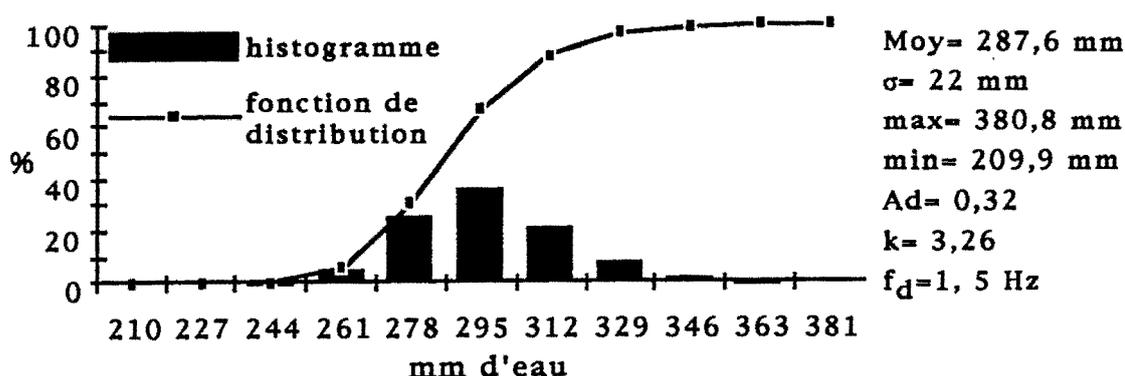


Fig. 5.12 - Histogramme et fonction de distribution de probabilité
(Fr = 4,6; $\alpha = 30^\circ$; $C_f = -96$ mm; $L_s = 350$ mm; s = 52 mm; prise #12)

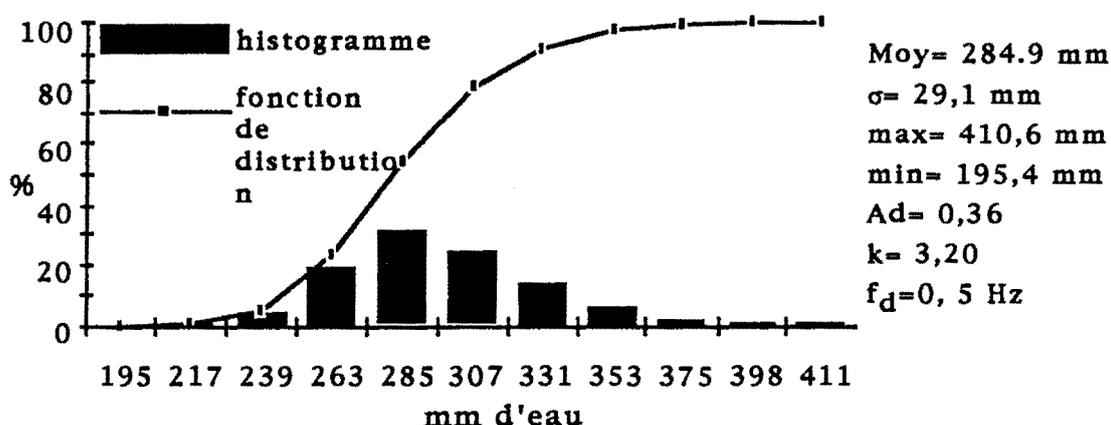


Fig. 5.13 - Histogramme et fonction de distribution de probabilité
(Fr = 4,6; $\alpha = 45^\circ$; $C_f = -96$ mm; $L_s = 300$ mm; s = 57 mm; prise # 11)

5.3.5 Coefficient d'asymétrie

Ce coefficient permet d'analyser la tendance de l'écoulement à se séparer du fond du lit, lorsqu'il change de signe (positif à négatif ou négatif à positif), selon Lopardo [1984] et Drapeau [1995]. Pour une raison non expliquée, lorsque les lignes de courant se dirigent vers le fond, les valeurs de la pression supérieures à la moyenne sont plus nombreuses que celles inférieures. Il en résulte alors à une asymétrie positive. Contrairement, lorsque l'écoulement décolle du radier, il se produit une succion et on observe que les valeurs inférieures à la moyenne sont plus nombreuses que les supérieures, ce qui provoque une asymétrie

négative. Nous observons également une valeur d'asymétrie négative immédiatement en aval de la sortie de la structure à auge. Cette région est habituellement caractérisée par une zone de dépression.

Les figures 5.14 à 5.17 montrent la distribution longitudinale du coefficient d'asymétrie (A_d) pour différentes structures.

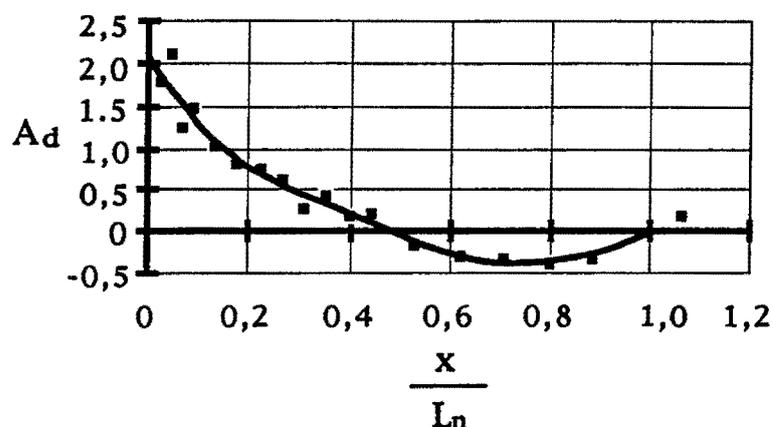


Fig. 5.14 - Distribution du coefficient d'asymétrie en fonction de x/L_n
($Fr=4,6$; $\alpha=0^\circ$; $C_f = 0$ mm)

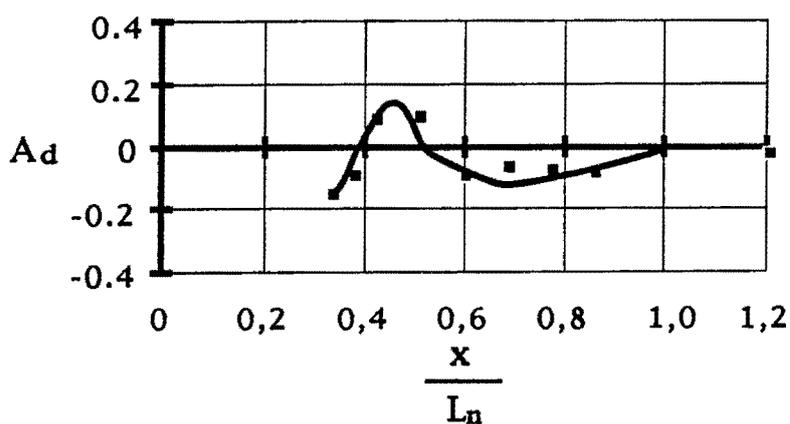


Fig. 5.15 - Distribution du coefficient d'asymétrie en fonction de x/L_n
($Fr= 4,6$; $\alpha= 15^\circ$; $C_f = -96$ mm; $L_s = 650$ mm; $s= 66$ mm)

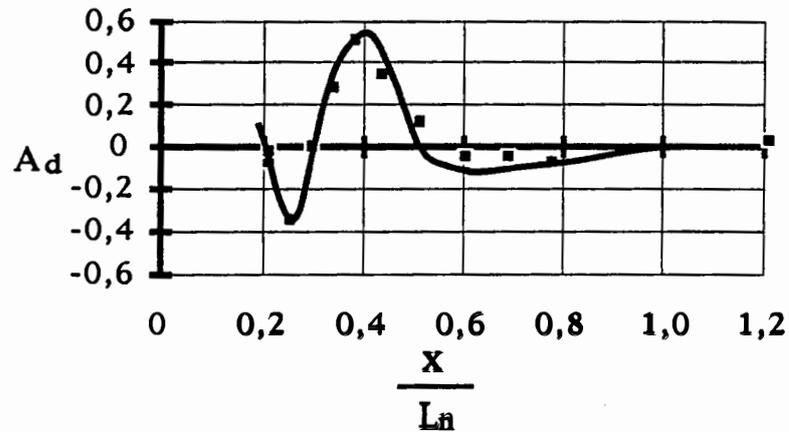


Fig. 5.16 - Distribution du coefficient d'asymétrie en fonction de x/L_n
($Fr = 4,6$; $\alpha = 30^\circ$; $C_f = -96$ mm; $L_s = 350$ mm; $s = 52$ mm)

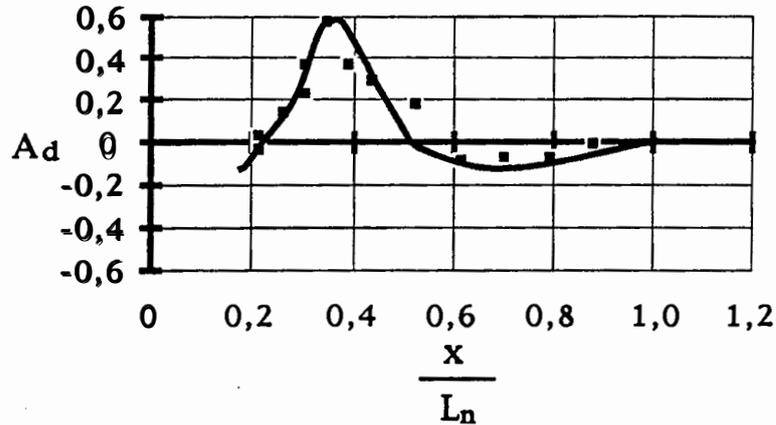


Fig. 5.17 - Distribution du coefficient d'asymétrie en fonction de x/L_n
($Fr = 4,6$; $\alpha = 45^\circ$; $C_f = -96$ mm; $L_s = 300$ mm; $s = 57$ mm)

Les valeurs du coefficient d'asymétrie en fonction de x/L_n sont plus dispersés que celles du coefficient de fluctuation de pression. Par contre, certaines caractéristiques de l'écoulement peuvent être associées à la distribution du coefficient d'asymétrie. D'une façon générale nous observons que:

- a) Le coefficient d'asymétrie présente, pour la région comprise entre 0 et 1,0 x/L_n , des résultats très dispersés ce qui correspondent à la zone d'écoulement très instable.
- b) Le cas sans structure ($\alpha = 0^\circ$) présente des coefficients d'asymétrie élevés ($A_d > 1,0$) au début du ressaut (figure 5.14).

Ces valeurs diminuent rapidement et deviennent négatives à partir de $0,5 x/L_n$. La valeur minimale est située à environ $x/L_n \approx 0,7$; elle est voisine de $-0,5$. Par après, le coefficient d'asymétrie augmente graduellement jusqu'à la fin de la zone de dissipation ($x/L_n = 1,0$) où la valeur du coefficient d'asymétrie reste près de zéro.

- c) Les structures à auge présentent des valeurs de coefficient d'asymétrie (figures 5.15 à 5.17) qui augmentent graduellement jusqu'à un maximum situé dans la région où le jet frappe le fond du lit ($L_{\sigma_{max}}$). Ensuite, il diminue, coupe l'abscisse à $x/L_n \approx 0,5$ et atteint une valeur minimale voisine de $-0,2$. Après, il augmente pour tendre vers la valeur zéro.

La figure 5.18 permet de comparer la distribution du coefficient d'asymétrie pour deux (2) structures différentes. Les valeurs de s et C_f sont différentes mais toutes les autres caractéristiques sont identiques. Le coefficient d'asymétrie à la sortie de la structure semble être influencé par la hauteur de sortie (s). Lorsque cette dernière est plus petite qu'une certaine valeur (s_2), le coefficient est plus petit que 0. Dans le cas contraire, le coefficient A_d est plus grand que zéro (0). Ce phénomène peut être expliqué par la succion provoquée par l'écoulement lorsqu'il quitte la structure. Quand s est plus petit que s_2 , l'effet de la succion atteint le fond du lit et la plupart des valeurs de pression mesurées sont inférieures à la moyenne ($A_d < 0$). Quand s est supérieur ou égal à s_2 , l'effet de la succion n'atteint pas le fond du canal et la plupart des valeurs de pression mesurées sont légèrement supérieures à la moyenne ($A_d > 0$). La distribution du coefficient d'asymétrie présente la même allure quelque soit la structure ou écoulement.

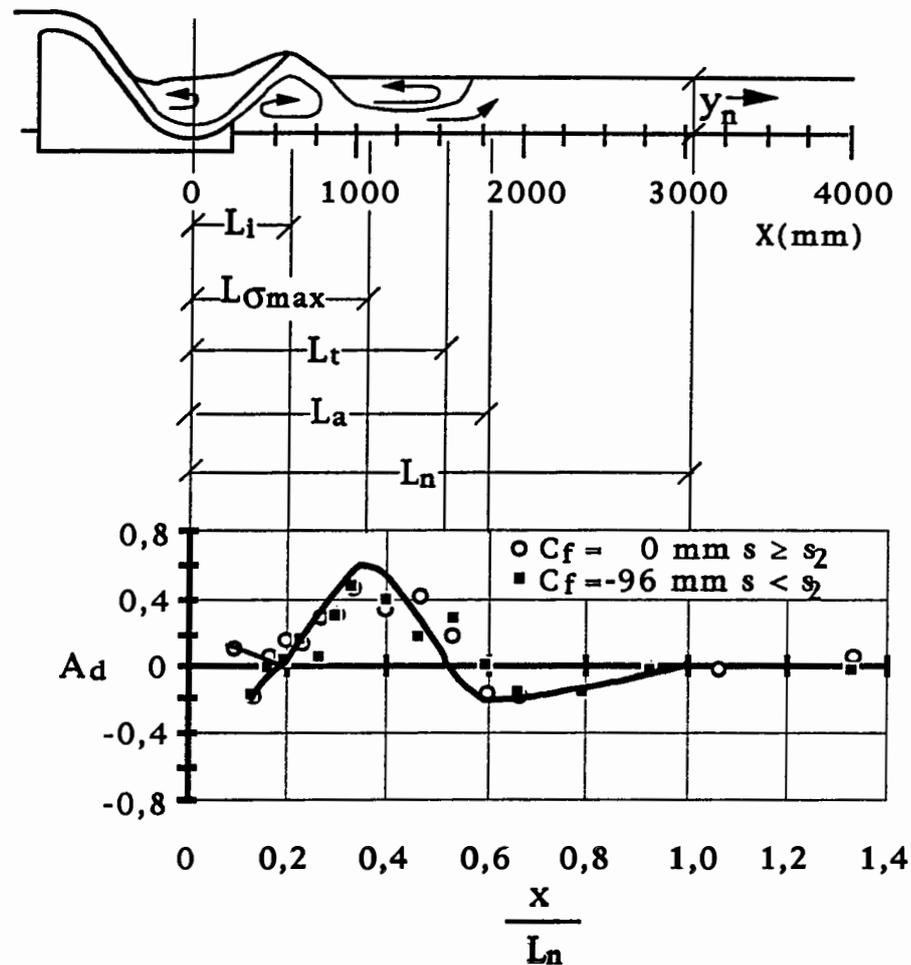


Fig. 5.18 - Distribution du coefficient d'asymétrie en fonction de x/L_n
 ($Fr=3,2$; $\alpha=45^\circ$; $L_s=250 \text{ mm}$; $C_f=0 \text{ mm}$ et $s=203 \text{ mm}$ et $C_f=-96 \text{ mm}$ et $s=7 \text{ mm}$)

La figure 5.18 est une illustration type à partir de laquelle il est possible de déterminer cinq (5) positions caractéristiques de l'écoulement qui sont:.

- a) L_i = position où la distribution de A_d coupe l'abscisse ($A_d = 0$) ou la valeur de A_d passe par un minimum voisin de zéro. Cet endroit coïncide avec la position où la surface de l'eau atteint son point le plus haut et où le rouleau de fond se forme.
- b) $L_{\sigma_{\max}}$ = position correspondant à la valeur maximale de A_d . Cet endroit correspond à l'endroit où le jet frappe le radier en aval de la structure.

- c) L_t = position où la distribution de A_d coupe l'abscisse ($A_d = 0$) en aval de la position $L_{\sigma_{max}}$. Cet endroit coïncide avec la position à partir de laquelle la composante verticale de la vitesse commence à devenir significative.
- d) L_a = position où la distribution de A_d passe par un minimum en aval de la position $L_{\sigma_{max}}$. Cet endroit coïncide avec la position où le jet principal atteint toute la profondeur de l'écoulement. A cette distance l'écoulement est encore instable.
- e) L_n = position où la distribution de A_d atteint une valeur voisine de zéro (0). Cet endroit correspond à la position où se termine l'influence de la dissipation. Il correspond aussi à la position où la pression atteint une valeur égale à la profondeur de d'eau.

5.3.6 Le coefficient d'aplatissement

D'une façon analogue à l'écart type, le coefficient d'aplatissement (k) est une mesure de la concentration des données par rapport à la moyenne. Une valeur de k plus petite que 3 indique une distribution plus concentrée et le contraire si le coefficient est plus grand que 3.

D'une façon générale, l'analyse de la distribution du coefficient d'aplatissement en aval de la structure va dans le même sens que les résultats obtenus dans l'analyse du coefficient de pression. On observe que:

- a) pour la région comprise dans l'intervalle $0 \leq x/L_n \leq 1,0$, le coefficient d'aplatissement présente (exemple: figures 5.19 à 5.23) des valeurs très dispersées. Cette région correspond à la zone d'écoulement de grande instabilité;
- b) Le cas sans structure ($\alpha = 0^\circ$), le coefficient d'aplatissement présente des valeurs trop élevées ($k > 8$) au début du ressaut (figure 5.19). Ces valeurs diminuent rapidement pour la région comprise entre $0 \leq x/L_n \leq 0,2$ et restent près de 4 jusqu'à

$x/L_n \approx 0,8$, après quoi, elles diminuent graduellement pour atteindre graduellement la valeur limite de 3;

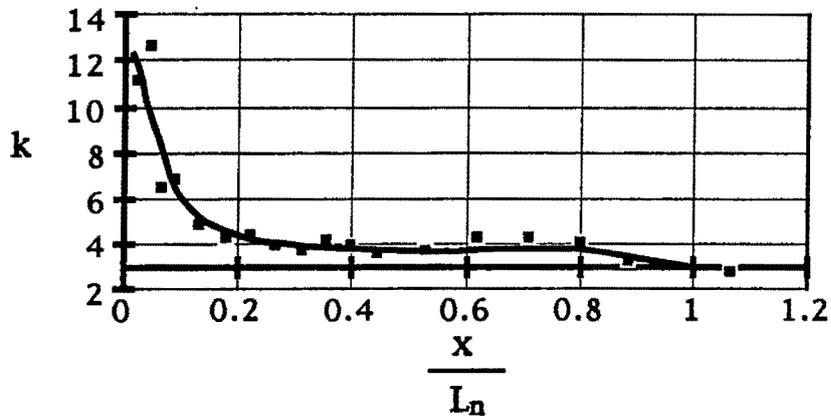


Fig. 5.19 - Distribution du coefficient d'aplatissement en fonction de x/L_n ($Fr=4,6$; $\alpha = 0^\circ$; $C_f = 0$)

- c) Pour les structures à auge (exemple: figures 5.20 à 5.23) la distribution du coefficient d'aplatissement est différente du cas sans structure. Le coefficient présente des valeurs voisines de 3 à la sortie de la structure. Par la suite, les valeurs atteignent un maximum de 4 pour la région d'impact du jet ($L_{\sigma_{max}}$). Après avoir tendre vers 3 ;

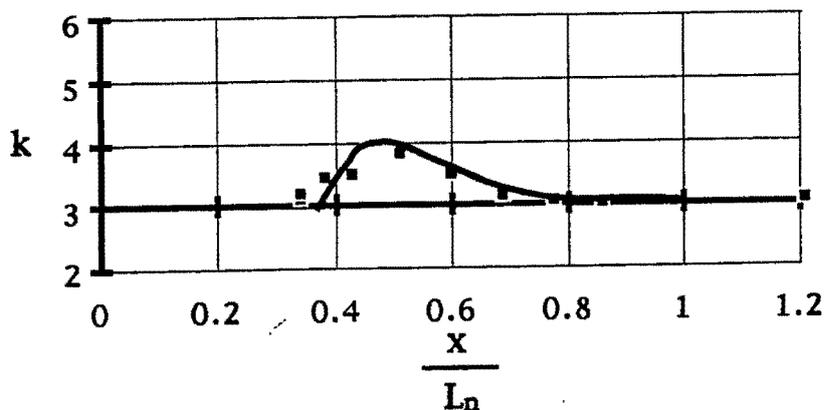


Fig. 5.20 - Distribution du coefficient d'aplatissement en fonction de x/L_n ($Fr=4,6$; $\alpha=15^\circ$; $C_f=-96$ mm; $L_s=650$ mm; $s=66$ mm)

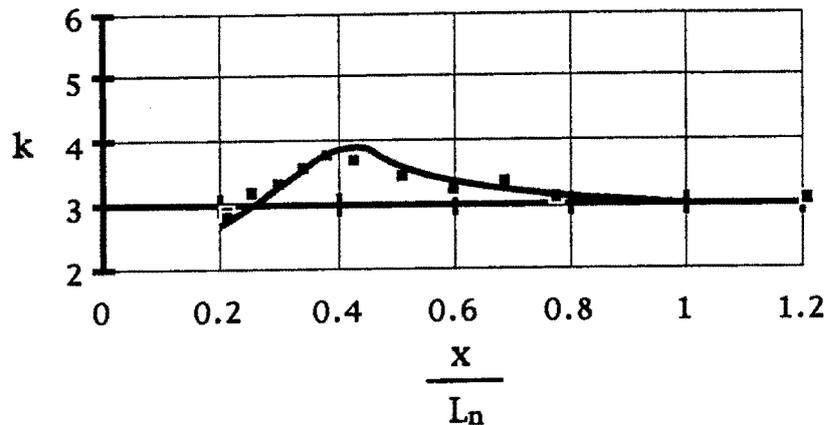


Fig. 5.21 - Distribution du coefficient d'aplatissement en fonction de x/L_n ($Fr=4,6$; $\alpha=30^\circ$; $C_f=-96$ mm; $L_s=350$ mm; $s=52$ mm)

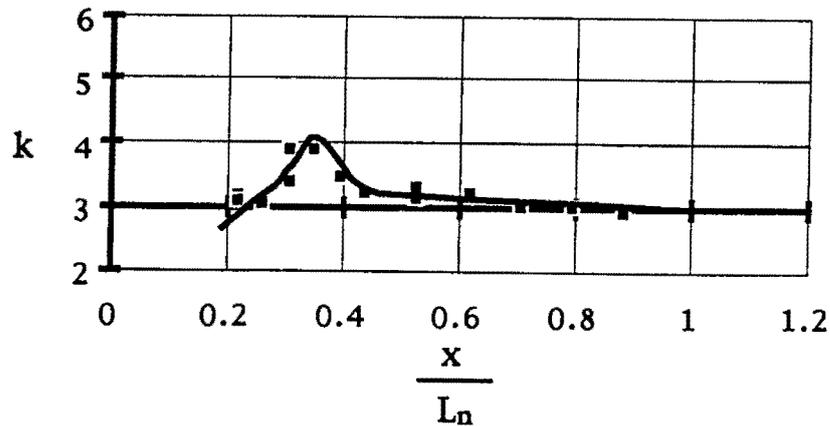


Fig. 5.22 - Distribution du coefficient d'aplatissement en fonction de x/L_n ($Fr=4,6$; $\alpha=45^\circ$; $C_f=-96$ mm; $L_s=300$ mm; $s=57$ mm)

La figure 5.23 permet de comparer la distribution du coefficient d'aplatissement pour deux (2) structures différentes. Les valeurs de s et C_f diffèrent mais toutes les autres caractéristiques sont identiques. Il semble que la valeur du coefficient d'aplatissement à la sortie de la structure soit influencée par la hauteur de sortie (s). Lorsque cette dernière est plus petite qu'une certaine valeur (s_2), le coefficient sera plus grand que 3. Dans le cas contraire, il sera proche de 3. D'une façon analogue aux cas précédents, le phénomène pourrait être expliqué par la succion provoquée par l'écoulement lorsqu'il sort de la structure. Quand $s < s_2$, l'effet de la succion se propage jusqu'au radier, les valeurs de la

pression mesurées se répartissent bien par rapport à la moyenne. Quand $s_2 \geq s$, l'effet de la succion n'atteint pas le radier. Les valeurs de pression mesurées ont alors une distribution peu aplatie ($k \leq 3$) presque normale.

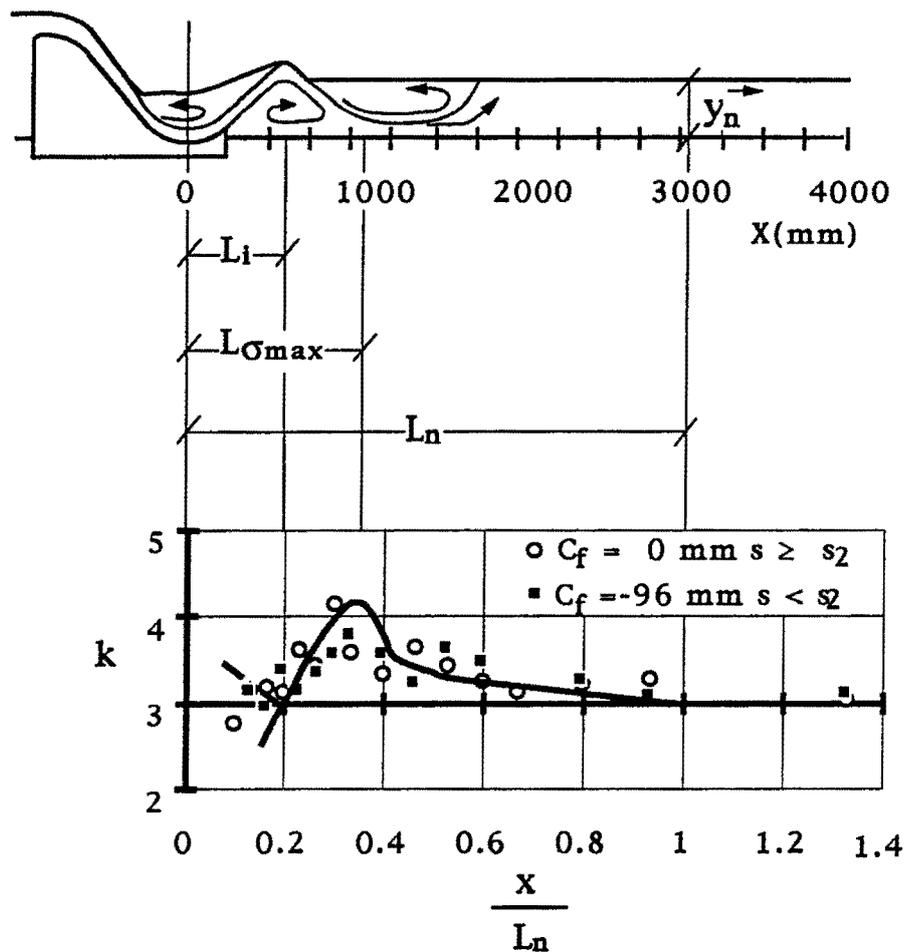


Fig. 5.23 - Distribution du coefficient d'aplatissement en fonction de x/L_n ($Fr= 3,2$; $\alpha=45^\circ$; $L_s=250$ mm; $C_f= 0$ et $s=203$ mm et $C_f= -96$ mm et $s=7$ mm)

Ces observations ressemblent beaucoup à celles faites pour le coefficient de fluctuation de pression et pour le coefficient d'asymétrie pour la région comprise entre 0 et $1,0 x/L_n$. Cependant, dans le cas du coefficient d'aplatissement, nous ne sommes capables de distinguer que trois (3) positions caractéristiques de l'écoulement lorsque l'angle est compris entre 15° et 45° :

- a) L_i = position où la valeur de k passe par un minimum près de la valeur de 3,0. Cet endroit coïncide avec la position où la surface de l'eau arrive à son point le plus haut et où le rouleau de fond se forme;
- b) $L_{\sigma_{max}}$ = position correspondant à la valeur maximale de k ($k \approx 4$). Cet endroit correspond à l'endroit où le jet frappe le radier;
- c) L_n = position où la valeur de k reste près de la valeur 3,0. Cet endroit correspond à la position où se termine l'influence de la dissipation et où la pression correspond à la hauteur de l'eau.

5.3.7 Les pressions extrêmes mesurées

Les valeurs extrêmes obtenues d'un enregistrement d'un signal aléatoire (pression instantanée dans l'écoulement turbulent) n'ont pas de signification statistique. Ils changent avec la longueur de l'enregistrement et la fréquence d'échantillonnage. D'un point de vue stricte, il serait plus convenable d'utiliser les valeurs de probabilité de 99,9% et 0,1%.

Ici, nous avons analysé les valeurs des pressions extrêmes mesurées (maxima et minima) pour chaque prise de pression en aval de la structure pour faire une comparaison de résultats obtenus dans les mêmes conditions et vérifier la tendance des valeurs. Pour faciliter la comparaison nous avons utilisé sur les graphiques (exemple: figures 5.24 à 5.28) les pressions sous une forme réduite exprimée par la relation P_x/P_n en fonction de la distance exprimée également sous la forme réduite x/L_n .

Pour le cas sans structure ($\alpha=0^\circ$), tous les écoulements présentent une pression négative dans la région comprise entre 0 et $0,3 x/L_n$ (exemple: figure 5.24).

Pour les structures à auge, nous avons observé des pressions minimales négatives seulement pour l'angle de sortie de 15° et avec certaines conditions de l'écoulement et de géométrie de la structure. La figure 5.25 présente les résultats pour un écoulement avec un nombre de Froude de 3,2, un angle de sortie de 15° , une cote de fond de -96 mm, une longueur de la structure de 450 mm et une hauteur de sortie de 12 mm. Pour ce cas nous observons des pressions minimales négatives à partir de la fin de la structure jusqu'à environ $x \approx 0,3 L_n$.

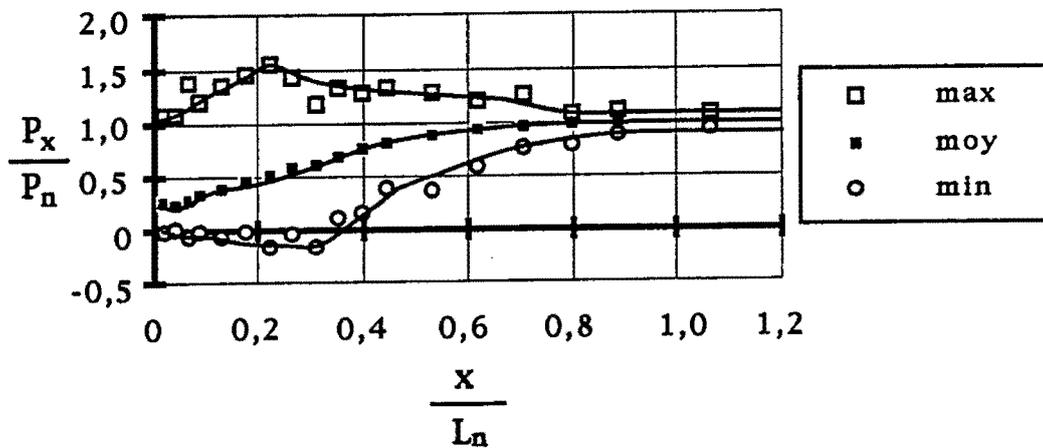


Fig. 5.24 - Distribution des pressions maximales et minimales mesurées
($Fr=4,6$; $\alpha=0^\circ$; $C_f=0$)

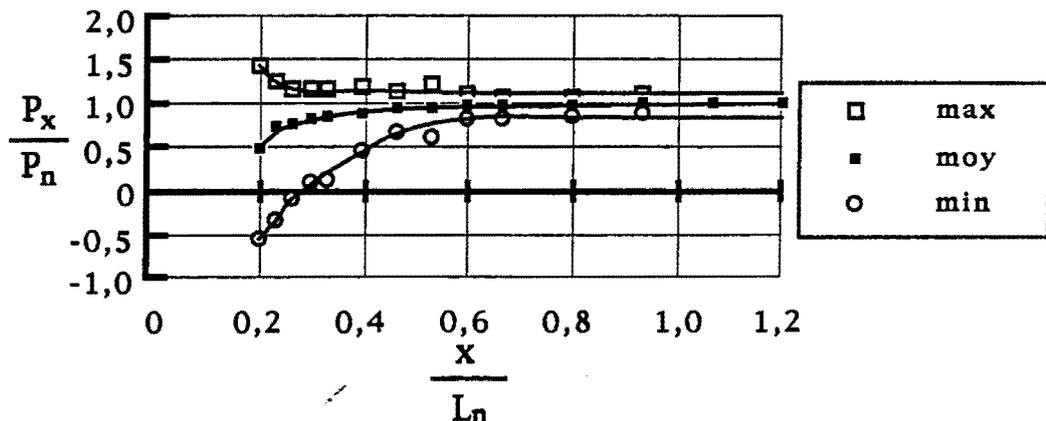


Fig. 5.25 - Distribution des pressions maximales et minimales mesurées
($Fr=3,2$; $\alpha=15^\circ$; $C_f=-96$ mm; $L_s=450$ mm; $s=12$ mm)

La figure 5.26 présente les résultats pour un autre écoulement avec un nombre de Froude de 4,6, un angle de sortie de 15°, une cote de fond de -96 mm, une longueur de la structure de 650 mm et une hauteur de sortie de 66 mm. Pour ce cas, nous n'observons pas de valeurs négatives pour la pression minimale.

À partir de l'analyse des résultats des structures de 15°, nous constatons la présence de pressions minimales négatives pour la région située entre la fin de la structure $x = 0$ et $x = 0,3 L_n$ lorsque la hauteur de sortie (s) est plus petite que la valeur donnée par l'équation 5.4. Dans ce cas, l'écoulement à la sortie reste près du radier. Par conséquent l'effet de l'instabilité causé par la succion atteint le lit et augmente la fluctuation de pression.

$$\frac{s}{y_t Fr} \leq 0,10 \quad (5.4)$$

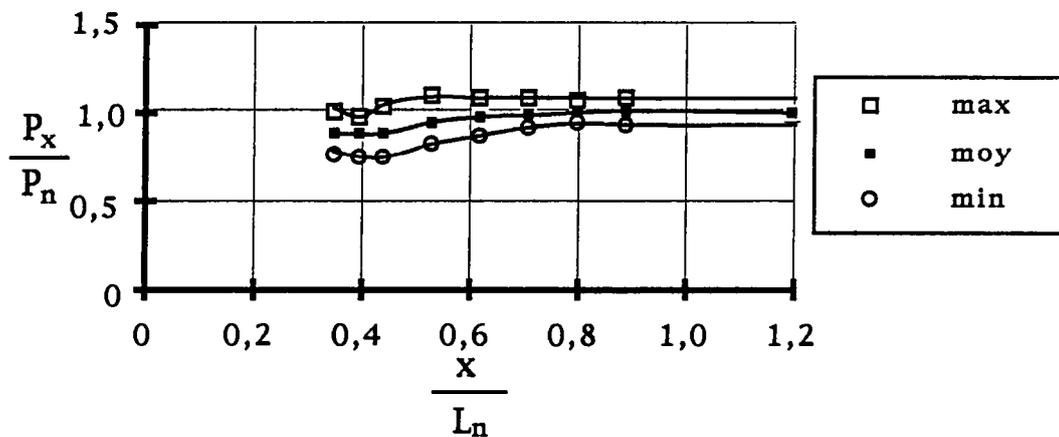


Fig. 5.26 - Distribution des pressions maximales et minimales mesurées
($Fr=4,6$; $\alpha=15^\circ$; $C_f=-96$ mm; $L_s=650$ mm; $s=66$ mm)

Les figures 5.27 et 5.28 présentent deux exemples pour les angles de 30° et 45°, pour un écoulement ayant un nombre de Froude de 4,6.

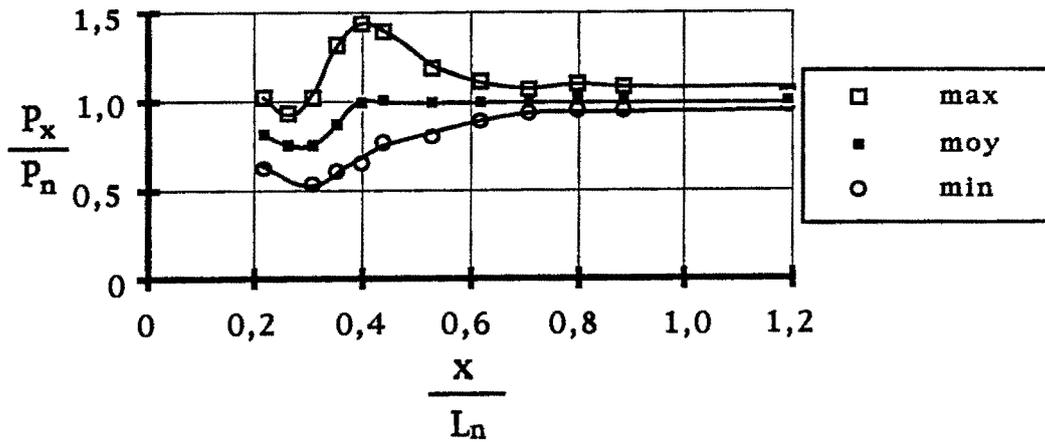


Fig. 5.27 - Distribution des pressions maximales et minimales mesurées
(Fr=4,6; $\alpha=30^\circ$; $C_f=-96$ mm; $L_s=350$ mm; $s=52$ mm)

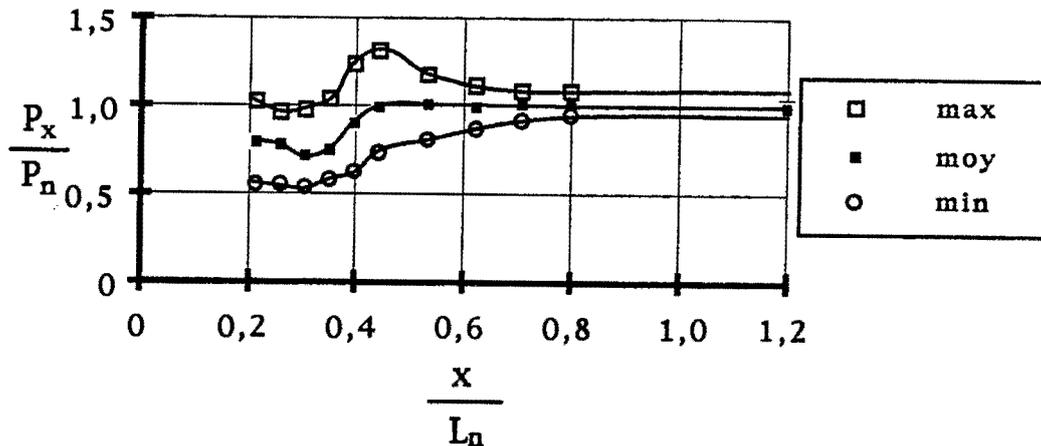


Fig. 5.28 - Distribution des pressions maximales et minimales
(Fr=4,6; $\alpha=45^\circ$; $C_f=-96$ mm; $L_s=300$ mm; $s=57$ mm)

Il est possible d'estimer les efforts en aval de la structure à partir de la connaissance de la pression moyenne et de la fluctuation de pression à partir de l'équation:

$$P_{x\%} = P_x \pm n \sigma_x \quad (5.5)$$

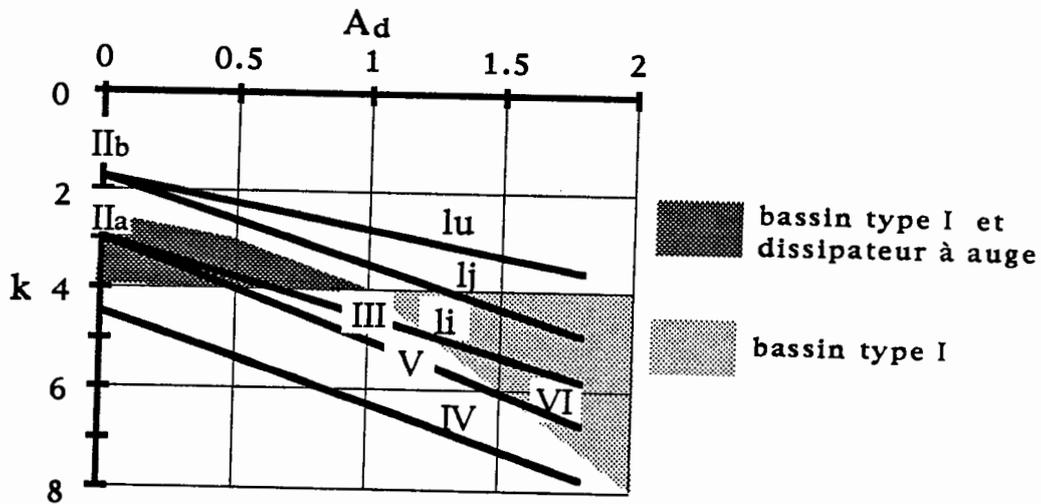
La valeur du coefficient n est dépendante de la loi de distribution (Normale, Pearson III, etc.) que suivent les donnés. Le choix de la fonction la plus adéquate dépend du coefficient d'asymétrie et

d'aplatissement. Par exemple, pour une distribution gaussienne, le coefficient d'asymétrie est égal à 0 et le degré d'aplatissement est égal à 3,0. Le tableau 5.2 montre un résumé des valeurs du coefficient d'aplatissement et d'asymétrie pour les six (6) positions caractéristiques de l'écoulement défini par l'analyse de la pression moyenne, des coefficients de fluctuation de pression, d'asymétrie et d'aplatissement.

Pour estimer la meilleure loi de distribution des valeurs extrêmes, nous pouvons utiliser le diagramme de Pearson (figure 5.29). Différentes fonctions de distribution sont suggérées en fonction des coefficients d'asymétrie et d'aplatissement. Certaines de ces fonctions ont été fréquemment utilisées en hydrologie et/ou en hydraulique. Pour une première analyse, en utilisant les valeurs du tableau 5.2 et de la figure 5.29, la loi de Pearson III représenterait un bon choix. L'utilisation des fonctions de distribution Pearson est bien expliquée par Llamas [1992], entre autres.

Section	Condition		Coefficient	
	angle (α)	hauteur de sortie (s)	d'aplatissement (k)	d'asymétrie (Ad)
L _s	$\alpha=0^\circ$	-	$k \gg 4,0$	$Ad \gg 1$
	$15^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$	$s < s_{\min}$	$3,0 \leq k \leq 4,0$	$-0,2 \leq Ad \leq 0,0$
		$s \geq s_{\min}$	$k \leq 3,0$	$0,2 \leq Ad \leq 0,0$
L _i	$\alpha=0^\circ$	-	$k \approx 4$	$Ad \approx 1,0$
	$15^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$	-	$k \geq 3,0$	$Ad \approx 0,0$
L _{σmax}	$0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$	-	$k \approx 4,0$	$Ad \approx 0,6$
L _t	$0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$	-	$3,0 \leq k \leq 4,0$	$Ad \approx 0,0$
L _a	$0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$	-	$3,0 \leq k \leq 4,0$	$Ad \approx -0,5$
L _n	$0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$	-	$k \approx 3,0$	$Ad \approx 0,0$

Tab. 5.2 - Valeurs de coefficient d'aplatissement et d'asymétrie pour les sections caractéristiques de l'écoulement



II; Ij; Iu; IIa; IIb; III; IV; V; VI = fonctions de distribution de Pearson
 Fig. 5.29 - Diagramme de Pearson

5.3.8 Les fréquences dominantes et réponse de fréquence

La densité spectrale permet de déterminer la fréquence dominante (f_d), de la fluctuation de pression autour de laquelle se concentre l'énergie maximale d'oscillation pour les N valeurs d'un échantillon. La figure 5.30 montre un exemple de la distribution de la densité spectrale obtenue pour un essai en particulier.

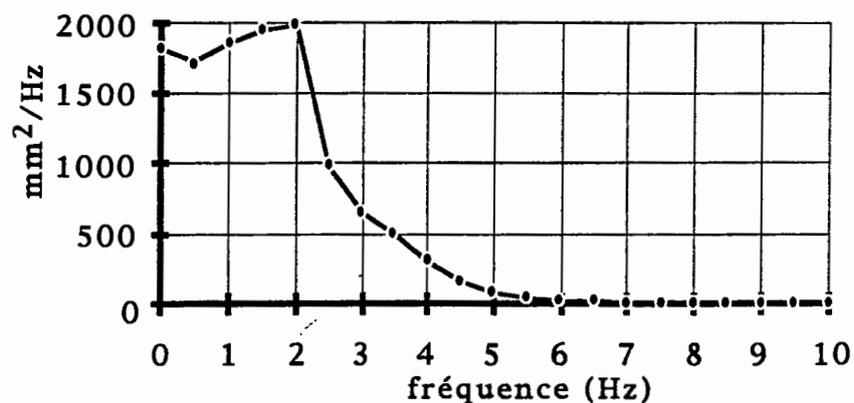


Fig. 5.30 - Densité spectrale

($Fr = 4,6$; $\alpha = 15^\circ$; $C_f = -96$ mm; $L_s = 650$ mm; prise de pression #11)

La figure 5.31 donne un exemple de distribution de la fréquence dominante (f_d) en aval de la structure. Pour la région comprise entre la sortie de la structure et la région d'impact du jet, la fréquence dominante est plus petite ou égale à 4,5 Hz. Après, elle diminue rapidement jusqu'à une valeur près de zéro. Ces valeurs des fréquences dominantes concordent bien avec les valeurs trouvées dans le ressaut hydraulique en aval de l'évacuateur par Khader et Elango [1974] et Lopardo [1986].

Les résultats obtenus permettent de vérifier que la fréquence de résonance n'est pas du même ordre de grandeur que la fréquence associée à l'énergie maximale du système. Elle permet de vérifier également que la fréquence d'enregistrement des données (f_a) a été adéquate. En effet cette fréquence d'enregistrement doit être au minimum deux fois plus grande que la fréquence dominante (f_d) du phénomène ($f_a \geq 2f_d$) pour éviter la perte d'information. Comme la fréquence dominante maximale est de 4,5 Hz, on peut utiliser une fréquence plus grande ou égale à 10 Hz. Nous recommandons cependant d'utiliser une fréquence d'acquisition de données comprise entre 15 et 50 Hz et un temps supérieur à celui nécessaire pour obtenir 4096 données (256 blocs de 16 données chaque bloc, selon Lopardo et Henning [1985]).

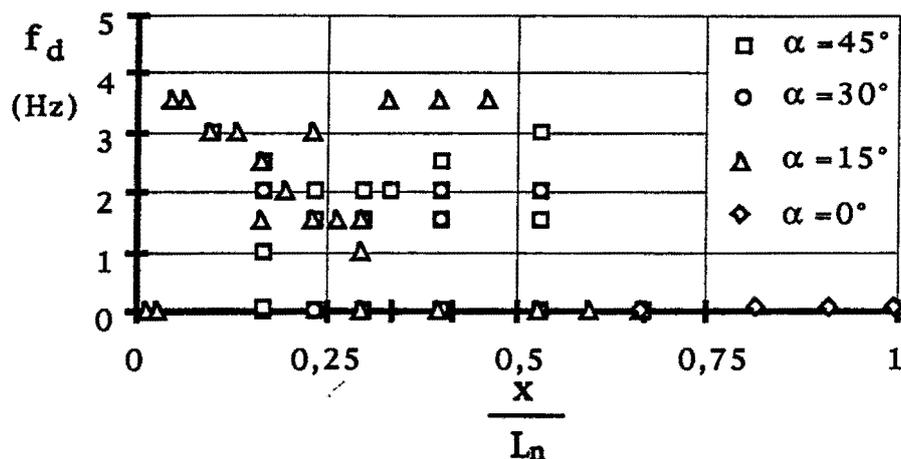


Fig. 5.31 - Fréquence dominante pour chaque prise de pression ($Fr=3,2$)

5.3.9 Les fonctions d'auto-corrélation

Les fonctions d'auto-corrélation et d'autocorrélogramme de densité spectrale sont équivalentes pour décrire un processus stochastique stationnaire. La première est la transformée de Fourier de la deuxième. Cette fonction fournit la corrélation existant entre les données éloignées de différents retards.

La forme des correlogrammes obtenus pour le cas sans dissipateur ($\alpha = 0^\circ$) ressemble aux résultats obtenus par Fioroto [1994] pour un ressaut libre en aval d'une vanne. On n'a cependant aucune référence pour comparer les fonctions d'auto-corrélation obtenue pour des structures à auge. Les figures 5.32 à 5.35 montrent les fonctions d'auto-corrélation trouvées dans la région de la zone d'impact du jet pour un nombre de Froude de 4,6.

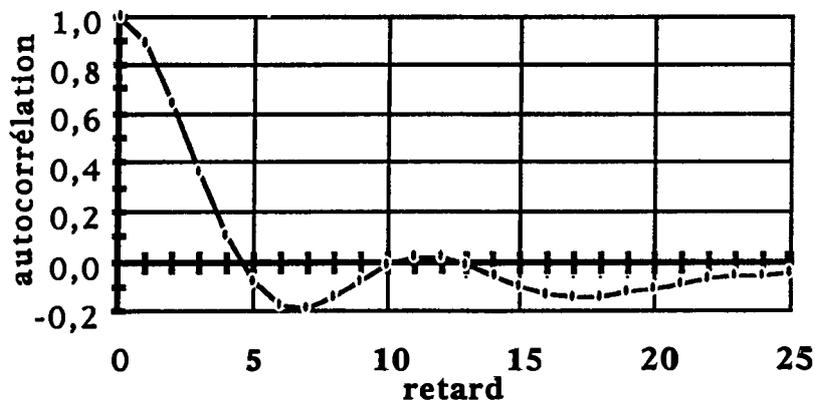


Fig. 5.32 - Autocorrélogramme

(Fr=4,6; $\alpha = 0^\circ$; $C_f = 0$ mm; prise #7)

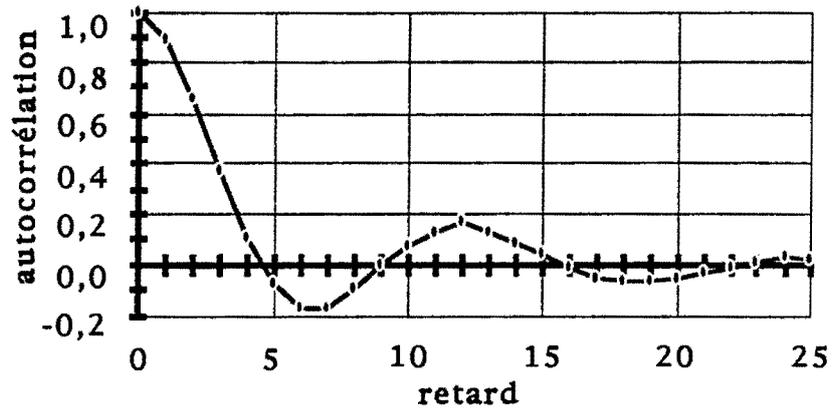


Fig. 5.33 - Autocorrélogramme

($F_r=4,6$; $\alpha=15^\circ$; $C_f = -96$ mm; $L_s = 650$ mm; $s = 66$ mm; prise #11)

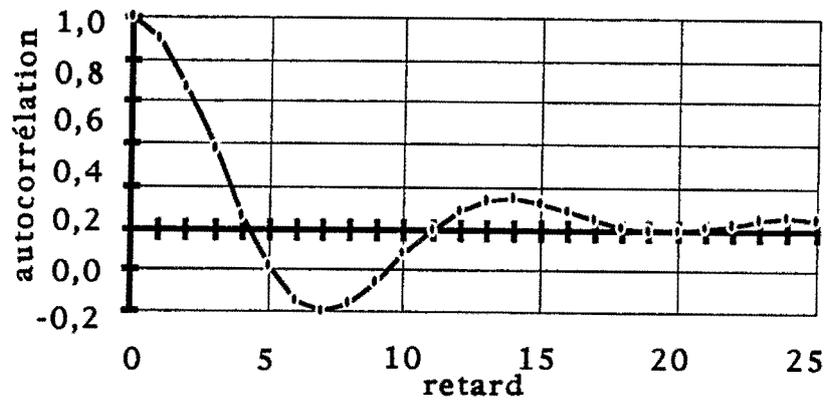


Fig. 5.34 - Autocorrélogramme

($F_r=4,6$ $\alpha=30^\circ$; $C_f = -96$ mm; $L_s = 350$ mm; $s = 52$ mm; prise #7)

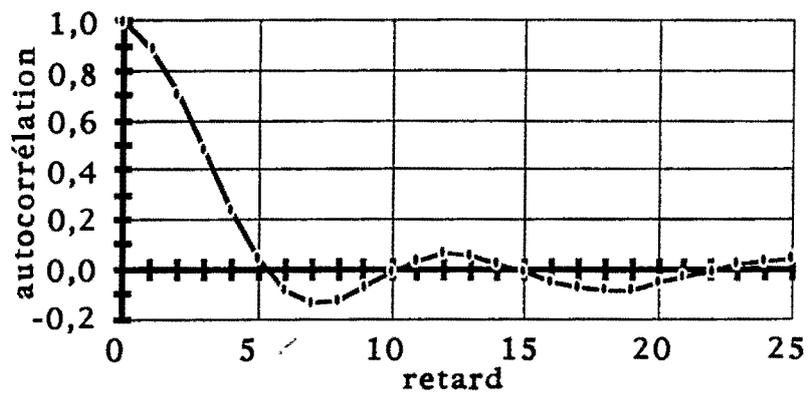


Fig. 5.35 - Autocorrélogramme

($F_r=4,6$; $\alpha = 45^\circ$; $C_f = -96$ mm; $L_s = 300$ mm; $s = 57$ mm; prise #7)

5.4 Influence des paramètres géométriques sur la distribution longitudinale de la pression moyenne et sur la fluctuation ponctuelle des pressions.

L'influence des différents paramètres géométriques sur la dissipation d'énergie a été analysée à partir de la distribution de pression moyenne et de sa fluctuation en fonction du temps.

5.4.1 Influence de l'angle de sortie

Lorsque nous avons fait l'analyse de la pression moyenne à la section 5.3.2 et l'analyse de la fluctuation de pression à la section 5.3.3 nous avons constaté que ces dernières sont fortement influencées par l'angle de sortie (α).

Un autre exemple de l'influence de l'angle de sortie (α) est mis en évidence sur la figure 5.36 sur laquelle la distribution de pression est tracée en fonction de la distance longitudinale.

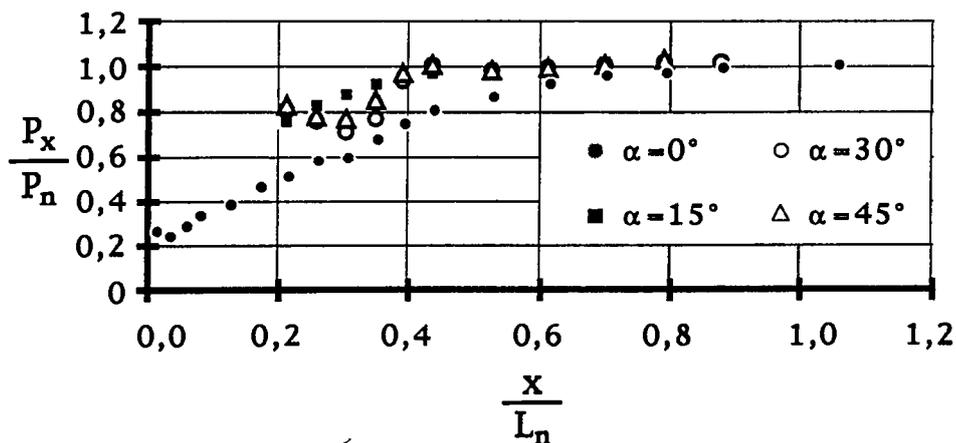


Fig. 5.36 - Influence de l'angle de sortie sur la pression moyenne
(Fr = 4,6; s \cong 59 mm; Cf = -96 mm)

Nous observons également, peu importe la valeur de L_s , que l'angle de sortie influence la distribution longitudinale de la pression moyenne pour des valeurs de x/L_n inférieure à 0,7. Les pressions pour la condition sans dissipateur ($\alpha = 0^\circ$, $C_f = 0$ mm et $s = 0$ mm) sont plus faibles que pour les autres angles. Pour les angles de 30° et 45° la pression passe par un minimum, cette position coïncide avec le point le plus haut de l'onde stationnaire (y_s). L'angle de 15° présente la même distribution que les angles de 30° et 45° après la sortie de la structure. Cependant, la pression présente une valeur minimale seulement quand la hauteur de sortie (s) ainsi que la longueur de la structure L_s sont supérieures à certaines valeurs. La définition de ces valeurs sera présentée aux paragraphes 5.5.4 et 5.5.6 (voir figure 5.5; 5.36 et 5.46).

La figure 5.37 présente un exemple de la distribution longitudinale de la fluctuation de pression pour les mêmes conditions d'essais utilisées que celles de la figure 5.36 (α et s variables et Fr , L_s et C_f constantes).

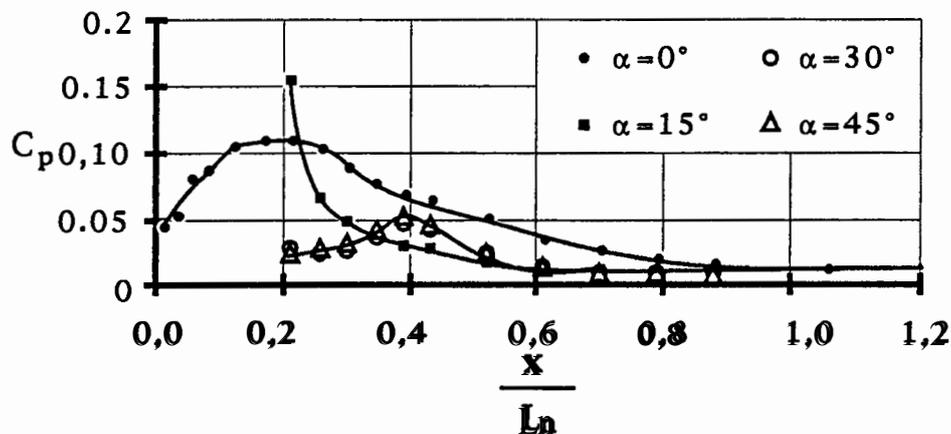


Fig. 5.37 - Influence de l'angle de sortie sur l'écart type
($Fr=4,6$; $L_s=350$ mm; $C_f=-96$ mm)

L'influence de l'angle se fait sentir jusqu'à la fin de la dissipation. La valeur et la position de la fluctuation maximale sont différentes pour chaque angle. Les valeurs de la fluctuation de pression à la sortie sont différentes aussi et la pression pour l'angle de 15° présente une valeur très élevée. Cette forte valeur à la sortie, dans ce cas, pourrait être

expliquée par le fait que la hauteur de sortie (s) est très petite et près du radier, ce qui provoque une forte succion et une instabilité de l'écoulement. Cette tendance est observée pour les structures lorsque la valeur de s est petite (voir figures 5.9; 5.37 5.39 et 5.47).

L'analyse faite au chapitre 5.33 donne un autre exemple de l'influence de l'angle sur la distribution de pression pour la condition sans dissipateur ($\alpha = 0^\circ$; $C_f = 0$ mm et $s = 0$). Nous observons, aussi, que pour les angles compris entre 15° et 45° la valeur maximale du coefficient de fluctuation de pression diminue avec l'angle et augmente pour $\alpha = 0^\circ$ (condition sans structure). Pour l'angle de 15° , la valeur de la fluctuation de pression à la sortie est plus basse que celle obtenue par la figure 5.37. Comme la hauteur de sortie est plus haute, l'effet de la succion provoqué par le jet n'atteint pas le fond du canal (figure 5.8). Lorsqu'on compare les observations faites sur l'influence de l'angle il ressort que:

- a) L'angle de sortie exerce une influence sur la forme et l'amplitude de la distribution de la pression moyenne et, principalement, sur la distribution du coefficient de fluctuation de pression.
- b) La structure avec un l'angle de 0° présente les valeurs du coefficient de fluctuation de pression le plus élevé.
- c) La valeur maximale du coefficient de fluctuation de pression augmente avec la valeur de l'angle quand la hauteur de sortie (s) est constante et l'angle est plus grand que 15° .

5.4.2 Influence de la longueur de la structure

Pour déterminer l'influence de la longueur de la structure (L_s), nous analysons la distribution de pression moyenne et la distribution du coefficient de fluctuation de pression en fonction de la distance longitudinale pour un écoulement donné (Fr constant). La figure 5.38 présente les résultats de la distribution de pression en fonction de la distance longitudinale pour le cas où les paramètres hydrauliques (Fr , y_n) et géométriques (α , C_f) sont constants, seules la longueur (L_s) et la

hauteur de sortie (s) varie étant donné le lien entre L_s et s . Dans cette condition, nous observons que la longueur n'a pas d'influence significative sur la distribution de pression.

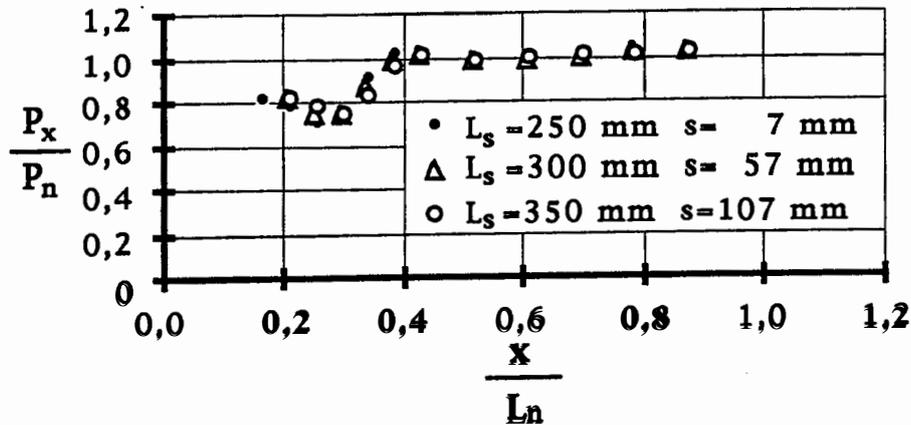


Fig. 5.38 - Influence de la longueur de la structure sur la distribution de la pression moyenne ($Fr=4,6$; $\alpha=45^\circ$; $C_f=96$ mm)

La figure 5.39 présente les mêmes conditions d'essais qu'utilisées pour la figure 5.38 mais, en fonction du coefficient de la fluctuation de pression. Nous observons que:

- En aval du point où le coefficient de la fluctuation de pression atteint une valeur maximale, la valeur du coefficient est indépendante de la longueur de la structure.
- La valeur maximale du coefficient de la fluctuation de pression (σ_{max}) diminue pour une augmentation de la longueur de la structure.
- La position de la valeur maximale de la fluctuation de pression se déplace légèrement vers l'aval lorsque la longueur de la structure augmente.
- Les structures plus courtes avec une hauteur de sortie plus basse présentent à la sortie, une valeur élevée du coefficient de fluctuation de pression. Cette forte valeur pourrait être expliquée par le fait que la hauteur de sortie (s) est très petite et proche du radier ce qui provoque une forte succion et une instabilité de l'écoulement.

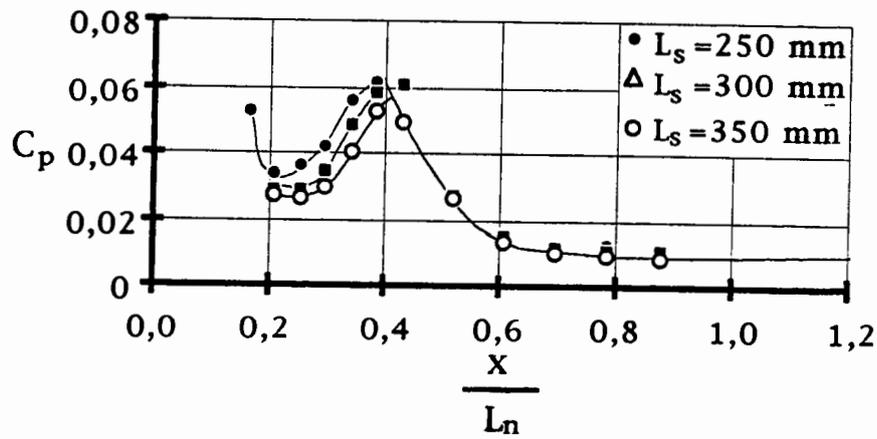


Fig. 5.39 - Influence de la longueur de la structure sur la distribution du coefficient de fluctuation de pression ($Fr=4,6$; $\alpha=45^\circ$; $C_f=-96$ mm)

5.4.3 Influence de la cote de fond de la structure

La figure 5.40 présente les résultats de la distribution de pression en fonction de la distance longitudinale pour le cas où les paramètres hydrauliques (q , Fr , y_n) et géométriques (α , L_s) sont constants. Seules la cote de fond (C_f) et la hauteur de sortie (s) varient étant donné le lien entre C_f et s . Nous observons, pour cette condition, que la cote de fond n'a pratiquement pas d'influence sur la distribution de pression moyenne.

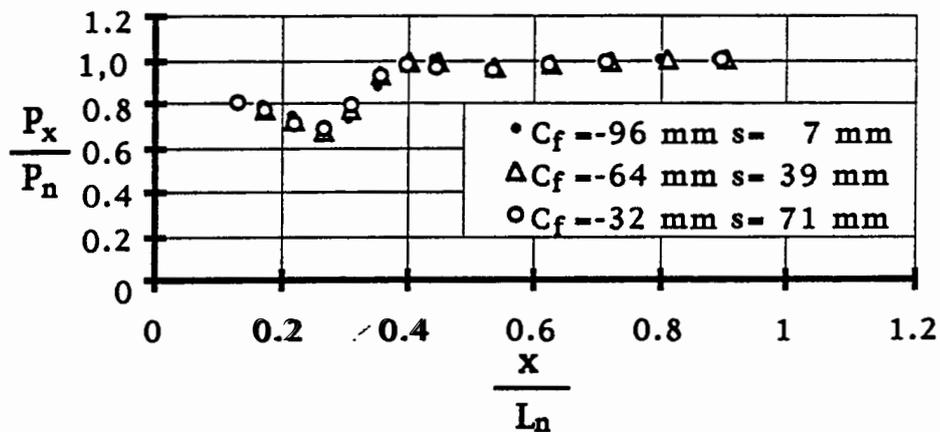


Fig. 5.40 - Influence de la cote de fond sur la distribution de la pression moyenne ($Fr=4,6$; $\alpha=45^\circ$; $L_s=250$ mm)

La figure 5.41 montre aussi la distribution de pression en fonction de la distance longitudinale pour le même écoulement que celui de la figure 5.40, mais cette fois en faisant varier la valeur de L_s pour avoir la même hauteur de sortie. Nous observons que:

- pour $x/L_n > 0,5$, la relation $P_x/P_n \approx 1,0$;
- pour la région comprise entre la fin de la structure et la position de minima pression, les structures avec une cote de fond plus haute présentent des pressions légèrement plus faibles.

La figure 5.42 présente la distribution du coefficient de fluctuation de pression pour les mêmes conditions d'essais utilisées à la figure 5.40. Nous observons que:

- la position et la valeur maximale du coefficient de fluctuation de pression sont indépendantes de la cote de fond de la structure;
- les cotes plus basses avec une petite hauteur de sortie présentent les valeurs les plus fortes du coefficient de fluctuation de pression à la sortie.

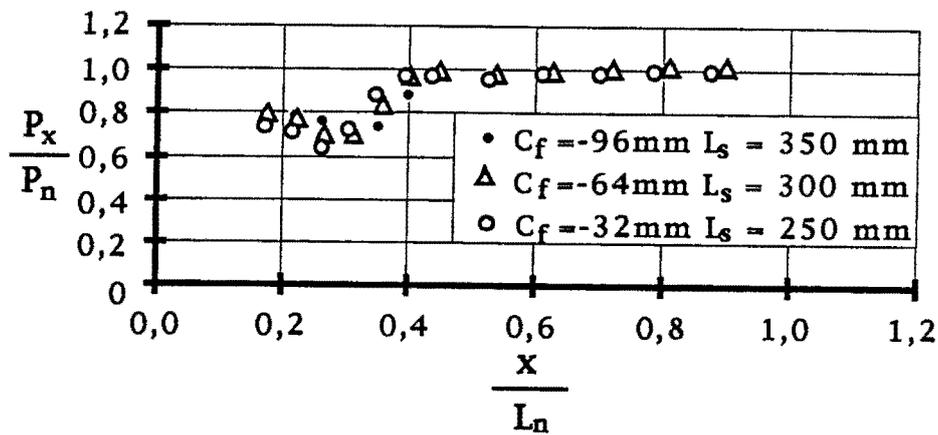


Fig. 5.41 - Influence de la cote de fond sur la distribution de la pression moyenne ($Fr=4,6$; $\alpha=30^\circ$; $s=50\text{ mm}$)

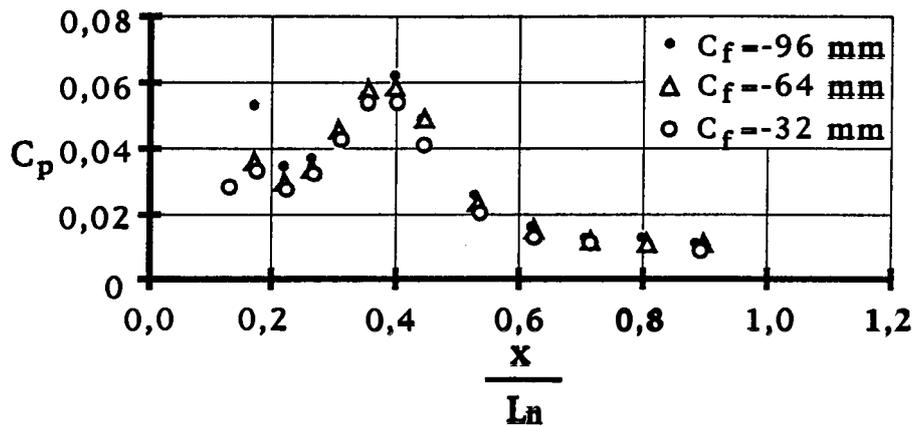


Fig. 5.42 - Influence de la cote de fond sur la distribution du coefficient de fluctuation de pression ($Fr=4,6$; $\alpha=45^\circ$; $L_s=250$ mm)

La figure 5.43 présente la distribution du coefficient de fluctuation de pression les mêmes conditions d'essais représentent sur la figure 5.41. Nous observons que la cote de fond n'a pas d'influence, sauf sur la position de la valeur maximale du coefficient de fluctuation. Cet effet est expliqué par la longueur de la structure et non par la cote de fond (voir paragraphe 5.4.2) étant donné la relation entre C_f et s .

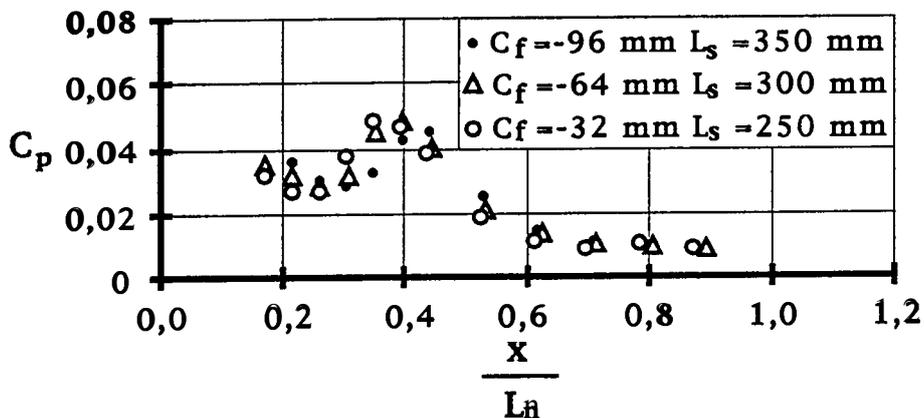


Fig. 5.43 - Influence de la cote de fond sur la distribution du coefficient de fluctuation de pression ($Fr=4,6$; $\alpha=30^\circ$; $s=50$ mm)

5.4.4 Influence de la hauteur de sortie

Étant donné le lien entre s et α , de même que le lien entre s et L_s ou s et C_f , les conclusions sur l'influence de s sur la distribution du coefficient de fluctuation de pression sont basées sur les analyses faites précédemment sur l'influence de l'angle, de la longueur et de la cote de fond. Nous avons constaté que l'écoulement à la sortie de la structure, en raison de sa haute vitesse, provoque une succion et son effet peut atteindre le radier du canal si la hauteur de sortie est petite et provoque une instabilité de l'écoulement.

La figure 5.44 présente un exemple de la distribution de pression, pour un l'angle de 15° pour lequel, les paramètres hydrauliques (Fr , y_n) et géométriques (α , C_f) sont constants. Seules la longueur (L_s) et la hauteur de sortie (s) varient. Comme dans le cas de la figure 5.38, nous observons que la hauteur de sortie n'a pas une grande influence sur la distribution de pression.

Pour des valeurs constantes de la longueur et de l'angle, les conclusions vont dans le même sens que celles obtenues lors de l'analyse de l'influence de la cote de fond (figure 5.41 et 5.42). La hauteur de sortie n'a pratiquement pas d'influence sur la pression moyenne (figure 5.42).

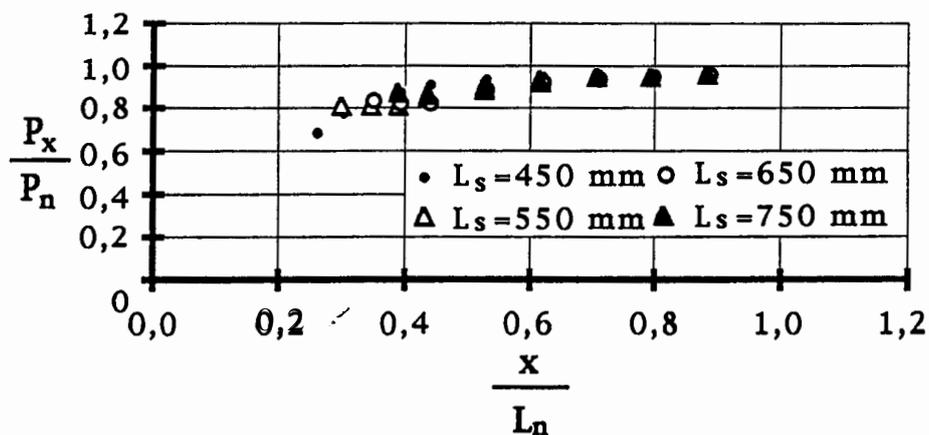


Fig. 5.44 - Influence de la hauteur de sortie sur la distribution de pression moyenne ($Fr=4,6$; $\alpha=15^\circ$; $C_f=-96$ mm)

En analysant la distribution de fluctuation de pression pour le même écoulement et gardant constants l'angle et la cote de fond, nous observons que σ_s diminue lorsque L_s augmente et une forme de distribution semblable aux autres angles commence à apparaître (figure 5.45).

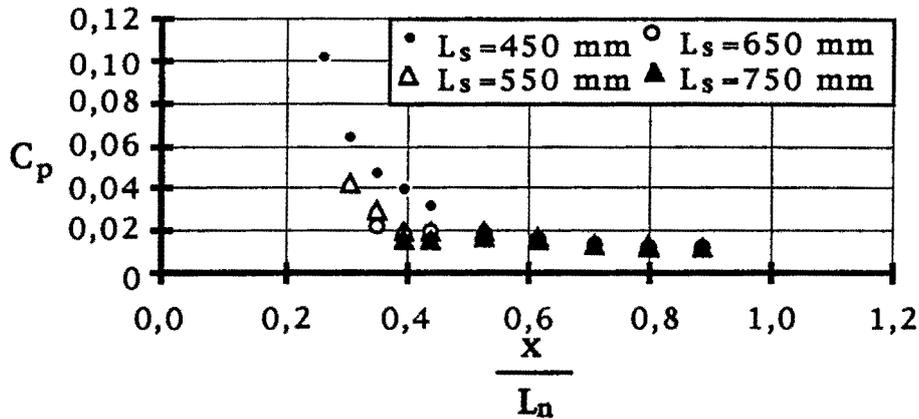


Fig. 5.45 - Influence de la hauteur de sortie sur la distribution du coefficient de fluctuation de pression ($Fr=4,6$; $\alpha=15^\circ$; $C_f=-96$ mm)

Sur la figure 5.39, qui représente, sauf pour l'angle (45°), les mêmes conditions que celles de la figure 5.45, la valeur maximale du coefficient de fluctuation de pression diminue lorsque la hauteur de sortie de la structure augmente. La position de la valeur maximale du coefficient de la fluctuation de pression se déplace vers l'aval quand on augmente la hauteur de sortie. En aval de la valeur maximale, l'allure de la courbe est indépendante de la hauteur de sortie de la structure (figure 5.39).

Pour le cas où les paramètres hydrauliques Fr , y_n et géométriques α , C_f sont constants, seules la longueur (L_s) et la hauteur de sortie (s) varient étant donné le lien entre elles (exemple figures 5.39 et 5.45). Dans ce cas, nous observons qu'en amont de la position $x = 0,6 L_n$, le coefficient de fluctuation de pression à la sortie varie dans le sens inverse de la hauteur de sortie s . Après la fluctuation maximale, la distribution est indépendante s .

L'allure générale de distribution de la valeur moyenne de fluctuation de pression (σ) en aval de la structure de dissipation pour différentes valeurs de s (α et L_s constante ; $s=f(C_f)$) est montrée sur la figure 5.46.

En aval de la position où le jet frappe le fond du canal ($L\sigma_{\max}$), la distribution d'un écoulement donné est indépendante de la hauteur s (ligne cd). Pour la région comprise entre la sortie de la structure (L_s) et la zone d'impact ($L\sigma_{\max}$), nous avons remarqué que la courbe qui décrit σ demeure plus haute lorsque s est plus faible qu'une certaine valeur. Nous avons défini deux valeurs critiques de s :

- s_1 correspond à la valeur de s à partir de laquelle elle n'a pas d'influence sur σ_i ;
- s_2 correspond à la valeur de s au-delà de laquelle s n'a pas d'influence sur σ_s .

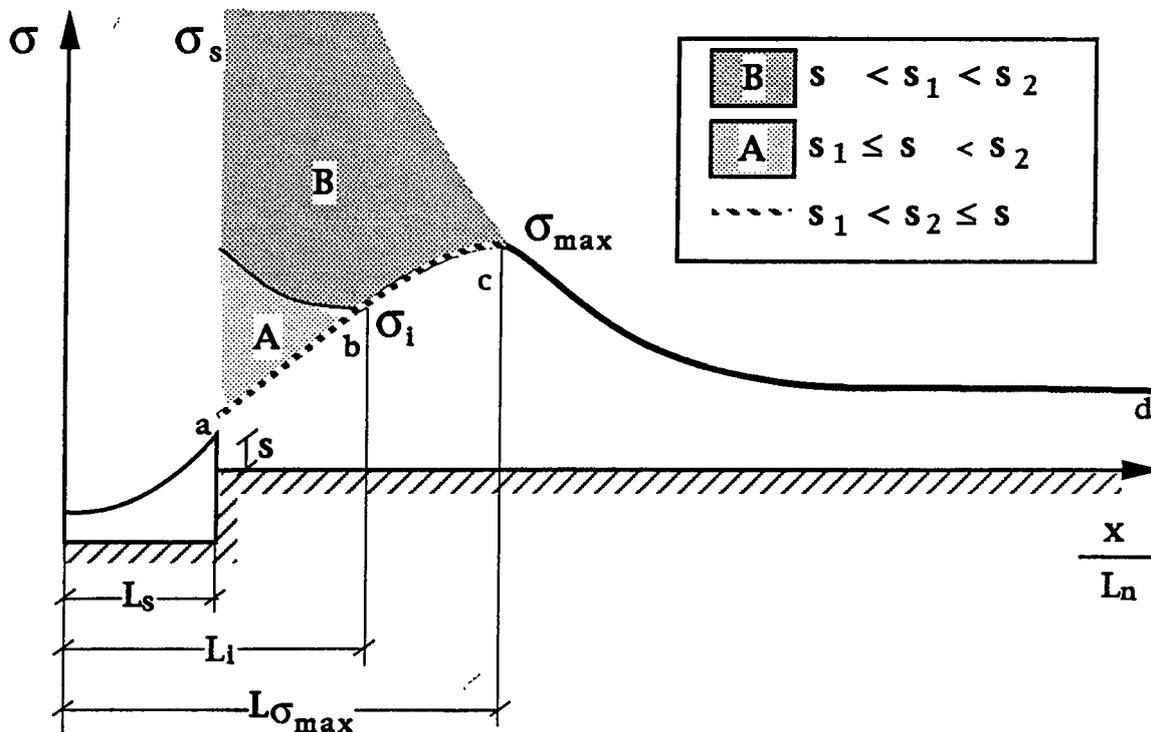


Fig. 5.46 - Schéma montrant l'influence de s sur σ

Nous avons constaté que la valeur de s_1 est toujours plus petite que la valeur de s_2 . De cette façon, nous pouvons définir pour les positions L_s , L_i et $L_{\sigma_{\max}}$ trois (3) configurations différentes pour la distribution de la valeur moyenne de fluctuation de pression (exemple: figures 5.39, 5.43 et 5.45):

- a) $s \geq s_2 > s_1$: les valeurs de σ_s et σ_i sont faibles et $\sigma_{\max} > \sigma_i > \sigma_s$ (ligne abcd)
- b) $s_2 > s \geq s_1$: les valeurs de σ_s commencent à augmenter, mais $\sigma_{\max} > \sigma_i$ et $\sigma_{\max} \geq \sigma_s$ (zone A).
- c) $s_2 > s_1 > s$: les valeurs de σ_s et σ_i augmentent, mais $\sigma_s \geq \sigma_i$ et $\sigma_s \geq \sigma_{\max}$. La position de σ_i (L_i) par rapport à l'origine est la même. Les valeurs de σ_s et σ_i peuvent être plus élevées que σ_{\max} (zone B)

Plus la valeur de s diminue, plus le jet à la sortie de la structure est près du radier et l'effet de la succion augmente. Les angles petits favorisent un jet plus près du fond par conséquent, s doit être plus grand pour diminuer l'instabilité.

5.5 Comportement typique

La vitesse d'écoulement sur l'évacuateur atteint sa valeur maximale au fond de l'auge. L'écoulement prend la forme d'un jet et frappe le radier du canal. Une partie importante de l'écoulement se disloque vers l'aval, ras au fond jusqu'au point où la profondeur du jet tend rapidement vers la profondeur normale du canal accompagné d'une zone de remontée de bulles d'air. Une partie secondaire du jet retourne vers l'amont, ras au fond jusqu'au point où un rouleau de fond près du pied de la structure se forme. Entre la structure et la position où l'écoulement retourne au régime normal, nous observons une zone très turbulente, et aérée (figure 5.47).

L'analyse de l'ensemble des essais indique qu'en aval de la structure, la distribution de la pression moyenne et de la valeur moyenne de fluctuation de pression (écart type de l'échantillon de pression) présentent un comportement identique et typique, tel qu'indiqué à la figure 5.47. Nous pouvons déterminer six (6) positions d'intérêt, mesuré à partir du point le plus bas de la structure. La plupart de ces positions ont une signification physique liée au comportement de l'écoulement et/ou la géométrie de la structure (chapitres 5.3.3, 5.3.5 et 5.3.6). Ces positions d'amont vers aval sont les suivants:

- a) L_s = position qui correspond à la sortie de la structure;
- b) L_i = position qui correspond au point où la pression moyenne présente une valeur minimale. Cette position correspond également à l'endroit où la valeur moyenne de fluctuation de pression passe par une valeur minimale lorsque la hauteur de sortie s est plus petite qu'une certaine valeur et aussi à l'endroit où le niveau d'eau atteint la cote la plus haute. Cette position coïncide aussi avec la présence du rouleau de fond situé en aval de la structure.
- c) $L_{\sigma_{max}}$ = position qui correspond à l'endroit où la valeur moyenne de fluctuation de pression présente une valeur maximale (σ_{max}). Physiquement, cette position coïncide avec le point d'impact du jet principal sur le radier.
- d) L_t = position à partir de laquelle la composante verticale de la vitesse du jet est significative. C'est à partir de cette position que l'épaisseur du jet tend rapidement vers toute la profondeur normale de l'écoulement. Cette position est définie par la droite qui passe par σ_{max} et par le point où le gradient de la fluctuation de pression change de valeur.
- e) L_a = position où le jet principal atteint toute la profondeur de l'écoulement. À cette position, nous observons de nombreuses bulles d'air et l'écoulement est encore instable. Cette position est définie par l'intersection de deux droites. Une droite est parallèle au fond du canal avec une valeur de σ_n et une autre qui passe par σ_{max} et σ_t ;

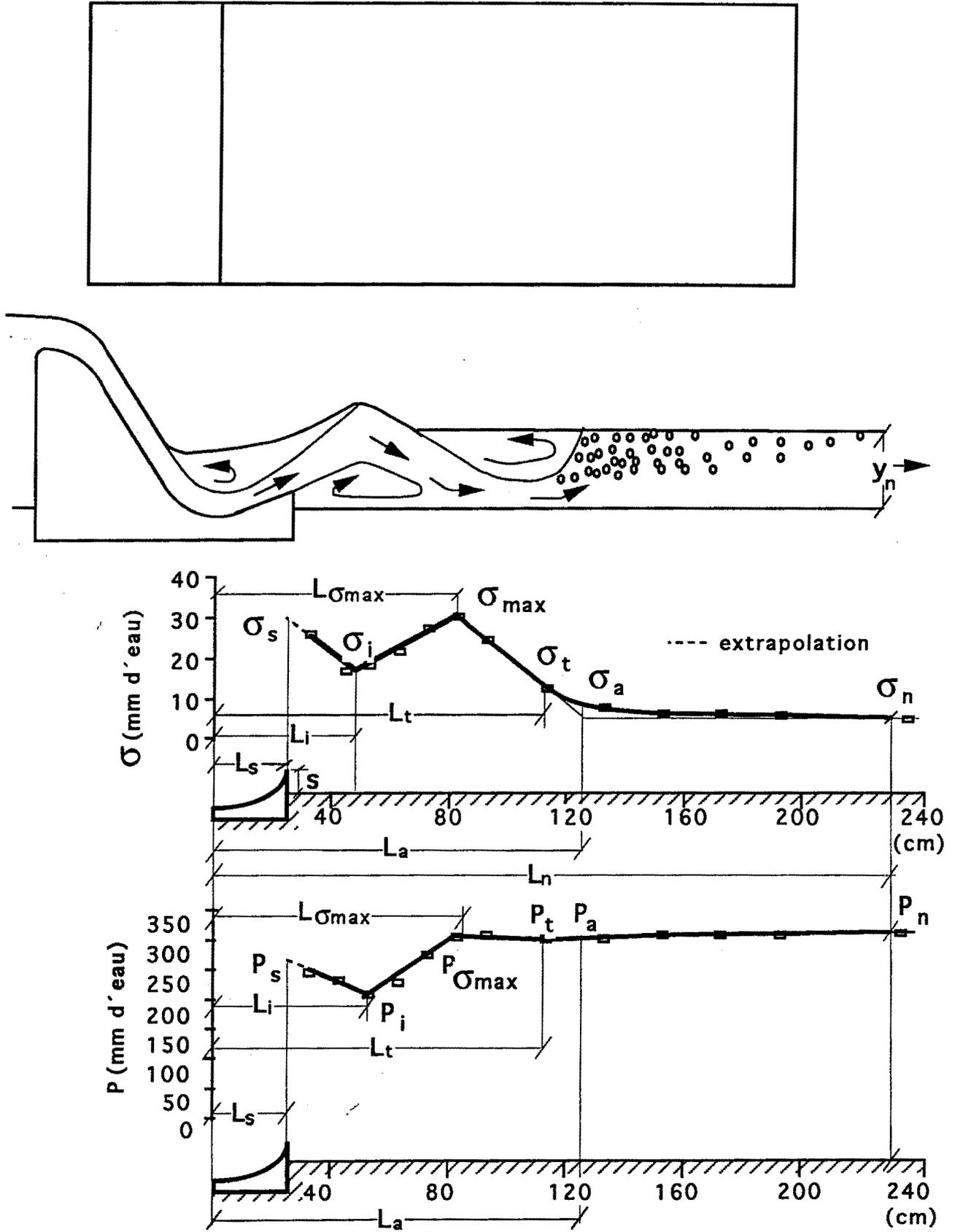


Fig. 5.47 - Comportement typique ($Fr=4,6$; $C_f=-96mm$, $L_s=250$ mm; $\alpha=45^\circ$)

- f) L_n = position qui délimite l'influence de la structure de dissipation. Les valeurs de la pression moyenne et les valeurs moyennes de la fluctuation de pression deviennent constantes. En aval de cette position nous retrouvons le régime normal de l'écoulement.

L'estimation des efforts est très importante pour le choix des caractéristiques du dissipateur à utiliser dans un projet pour les raisons énumérées aux chapitres 2.3 et 3.8. Ces efforts sont liés directement à la pression moyenne et à la valeur moyenne de fluctuation de pression (écart type) en aval du dissipateur. Dans le paragraphe suivant, nous avons essayé de trouver, par tâtonnement, des relations adimensionnelles (fonction des paramètres géométriques et des conditions hydrauliques), qui caractérisent les six (6) positions définies ci-dessus.

5.5.1 Établissement des caractéristiques de la position L_n où se termine l'influence du dissipateur

a) Détermination de la position L_n

Nous avons défini la position L_n au paragraphe 5.5. L'analyse de l'ensemble de tous les essais a permis de mettre en évidence que la longueur d'influence du dissipateur est fonction de la différence d'énergie (ΔH) entre l'amont et l'aval du dissipateur et du nombre de Froude (Fr). Nous avons porté sur la figure 5.42 la valeur adimensionnelle de cette longueur sous la forme $L_n Fr / \Delta H$ en fonction de l'angle de sortie.

Nous observons que les points sont tout concentrés autour d'une droite, de sorte que la valeur de $L_n Fr / \Delta H$ est constante et indépendante de l'angle de sortie. La valeur de la constante est égale à 18. Ainsi:

$$\frac{L_n}{\Delta H} Fr = 18,0 \quad (5.6)$$

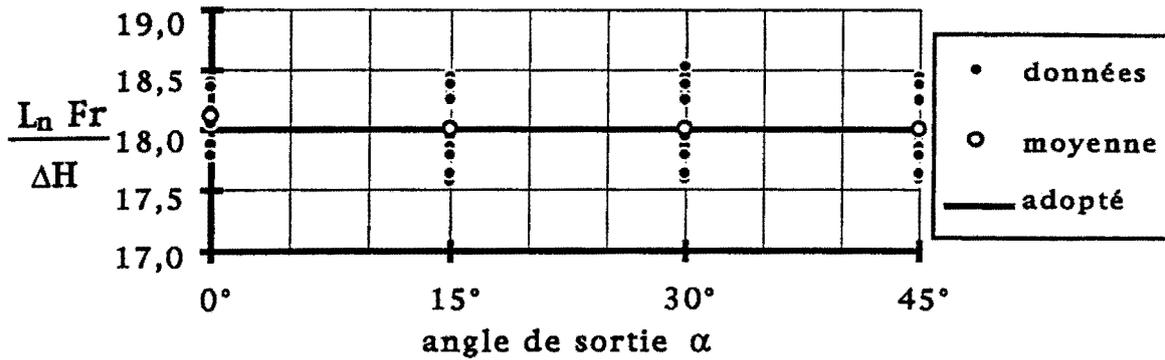


Fig. 5.48 - Détermination de la position réduite ($L_n Fr/\Delta H$) en fonction de l'angle de sortie de la structure

Le tableau 5.3 résume les valeurs de la figure 5.48 d'une façon intéressante. Nous remarquons que les valeurs maximales, minimales et moyennes présentent des valeurs presque constantes, quel que soit l'angle.

Angle	Nombre des essais	$L_n * Fr / \Delta H$		
		Maximum	Moyenne	Minimum
0°	6	18,4	18,1	17,8
15°	38	18,8	18,0	17,6
30°	45	18,5	18,0	17,6
45°	55	18,4	18,0	17,6
Total	144	18,8	18,03	17,6
	Adopté	18,8	18,0	17,6

Tab. 5.3 - Valeurs de la longueur L_n

b) Détermination de la pression moyenne (P_n)

Étant donné la définition de la position L_n , la pression moyenne à cet endroit (P_n), exprimée en hauteur d'eau, est égale à y_n donc:

$$P_n = \gamma y_n \quad (5.7)$$

c) Détermination de la valeur moyenne de la fluctuation de pression (σ_n)

Pour la valeur moyenne de la fluctuation de pression (σ_n) nous avons trouvé une valeur moyenne de $\approx 0,015 P_n$ (figura 5.49 et équation 5.8) correspondant à une valeur de C_{p_n} , c'est-à-dire $\sigma_n/(v^2/2g)$, près de 0,01 (exemples: figures 5.6; 5.8; 5.9; 5.37; 5.39; 5.42; 5.43 et 5.45).

$$\sigma_n = 0,015 P_n \quad (5.8)$$

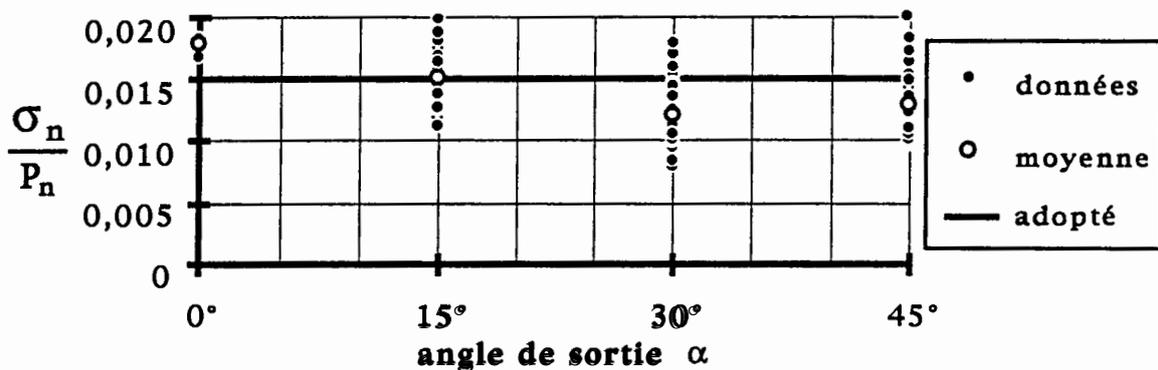


Fig. 5.49 - Valeur moyenne de la fluctuation de pression (σ_n) à la position L_n

5.5.2 Établissement des caractéristiques de la position auxiliaire L_a

a) Détermination de la position L_a

Nous avons défini la position L_a au chapitre 5.5. L'analyse des résultats met en évidence que L_a est influencée par l'angle de sortie, la valeur du nombre de Froude et la différence d'énergie entre l'amont et l'aval. Étant donné la relation 5.6, nous avons cherché à établir un lien entre L_n , L_a , et α . Nous avons indiqué sur la figure 5.46 les valeurs de L_a/L_n en fonction de α . Nous pouvons observer que L_a/L_n diminue d'une façon graduelle lorsque l'angle augmente. L'équation 5.9 exprime la relation linéaire entre L_a/L_n et α . Le tableau 5.4 résume les valeurs qui apparaissent sur la figure 5.50.

$$\frac{L_a}{L_n} = 0,70 - 0,15 \frac{\alpha\pi}{180^\circ} \quad (5.9)$$

Pour déterminer la position auxiliaire L_a , nous avons utilisé les résultats de 16 essais seulement pour un angle de 15° , parce que nous n'étions pas capables de déterminer la droite qui passait par σ_{\max} et σ_t , en raison de la forme de la courbe de distribution de la valeur moyenne de la fluctuation de pression (exemple: figures 5.37 et 5.45).

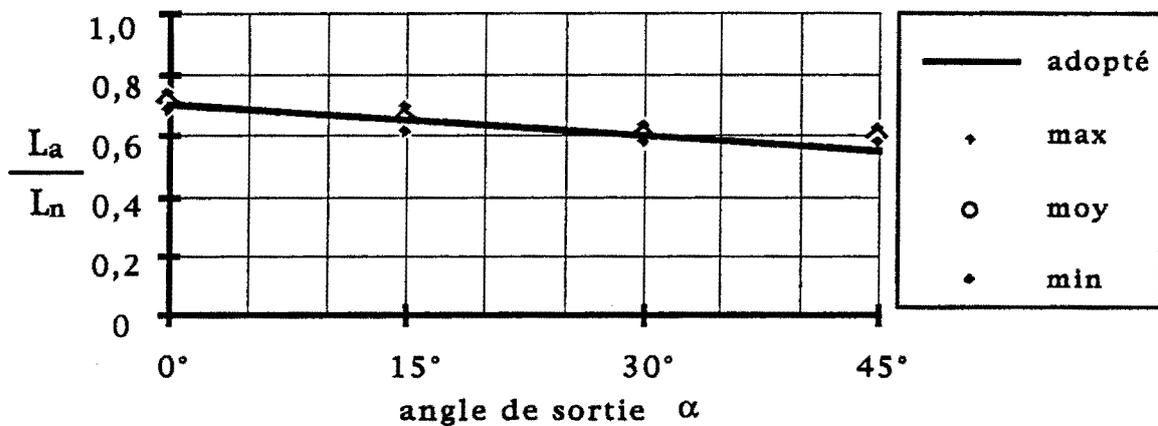


Fig. 5.50 - Détermination de la position L_a en fonction de l'angle de sortie de la structure

Angle	Nombre des essais	L_a/L_n		
		Maximum	Moyenne	Minimum
0°	6	0,73	0,7	0,68
15°	16	0,71	0,65	0,60
30°	45	0,62	0,59	0,57
45°	55	0,62	0,59	0,57
Total	122	-	-	-

Tab. 5.4 - Valeurs de la longueur L_a

b) Détermination de la pression moyenne (P_a)

À partir de la relation 5.9 qui donne la position L_a , nous avons analysé, pour cette position, la valeur de la relation P_a/P_n en fonction de l'angle

de sortie de la structure. Les résultats sont portés sur la figure 5.51 sur laquelle nous observons que la valeur de P_a/P_n est sensiblement constante et égale à 0,97 quel que soit l'angle de sortie.

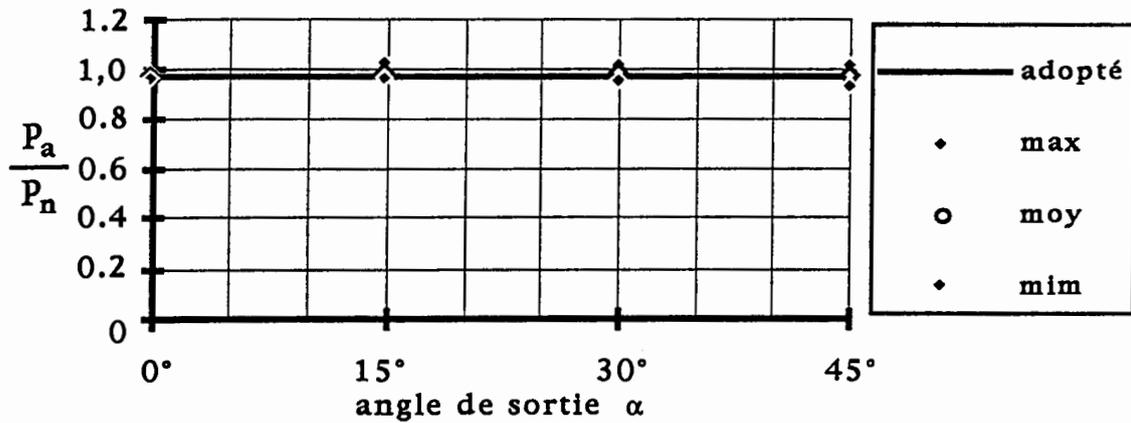


Fig. 5.51 - Pression moyenne réduite (P_a/P_n) à la position auxiliaire L_a en fonction de l'angle α

c) Détermination de la valeur moyenne de la fluctuation de pression σ_a

D'une façon analogue à la pression moyenne, nous avons analysé la distribution de la fluctuation de pression (σ_a) en fonction de l'angle de sortie à la position L_a pour l'ensemble des essais (figure 5.52).

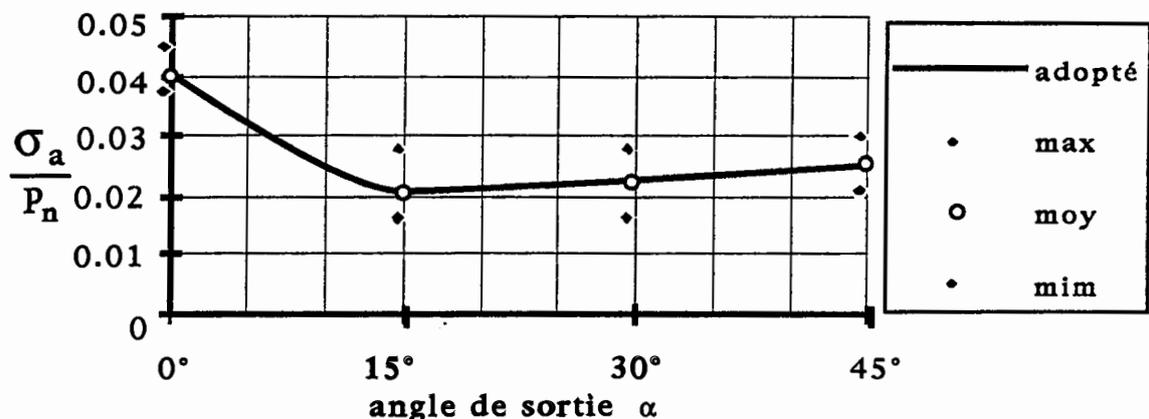


Fig. 5.52 - Valeur moyenne réduite de la fluctuation de pression (σ_a/P_n) à la position auxiliaire L_a en fonction de l'angle α

Les résultats de la figure 5.52 indiquent, contrairement à la valeur de la pression moyenne, l'influence de l'angle de sortie. En effet, la valeur de la fluctuation de pression passe de 0,040 pour un angle de 0° à environ 0,025 pour un angle pour de 15°, après quoi elle demeure presque constante.

5.5.3 Établissement des caractéristiques de la position de tangence L_t

a) Détermination de la position L_t

Nous avons défini la position L_t au chapitre 5.5. L'analyse de la distribution de la valeur moyenne de la fluctuation de pression a montré que la position L_t est influencée seulement par le nombre de Froude et la différence d'énergie entre l'amont et l'aval. Étant donné l'équation 5.6, nous avons cherché à établir un lien entre L_t et L_n . Nous présentons au tableau 5.5 les valeurs de L_t/L_n en fonction de l'angle de sortie. Nous pouvons observer que le rapport L_t/L_n est constant et égal à 0,52. L'équation 5.9 exprime la relation entre L_t/L_n .

$$\frac{L_t}{L_n} = 0,52 \quad (5.9)$$

Angle	Nombre des essais	L_t/L_n		
		Maximum	Moyenne	Minimum
0°	6	0,55	0,53	0,50
15°	16	0,55	0,52	0,49
30°	45	0,55	0,52	0,50
45°	55	0,55	0,53	0,49
Total	122	0,55	0,52	0,50
	Adopté	0,55	0,52	0,50

Tab. 5.5 - Position de la section de tangence

Pour le même motif que celui utilisé pour l'étude de la position L_a , nous n'avons utilisé que les résultats de 16 essais, avec un angle de 15° , pour déterminer la position auxiliaire L_t . En effet, nous étions incapables de déterminer la droite passant par σ_{\max} et σ_t , en raison de la forme de la courbe de distribution de la valeur moyenne de la fluctuation de pression (exemple: figures 5.37 et 5.47).

b) Détermination de la pression moyenne P_t

Les valeurs manquantes à L_t ont été reconstituées à partir de l'équation 5.9. Connaissant la valeur de L_t pour tous les essais il a été facile d'évaluer la valeur correspondante de la pression P_t . Les valeurs de P_t/P_n sont portées en fonction de l'angle sur la figure 5.53. Nous observons que la valeur de P_t/P_n est sensiblement constante et égale à 0,97. Seul l'angle $\alpha=0^\circ$ présente une valeur légèrement inférieure, voisine de 0,90.

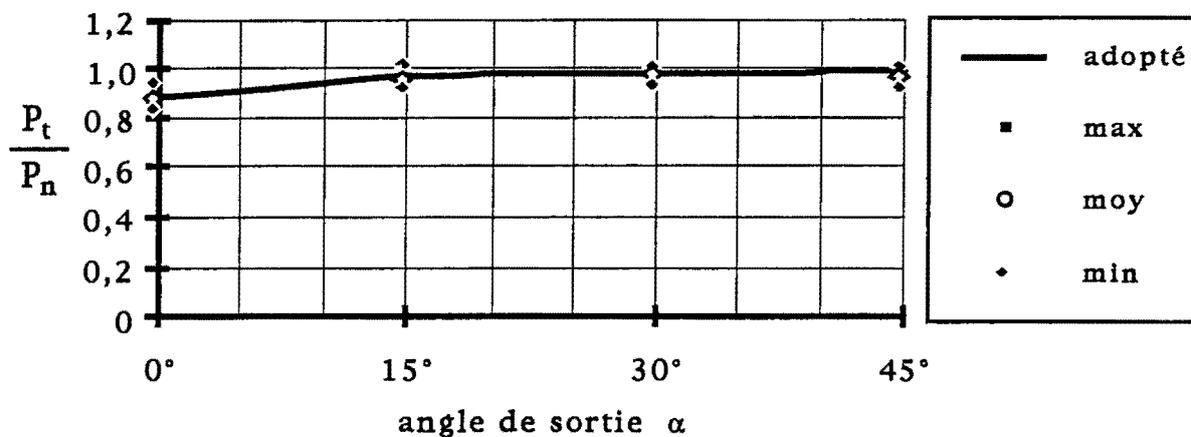


Fig. 5.53 - Pression moyenne réduite (P_t/P_n) à la position de tangence L_t en fonction de l'angle α

c) Détermination de la valeur moyenne de la fluctuation de pression σ_t

D'une façon analogue à l'étude de la pression moyenne, nous avons analysé pour la position L_t la valeur moyenne de la fluctuation de pression (σ_t), en fonction de l'angle de sortie (figure 5.54).

À partir des résultats de la figure 5.54, nous observons que la valeur de σ_t/P_n diminue d'une valeur voisine de 0,08 pour $\alpha=0^\circ$ à une valeur égale à environ 0,03 pour $\alpha \geq 15^\circ$.

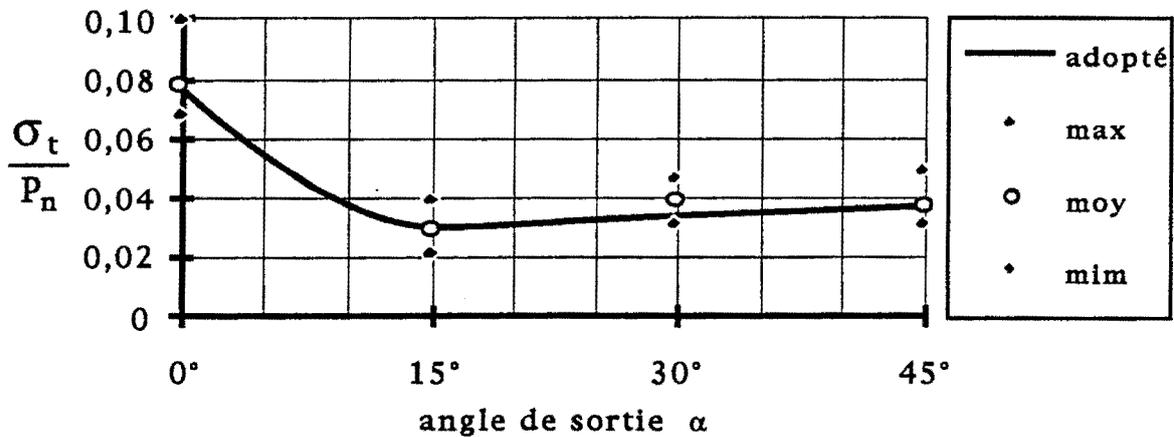


Fig. 5.54 - Valeur moyenne réduite de la fluctuation de pression (σ_t/P_n) à la position auxiliaire L_t en fonction de l'angle α

5.5.4 Établissement des caractéristiques de la position d'impact du jet ($L\sigma_{max}$)

a) Détermination de la position $L\sigma_{max}$

Nous avons défini la position $L\sigma_{max}$ au paragraphe 5.5. L'analyse de la distribution de pression et de la distribution de la valeur moyenne de la fluctuation de pression a montré que $L\sigma_{max}$ est influencée par l'angle de sortie, la valeur du nombre de Froude et la différence d'énergie entre l'amont et l'aval. Étant donné la relation 5.6, nous avons cherché à établir une relation entre $L\sigma_{max}$, L_n et α . Les résultats obtenus vérifient l'équation 5.10 empirique suivante:

$$\frac{L\sigma_{max}}{L_n} = C_{L\sigma_{max}} + \frac{L_s}{L_n} - \frac{R \sin \alpha}{L_n} \quad (5.10)$$

où

$L_{\sigma_{\max}}$ = position correspondante au point d'impact du jet;

L_n = position qui délimite l'influence de la structure;

L_s = longueur de la structure;

$R \sin \alpha$ = longueur de la plus petite structure possible avec un angle et un rayon donné (exclut la part rampe ascendante de la structure);

$C_{L_{\sigma_{\max}}}$ = coefficient auxiliaire pour déterminer la position de $L_{\sigma_{\max}}$. Pour évaluer la valeur de ce coefficient, ce dernier a été isolé à partir de l'équation 5.10. La valeur obtenue a été portée sur la figure 5.55 en fonction de l'angle.

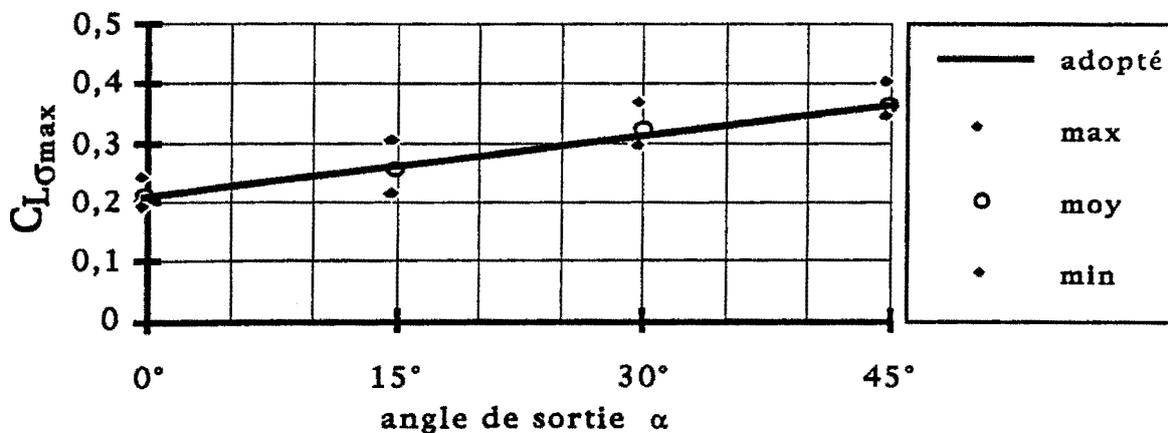


Fig. 5.55 - Coefficient $C_{L_{\sigma_{\max}}}$ pour déterminer la position de $L_{\sigma_{\max}}$

Nous pouvons observer que $C_{L_{\sigma_{\max}}}$ augmente graduellement avec l'angle, à partir d'une valeur voisine de 0,21 pour $\alpha = 0^\circ$ jusqu'à une valeur de $\approx 0,36$ pour $\alpha = 45^\circ$. L'équation de régression linéaire suivante représente bien les résultats.

$$C_{L_{\sigma_{\max}}} = 0,21 + 0,20 \frac{\alpha \Pi}{180^\circ} \quad (5.11)$$

b) Détermination de la pression moyenne $P_{\sigma_{\max}}$

À partir de la connaissance de la position $L_{\sigma_{\max}}$, il a été facile d'obtenir la pression moyenne correspondante ($P_{\sigma_{\max}}$). Cette dernière exprimée par rapport à la pression P_n a été portée sur la figure 5.56. Nous

observons que la valeur de $P\sigma_{\max}/P_n$ augmente rapidement de 0,5 à 0,95 lorsque l'angle augmente de 0° à 15° . Pour des angles compris entre 15° et 45° , $P\sigma_{\max}/P_n$ est presque constant est égal à 0,95.

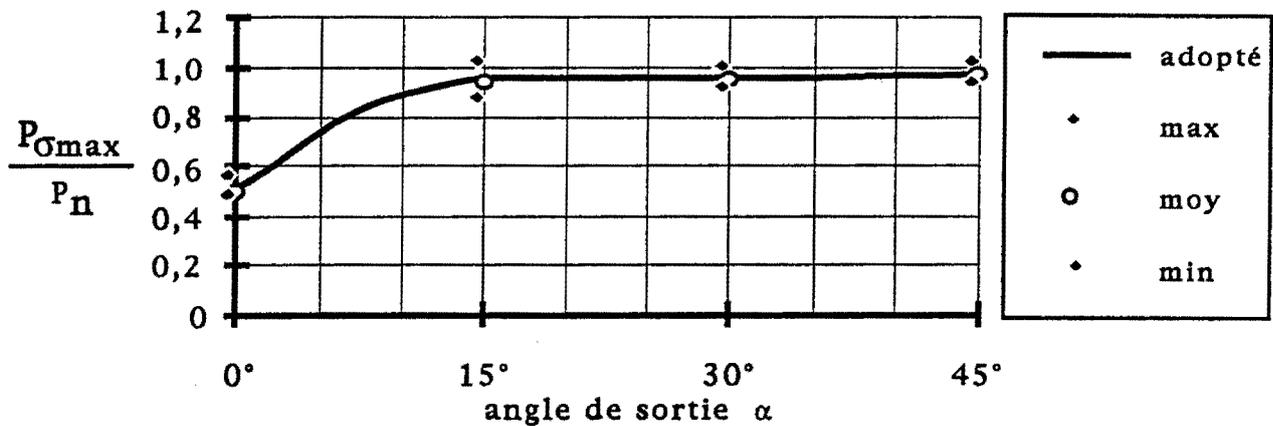


Fig. 5.56 - Pression moyenne réduite ($P\sigma_{\max}/P_n$) à la position $L\sigma_{\max}$ en fonction de l'angle α

c) Détermination de la valeur moyenne de fluctuation de pression σ_{\max}

L'analyse de la distribution de la valeur moyenne de la fluctuation de pression a montré que $L\sigma_{\max}$ est influencé par l'angle de sortie, la valeur du nombre de Froude, la différence d'énergie entre l'amont et l'aval et la longueur de la structure. Étant donné l'équation 5.6, nous avons cherché à établir un lien entre σ_{\max} , α , F_t , L_n , L_s , le regroupement tel que porté à la figure 5.57 donne les meilleurs résultats que l'on a pu obtenir. Pour les longueurs (L_s) plus grandes que $0,3 L_n$, la valeur de σ_{\max} reste constante, pour un écoulement et un angle donnés. Nous devons nous rappeler que la valeur maximale de fluctuation de pression se déplace sur la courbe lorsqu'on augmente la longueur de la structure (paragraphe 5.4.2 - figure 5.40). L'analyse de la figure 5.57 permet de constater que pour un écoulement donné, le terme réduit $\frac{\sigma_{\max} \cos \alpha}{P_n \sqrt{Fr}}$ reste constant en

fonction de L_n et L_s lorsque la structure est plus grande ou égale à $0,3 L_n$. Quand $L_s \geq 0,3 L_n$, la position de $L\sigma_{\max}$ sera égale ou plus

grande que la position L_t ¹. De cette façon, l'écoulement est dans la partie où la variation de σ est très faible (zone de transition) et proche de la limite σ_n de la valeur moyenne de la fluctuation de pression. À la position L_t , l'écoulement décolle du fond et la vitesse a encore une composante perpendiculaire au radier.

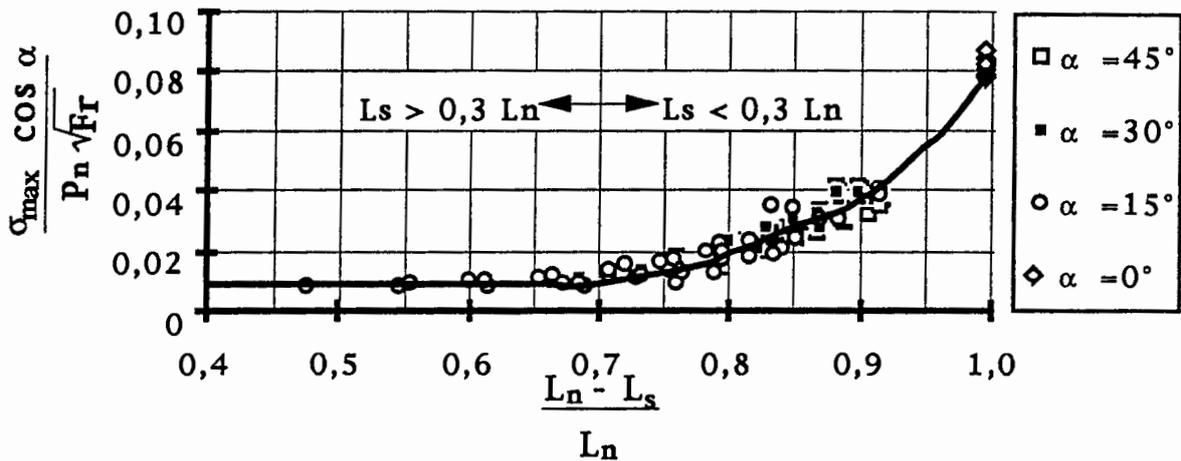


Fig. 5.57 - Valeur moyenne réduite de la fluctuation de pression à la position $L_{\sigma_{\max}}$ en fonction de la longueur réduite de la structure

5.5.5 Établissement des caractéristiques de la position intermédiaire (L_i)

a) Détermination de la position L_i

Nous avons défini la position L_i au chapitre 5.5. Elle est définie par la position où la distribution de la pression moyenne passe par un minimum (P_i) et/ou par la position où la distribution de la valeur moyenne de la fluctuation de pression passe par un minimum (σ_i). En fonction de la forme de ces courbes de distributions, nous étions incapables de déterminer la position de P_i en 44 essais et de σ_i en 88 essais (par exemple: $\alpha = 0^\circ$ figure 5.37 et 5.38; $\alpha = 15^\circ$ figure 5.44 et 5.45).

¹ Lorsque $\frac{L_s}{L_n} \geq 0,3$ nous aurons $\frac{L_{\sigma_{\max}}}{L_n} \geq 0,51 + \sin \alpha \left(0,21 - \frac{R}{L_n} \right)$ et comme $\frac{L_t}{L_n} \cong 0,52$ donc, $L_{\sigma_{\max}} \geq L_t$.

Les analyses de la distribution de pression et de la distribution de la valeur moyenne de la fluctuation de pression ont montré que L_i est influencée par la valeur du nombre de Froude, la différence d'énergie entre l'amont et l'aval et la longueur de la structure. Étant donné la relation 5.6, nous avons cherché à établir une relation entre L_i et L_n . La figure 5.58 montre cette relation sous forme réduite. Nous observons que les résultats présentent une relation linéaire indépendante de l'angle de sortie qui peut être exprimée par l'équation 5.12. Le tableau 5.6 résume les principales caractéristiques des données.

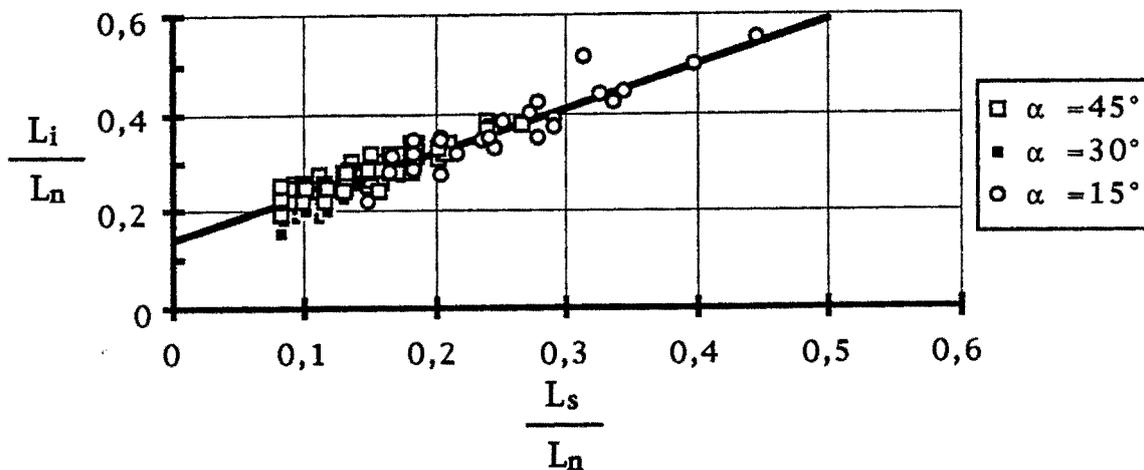


Fig. 5.58 - Détermination de la position réduite (L_i/L_n) en fonction de la longueur réduite de la structure (L_s/L_n)

Angle	Relation	Nombre de points			r
		$L_i=f(P_i)$	$L_i=f(\sigma_i)$	Utilisés	
15°	$\frac{L_i}{L_n} = 0,130 + 0,925 \frac{L_s}{L_n}$	24	16	40	0,914
30°	$\frac{L_i}{L_n} = 0,151 + 0,852 \frac{L_s}{L_n}$	44	39	83	0,905
45°	$\frac{L_i}{L_n} = 0,132 + 0,868 \frac{L_s}{L_n}$	52	21	73	0,853
adopté	$\frac{L_i}{L_n} = 0,13 + 0,90 \frac{L_s}{L_n}$	120	76	196	0,949

Tab. 5.6 - Valeurs de $L_i/L_n = f(L_s/L_n)$

$$\frac{L_i}{L_n} = 0,13 + 0,90 \frac{L_s}{L_n} \quad (5.12)$$

b) Détermination de la pression moyenne P_i

Les valeurs manquantes à L_i ont été reconstituées à partir de l'équation 5.12. Avec la connaissance de L_i les valeurs correspondantes P_i et σ_i ont été déterminées sur les courbes de distributions de pression moyenne et de la valeur moyenne de fluctuation de pression. De cette façon, nous avons pu utiliser tous les résultats pour l'étude de P_i et de σ_i . La valeur de P_i a été étudiée en fonction des différents paramètres qui caractérisent la structure et l'écoulement (α , L_s , C_f , s , T , Fr , ΔH , etc.). Suite à une analyse approfondie, nous avons observé que seulement les variables Fr , ΔH et L_s influençaient la valeur de P_i . Étant donné la relation 5.6, nous avons cherché à établir une autre relation entre P_i , L_s et L_n . La figure 5.59 présente la distribution de P_i/P_n en fonction de $(L_n - L_s)/L_n$. Nous constatons que la relation de P_i/P_n varie peu et près d'une valeur voisine de 1,0 lorsque L_s est plus grande que $0,40 L_n$. Après la valeur de P_i/P_n diminue jusqu'à 0,4. Nous observons également que l'angle α n'a pas d'influence sur la valeur de P_i .

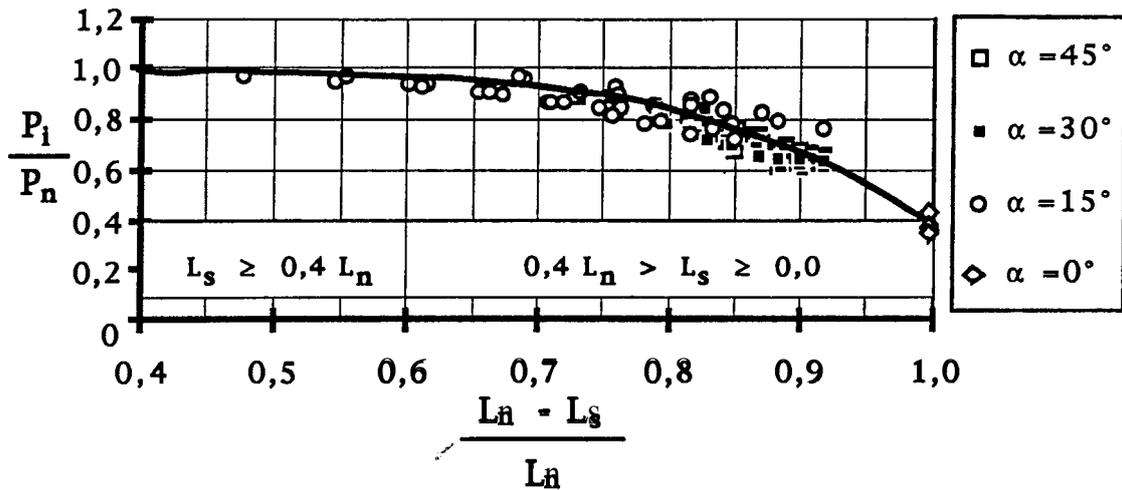


Fig. 5.59 - Pression moyenne P_i à la position intermédiaire L_i en fonction de la longueur de la structure L_s

c) Détermination de la valeur moyenne de la fluctuation de pression σ_i

De la même façon que pour la pression moyenne, nous avons analysé les valeurs de σ_i en fonction des différents paramètres qui caractérisent la structure et l'écoulement (α , L_s , C_f , s , T , Fr , ΔH , etc.). Suite à une analyse approfondie, nous avons observé que seulement les variables α , Fr , y_t , et s influençaient la valeur de σ_i . Les paramètres ϑ (équation 5.13) et φ (équation 5.14) sont paramètres sans dimension les plus convenables pour analyser la distribution et la valeur moyenne de la fluctuation de pression (σ_i), comme nous constatons à la figure 5.60. Ils représentent la profondeur d'eau en aval du dissipateur (y_n) et σ_i exprimée sur la forme réduite pour un même écoulement.

$$\vartheta = \frac{y_n - s}{y_t Fr} \cos \alpha \quad (5.13)$$

$$\varphi = \frac{\sigma_i}{P_n (1 + \tan \alpha)} \quad (5.14)$$

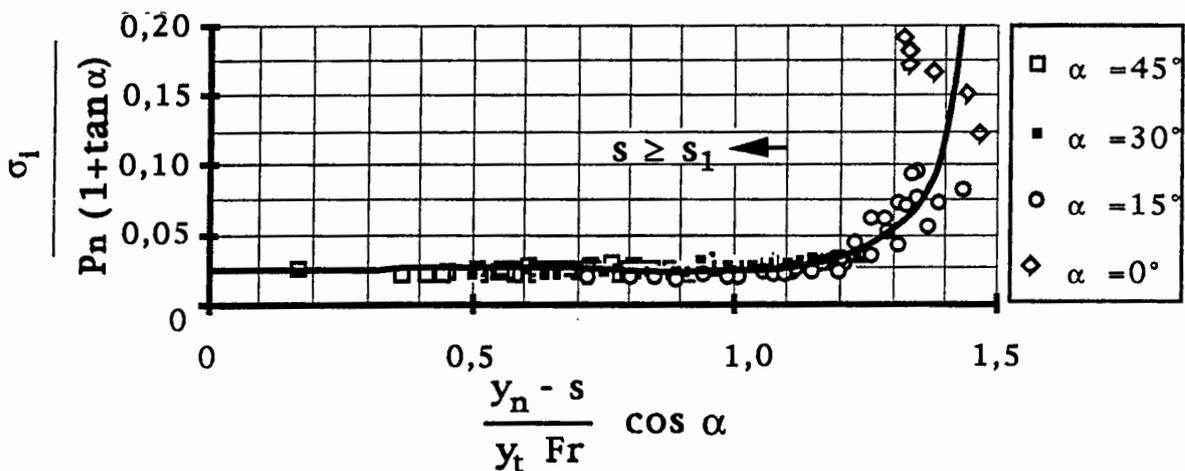


Fig. 5.60 - Valeur moyenne réduite de la fluctuation de pression à la position auxiliaire L_i en fonction de la profondeur réduite

En analysant la figure 5.60, nous observons que pour un angle donné, la valeur de σ_i est constante, pour des hauteurs de sortie (s) plus grande ou

égale à une valeur s_1 . Cette condition $s \geq s_1$ correspond à la partie horizontale de la figure 5.60 et elle peut être calculée à partir de l'équation suivante:

$$\frac{y_n - s}{y_t F_t} \cos \alpha \leq 1,1 \quad (5.15)$$

Si la hauteur de sortie (s) est plus petite que la valeur définie par l'équation 5.15, la fluctuation de pression à la sortie (σ_s) sera plus grande que σ_i .

5.5.6 Établissement des caractéristiques de la position de sortie (L_s)

a) Détermination de la position L_s

C'est important d'évaluer les caractéristiques de la pression moyenne et de la valeur moyenne de la fluctuation de pression à la sortie de la structure afin de faire un dimensionnement pour obtenir les valeurs de fluctuation de pression plus basses pour éviter les problèmes d'érosion, de cavitation et de fatigue près de la structure. La position de cette section est définie par la géométrie de la structure et elle coïncide avec la fin de la structure.

b) Détermination de la pression moyenne P_s

Pour des considérations constructives, la première prise a été placée de 5 à 15 cm en aval du dissipateur selon le type de structure étudié. Pour estimer les valeurs de P_s et σ_s nous avons procédé en extrapolant linéairement les valeurs des deux premières prises (exemple: figures 5.47).

Nous avons fait l'analyse de plusieurs paramètres et nous avons constaté que P_s est fortement influencé par L_s , L_n et α . La figure 5.61 représente la variation de P_s/P_n en fonction de la longueur relative de la structure $((L_n - L_s)/L_n)$ et de l'angle (α). Nous constatons que P_s/P_n diminue d'une façon graduelle, d'une valeur de 1,0 à 0,2 lorsque α et L_s diminuent.

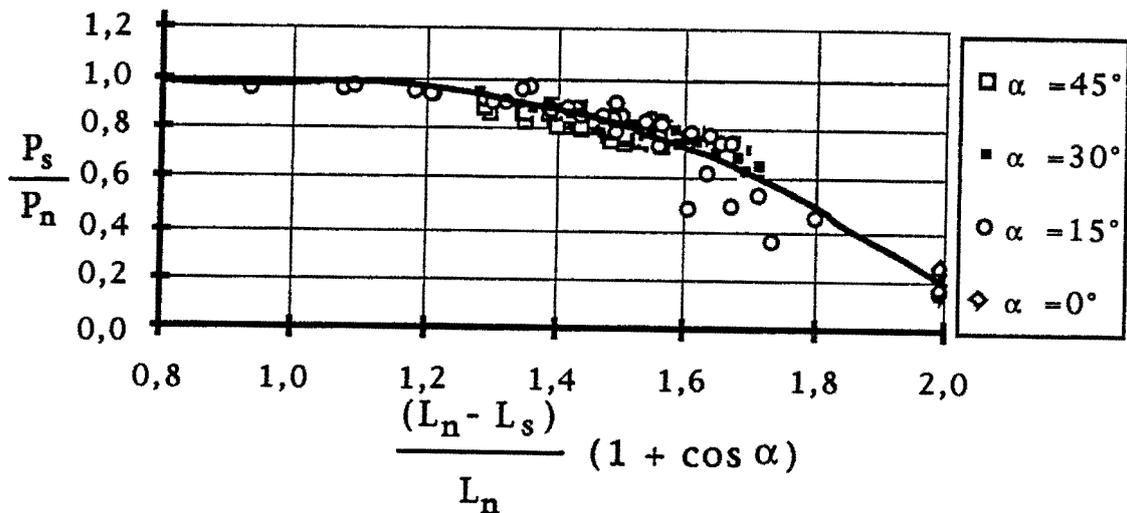


Fig. 5.61 - Pression moyenne réduite (P_s/P_n) à la position L_s en fonction de la longueur réduite de la structure

c) Détermination de la valeur moyenne de la fluctuation de pression σ_i

La figure 5.62 représente la valeur de σ_s/P_n en fonction des paramètres y_n , s , y_t , Fr , α . Nous remarquons que les angles de 15° , 30° et 45° présentent la même tendance. Pour la condition sans structure ($\alpha = 0^\circ$) le point de mesure n'est pas tout à fait affecté par la macroturbulence du ressaut. Cela explique que la condition sans dissipateur ne peut pas suivre cette tendance. Nous remarquons aussi que σ_s/P_n prend une valeur d'environ 0,05 lorsque la relation suivante est satisfaite:

$$\frac{(y_n - s)}{y_t Fr} (1 + \cos \alpha) \leq 2 \quad (5.16)$$

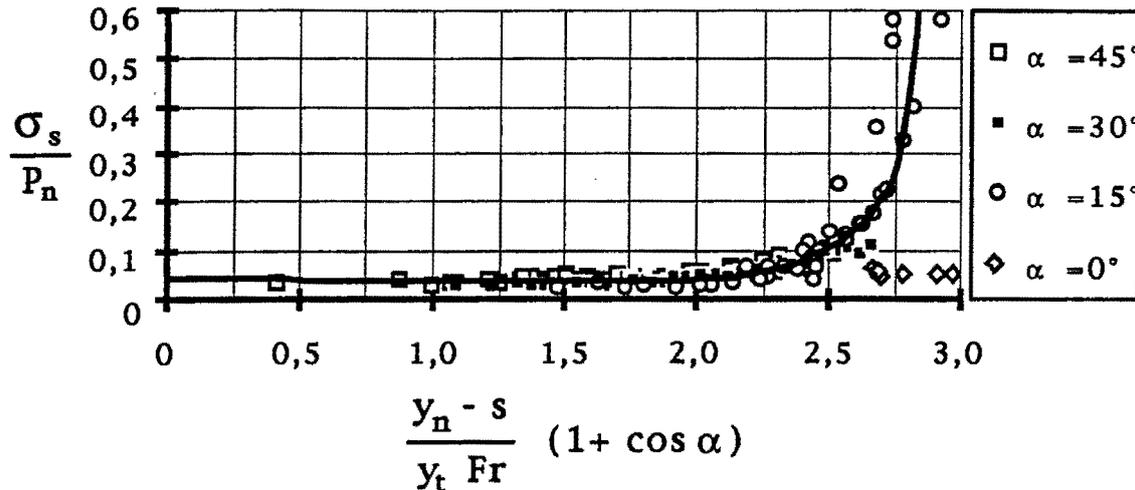


Fig. 5.62 - Valeur moyenne réduite de la fluctuation de pression à la position auxiliaire L_s en fonction de la profondeur réduite

La dernière relation (équation 5.16) permet de calculer la valeur de la hauteur s_2 pour laquelle σ_s n'est pas influencé par la hauteur de sortie s . Au-delà de cette valeur, σ_s/y_n augmente brusquement. Nous constatons aussi que les angles plus élevés ont besoin d'une hauteur de sortie plus basse.

5.6 L'angle optimal

Lors du dimensionnement des structures de dissipation, l'angle de sortie (a) est un des paramètres les plus importants. En effet, ce paramètre est lié à l'ensemble des paramètres géométriques de la structure.

Lors du dimensionnement d'un dissipateur, il semble raisonnable de poser certaines hypothèses. Nous devons avoir (figure 5.63):

- a) la valeur moyenne de fluctuation de pression à la sortie du dissipateur (σ_s) la plus faible possible;

- b) la valeur moyenne de fluctuation de pression à la région d'impact du jet (σ_{\max}) la plus faible possible ou compatible avec la résistance du lit;
- c) la distance où le jet frappe le radier ($L^*_{\sigma_{\max}}$), par rapport à la fin de la structure, soit la plus grande possible
- d) Le coût de construction soit le plus bas possible.

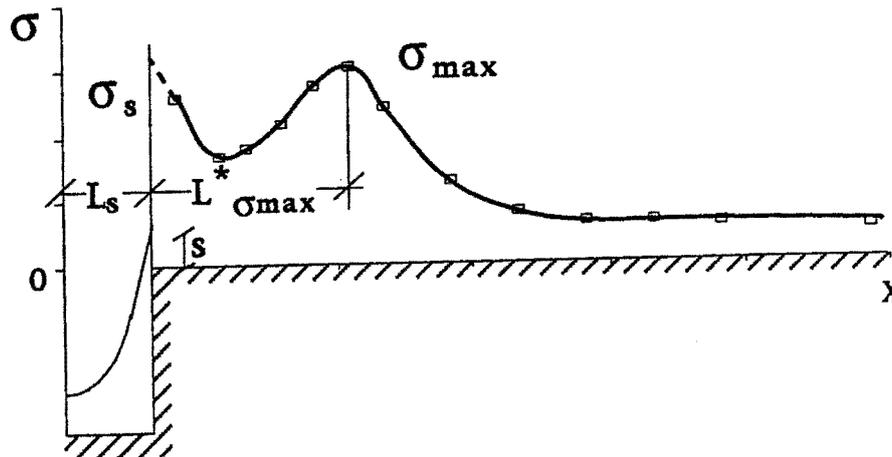


Fig. 5.63 - Comportement typique de la fluctuation de pression en aval de la structure

Si nous faisons la synthèse des résultats présentés auparavant, il est facile de voir l'influence de l'angle de sortie en fonction des principaux paramètres de dimensionnement. Le tableau 5.7 en résume les résultats. Nous représentons par le symbole " \uparrow " une tendance défavorable pour un critère donné, par le symbole " = " un critère qui ne varie pas et par les symboles " \downarrow " ou " \uparrow " un critère qui augmente ou diminue (tableau 5.7). À titre d'exemple, pour un écoulement donné pour la même cote de fond ($C_f = f(T)$) et pour la même hauteur de sortie (s), si α augmente nous observons les résultats suivants:

- a) la longueur (L_s) diminue;
- b) la fluctuation de pression à la sortie (σ_s) diminue;
- c) la distance ($L^*_{\sigma_{\max}}$) augmente et
- d) la fluctuation de pression (σ_{\max}) à la position ($L_{\sigma_{\max}}$) augmente.

Un autre exemple, pour une structure donnée (L_s et s constants; $s=f(\alpha)$) une augmentation de α implique une augmentation de T , une diminution de σ_s et une augmentation de $L^*\sigma_{max}$ et σ_{max} . L'augmentation de T et σ_{max} sont défavorables à un bon dimensionnement. D'une façon générale, une augmentation de α provoque toujours une diminution de L_s , s , et σ_s ; et une augmentation de $L^*\sigma_{max}$ et σ_{max} .

Géométrie de la structure				Fluctuations de pression		
α	L_s	T	s	σ_s	$L^*\sigma_{max}$	σ_{max}
↑	↓	=	=	↓	↑	↑↑
↑	=	↑↑	=	↓	↑	↑↑
↑	↓	=	↓	=	↑	↑↑
↑	=	↑↑	↓	↓	↑	↑↑
↑	↓	↓	=	↓	↑	↑↑

Tab. 5.7 - Influence des paramètres géométriques sur σ_s , $L^*\sigma_{max}$ et σ_{max}

Une augmentation de α provoque donc des conséquences opposées. En effet, nous devons choisir une valeur élevée de α pour obtenir une faible valeur de σ_s et une forte valeur de $L\sigma_{max}$. Par contre, nous recherchons aussi une faible valeur de α pour obtenir une faible valeur de σ_{max} . Il faut donc établir une autre priorité pour choisir le critère prépondérant.

Afin de garantir la plus faible fluctuation de pression au voisinage immédiat de la structure, nous avons accordé la priorité à la plus faible valeur de σ_s . La valeur minimale nous est fournie par l'équation 5.14 qui fixe une hauteur de sortie minimale (s_2) pour chaque angle donné. À partir de cette valeur minimale de s et de la figure 5.2 (équation 5.1), nous obtenons la valeur de T pour un écoulement donné qui nous permet de calculer la cote de fond ($C_f=N_a-T$). La longueur de la structure est par la suite déterminée par des relations trigonométriques. La structure ainsi dimensionnée présentera en aval une distribution semblable à celle de la figure 5.64.

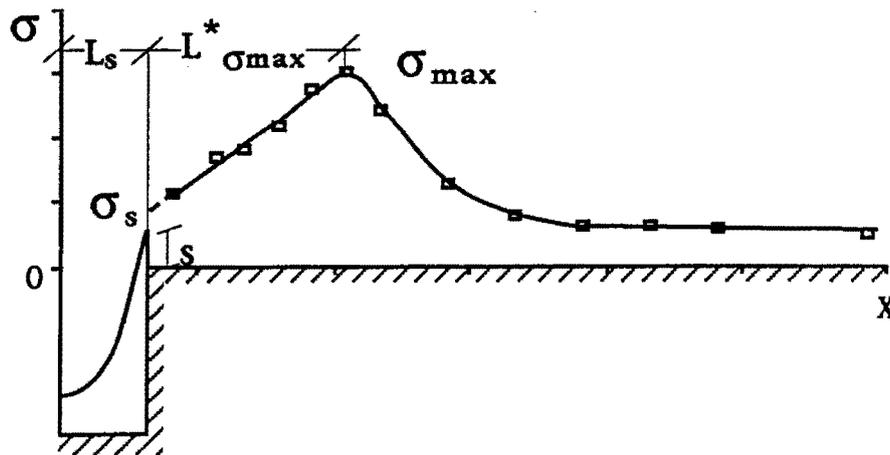


Fig. 5.64 - Distribution typique de la valeur moyenne de la fluctuation de pression en aval de la structure lorsque $s \geq s_2$

D'autre part, le choix de l'angle de sortie (α) doit aussi tenir compte des deux conditions suivantes:

- a) résistance du lit à la fluctuation de pression.
- b) aspect économique entre les différentes structures (le même projet peut admettre plusieurs solutions avec des angles différents).

La première condition revient à choisir la plus petite valeur σ_{max} qui est obtenu lorsque $L_s = 0,3L_n$ (fig.5.57). Cependant si le lit est plus résistant, nous pouvons utiliser des structures plus courtes avec une valeur de σ_{max} plus grande mais, tout en respectant toujours la plus petite valeur de σ_s obtenu lorsque $L_s = f(s \geq s_2)$.

Pour un écoulement donné, une augmentation de l'angle se traduit par une augmentation de σ_{max} et $L^* \sigma_{max}$. Afin de fixer un critère, nous avons défini un paramètre sans dimension qui est $\sigma_{max}/L^* \sigma_{max}$. La figure 5.65 donne la variation de ce paramètre en fonction α pour les deux cas ($L_s = 0,3L_n$ et $L_s = f(s \geq s_2)$). Nous pouvons accepter une valeur plus élevée de σ_{max} , si sa position ($L^* \sigma_{max}$) est plus loin de la structure. L'analyse de la relation $\sigma_{max}/L^* \sigma_{max}$ permet de comparer les différentes situations. Une

valeur plus basse de $\sigma_{\max}/L^* \sigma_{\max}$ représente une condition plus sécuritaire. La condition de $L_s=f(s \geq s_2; 0,3L_n)$ est indépendante de α et la condition de $L_s=f(s \geq s_2)$ donne une valeur de $\sigma_{\max}/L^* \sigma_{\max}$ qui augmente à partir de $\alpha=20^\circ$. Donc, cette dernière condition limite α à 20° .

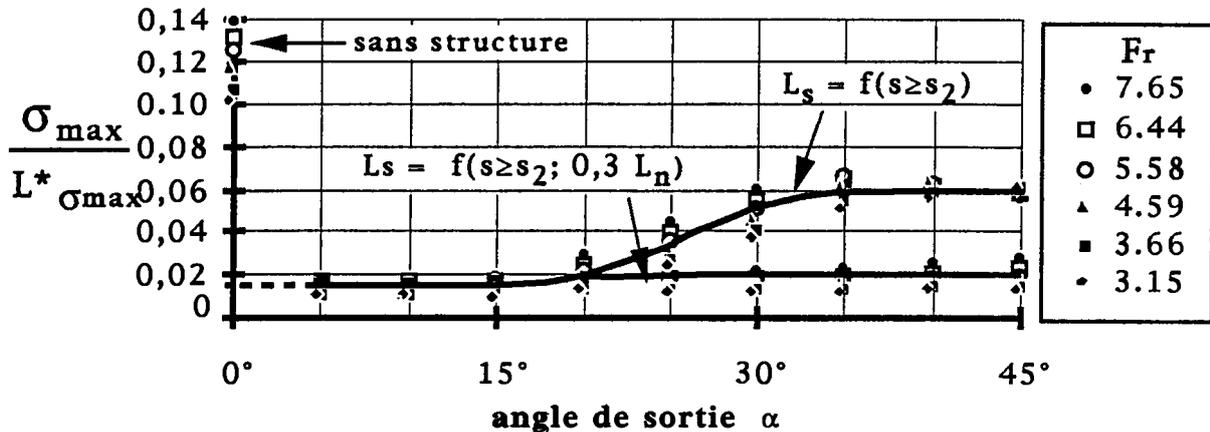


Fig. 5.65 - Angle optimal basé sur le critère d'efforts

A fin de faire l'analyse économique, il est important de connaître le coût de la structure en fonction de sa dimension. Il existe bien sûr plusieurs variables qui fixent le coût d'une structure. Afin de faciliter l'analyse de ce facteur, nous supposons, bien que discutables, que le coût d'une structure est proportionnel à sa longueur L_s . La figure 5.66 présente la longueur réduite (L_s/L_n) en fonction de (α). Cette figure indique que la longueur L_s/L_n augmente rapidement lorsque $\alpha < 20^\circ$, au de là de 20° la longueur diminue graduellement sans présenter une grande différence. Cela indique que, pour les angles plus grands ou égaux à 20° , le coût sera semblablement le même parce que la longueur de la structure donne des résultats identiques. D'autre part, pour le cas extrême de $L_s=0,3L_n$, la figure 5.66 indique que l'angle de sortie n'a pas d'influence pour les angles plus grands que 15° . Les structures avec un angle plus petit que 15° présentent une longueur plus grande que $0,3 L_n$, donc elles sont moins économiques. Ainsi, sur l'aspect économique il faut utiliser un angle égale ou supérieur à 20° .

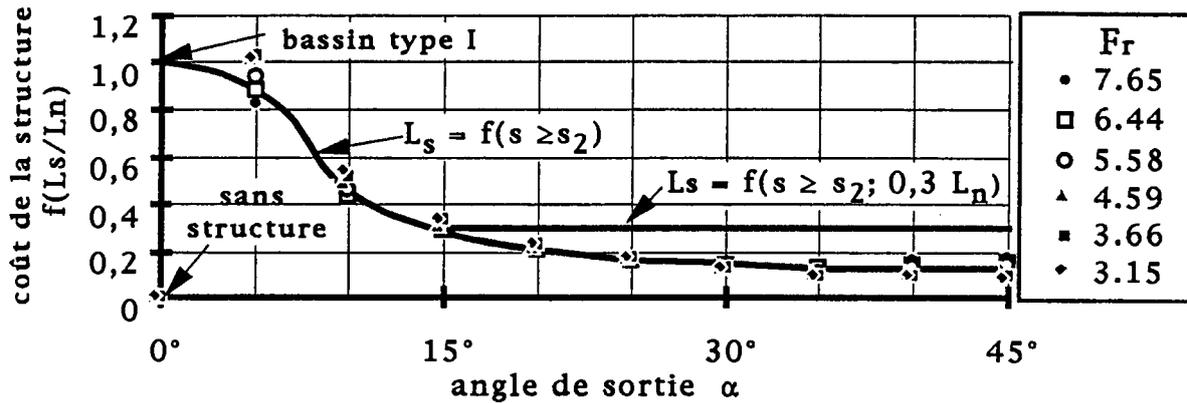


Fig. 5.66 - Angle optimal basé sur le critère économique ($\$=f(L_s/L_n)$)

Ainsi, lorsque nous tenons compte à la fois de l'aspect économique et de la résistance du lit, nous concluons que 20° est un angle optimal pour l'angle de sortie.

Rappelons que nous pouvons utiliser un angle autre que 20° selon les caractéristiques du projet. Cependant, il est conseillé d'utiliser toujours un angle plus grand que 15° , vu que pour un angle inférieur, la longueur de la structure est plus grande que $0,3L_n$, et ce, même pour la condition $L_s=f(s \geq s_2)$.

CHAPITRE VI

CHEMINEMENT PROPRE AU DIMENSIONNEMENT DES DISSIPATEURS À AUGE

6.1 Critères de dimensionnement

Le dissipateur à auge a pour but de diriger l'écoulement de façon à ce qu'il dissipe l'énergie sur la structure, par impact dans la masse d'eau et sur le fond du lit. Dans ce travail, nous avons comparé les distributions de pression et de la valeur moyenne de la fluctuation de pression en aval de différentes géométries de structures de dissipation et, nous avons fait l'analyse de l'influence de chacun des paramètres géométriques et hydrauliques (chapitre 5). Selon ces analyses et les conclusions qui en découlent, nous avons été capables de définir deux cheminements de dimensionnement visant à satisfaire les conditions relatives suivantes:

- a) obtenir la plus petite valeur moyenne de la fluctuation de pression à la sortie de la structure (σ_s);
- b) obtenir la plus petite valeur moyenne de la fluctuation de pression à la sortie de la structure (σ_s) et à la région d'impact du jet (σ_{max}).

6.1.1 Cheminement de dimensionnement pour obtenir la plus petite valeur de σ_s

L'organigramme de la figure 6.1 fournit les caractéristiques géométriques d'une structure qui entraîne la plus petite valeur moyenne de fluctuation de pression à la sortie.

Sur cet organigramme, une fois les conditions hydrauliques de l'écoulement déterminées (Q , ΔH , v_t , Fr), la première étape consiste à calculer le rayon de concordance (R_s) de la structure avec la relation suivante:

$$\frac{R_s}{\Delta H} \geq \frac{0,85}{\sqrt[3]{Fr}} \quad (6.1)$$

Par la suite, il faut calculer la hauteur d'eau aval (y_n) à partir de l'équation suivante:

$$\frac{y_n}{y_t} \geq 1,7 y_t Fr \quad (6.2)$$

Après avoir déterminé y_n , l'étape suivante consiste à calculer la longueur d'influence de la structure de dissipation (L_n) à l'aide de la relation suivante (équation 5.6):

$$L_n = 18,0 \frac{\Delta H}{Fr} \quad (6.3)$$

L'étape suivante consiste à choisir l'angle de sortie (α). En effet, il est possible d'obtenir des efforts quasi identiques même quand les structures présentent des angles différents. Cela permet donc d'ajuster les structures aux conditions de projet et du milieu (topographie, géologie, résistance du lit, etc.), à la condition cependant que l'angle soit égal ou supérieur à 15° . Néanmoins, en regard des analyses présentées

au chapitre 5.6, il est avantageux de choisir un angle se rapprochant le plus près de 20° .

$$\alpha_{\text{optimal}} = 20^\circ \quad (6.4)$$

Par la suite, il est alors possible, à partir de l'équation 6.5, de calculer la hauteur de sortie minimale (s) à adopter pour obtenir les fluctuations de pression les plus faibles possibles à la sortie (σ_s).

$$s \geq y_n - \frac{2 y_t Fr}{(1 + \cos \alpha)} \quad (6.5)$$

Avec les caractéristiques de l'écoulement, l'angle de sortie et la hauteur de sortie minimale, il est alors possible de déterminer le calage de la structure pour qu'elle demeure submergée. Pour ce faire, la relation suivante est proposée:

$$T \geq s + (1,78 - 1,10 \tan \alpha) y_t Fr^{(0,88 + 0,27 \tan \alpha)} \quad (6.6)$$

La valeur obtenue de T doit se situer dans l'intervalle suivant $y_n \leq T \leq 1,5 y_n$. Trois situations peuvent alors survenir, soit lorsque la valeur de T est:

- a) plus petite que y_n . La valeur limite $T=y_n$ est retenue;
- b) plus grande que $1,5y_n$. Il faut changer l'angle et recommencer le calcul a partir de l'équation 6.5;
- c) comprise dans l'intervalle $y_n \leq T \leq 1,5y_n$. La valeur calculée de T est retenue.

Avec la valeur de T, la côte de fond de la structure (C_f) est alors déterminée par la relation suivante:

$$C_f = y_n - T \quad (6.7)$$

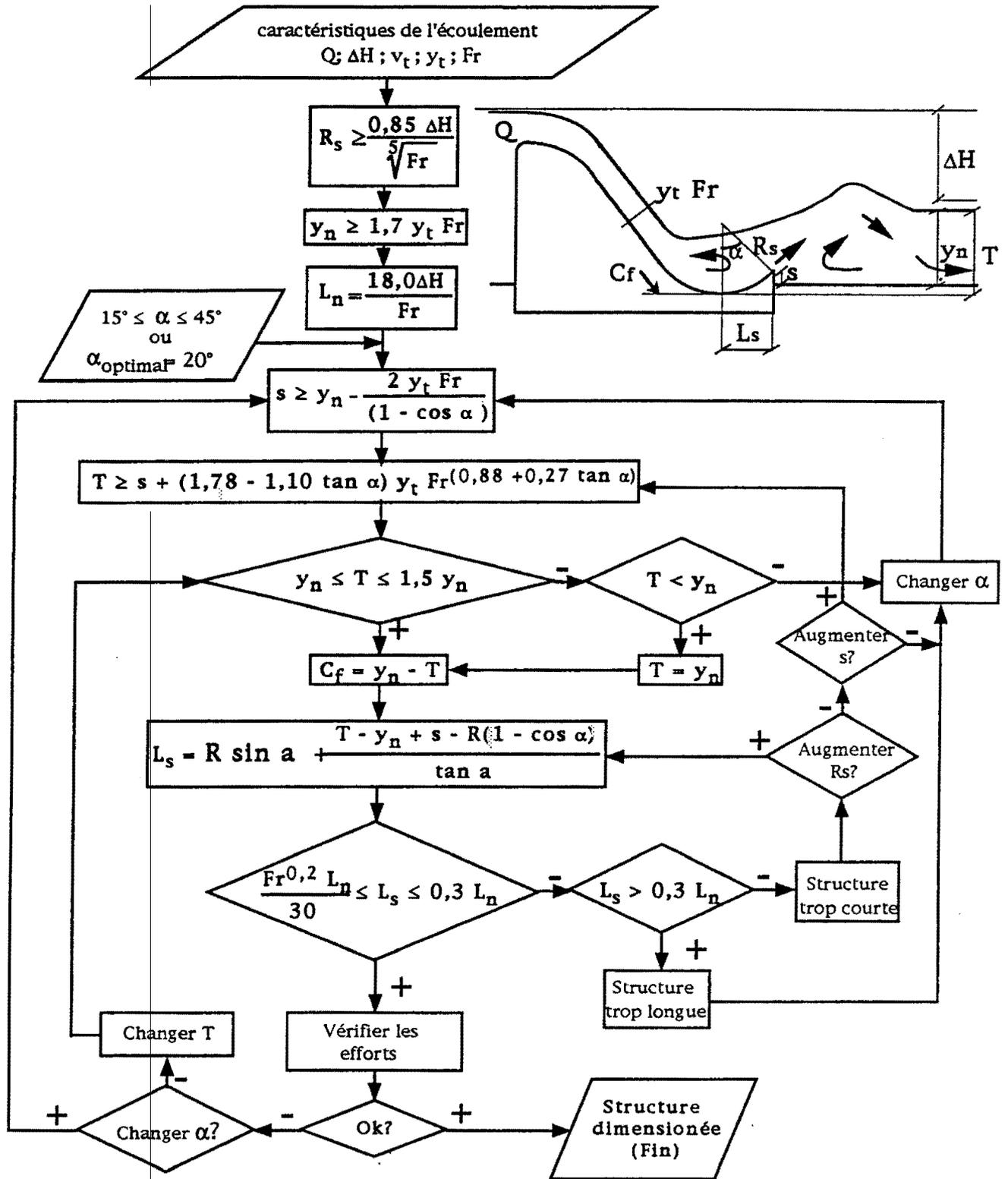


Fig. 6.1- Dimensionnement d'une structure à auge pour obtenir la plus petite valeur moyenne de fluctuations de pression à la sortie de la structure (σ_s)

La longueur de la structure (L_s) peut être alors obtenue à partir de la relation trigonométrique suivante:

$$L_s = R \sin \alpha + \left(\frac{T - y_n + s - R (1 - \cos \alpha)}{\tan \alpha} \right) \quad (6.8)$$

Cette valeur L_s doit cependant respecter la relation définie par l'équation 6.9, qui limite la longueur de la structure à une valeur de $0,3L_n$, qui est la longueur à partir de laquelle nous obtenons la plus faible valeur de σ_{\max} .

$$\frac{Fr^{0,2}}{30} \leq \frac{L_s}{L_n} \leq 0,3 \quad (6.9)$$

Trois situations peuvent alors survenir, soit lorsque la valeur de L_s est:

- a) plus petite que la longueur minimale proposée. Il est alors possible d'augmenter R_s et recalculer L_s ou, augmenter s et recalculer T , C_f et L_s ou encore changer l'angle et recalculer s , T , C_f et L_s ;
- b) plus grande que $0,3 L_n$. La longueur excédentaire ne change pas la valeur de σ_{\max} , mais il ne faut pas réduire la valeur de L_s à $0,3 L_n$ afin de respecter la valeur de s (déterminée par l'équation 6.5) et obtenir la valeur la plus petite de σ_s . Dans ce cas, il faut changer l'angle et recalculer s , T , C_f et L_s ;
- c) comprise dans l'intervalle de l'équation 6.9, la valeur calculée de L_s est alors recommander.

Après avoir déterminé les dimensions géométriques de la structure (α , R_s , s , C_f et L_s), il faut analyser vérifier les efforts transmis en aval du dissipateur en utilisant l'équation 6.10 (équivalente à l'équation 5.25), la figure 6.2, le tableau 6.1 et les figures indiquées.

$$P_x\% = P_x \pm n\sigma_x \quad (6.10)$$

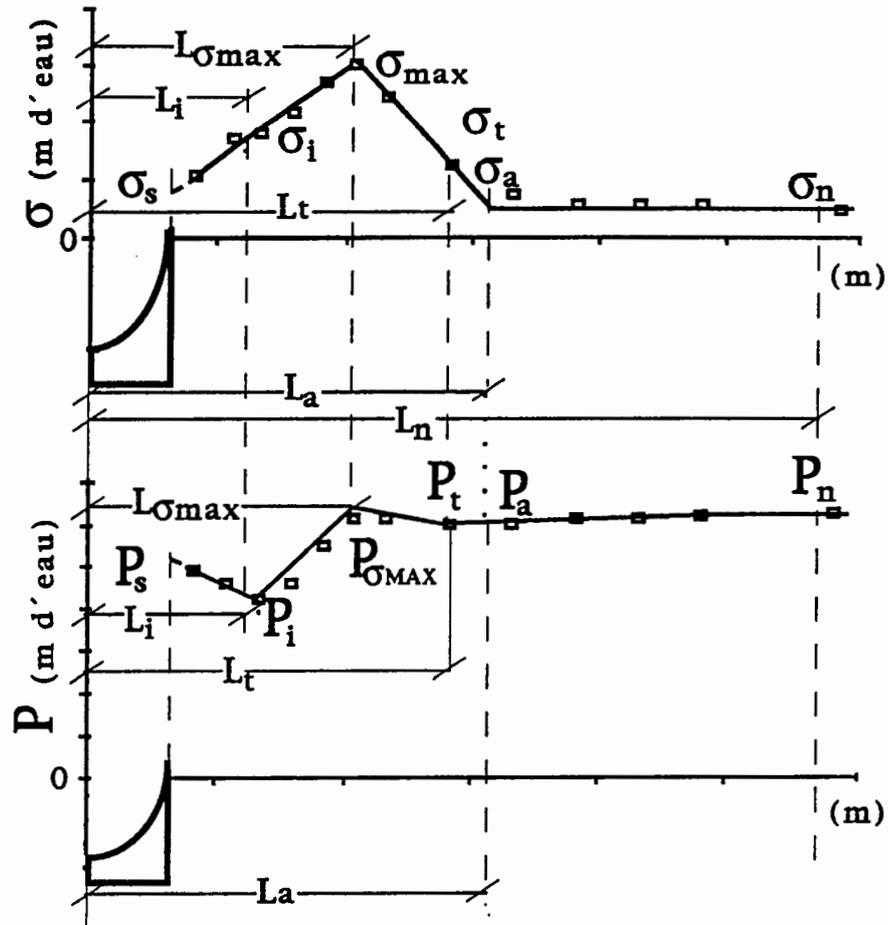


Fig. 6.2 - Schéma des positions caractéristiques de la distribution de pression et de la fluctuation de pression

x	$\frac{x}{L_n}$	$\frac{P_x}{P_n}$	$\frac{\sigma_x}{P_n}$
L_n	1,0	$P_x = P_n = \gamma y_n$	0,015
L_a	$0,70 - 0,15 \frac{\alpha \Pi}{180^\circ}$	0,97	Figure 5.52
L_t	0,52	Figure 5.53	Figure 5.54
L_{sma}	$C_{L_{\sigma_{max}}} + \frac{L_s}{L_n} - \frac{R \sin \alpha}{L_n}$	Figure 5.56	Figure 5.57
x			
L_i	$0,13 + 0,90 \frac{L_s}{L_n}$	Figure 5.59	Figure 5.60
L_s	$\frac{L_s}{L_n}$	Figure 5.61	Figure 5.62

Tab. 6.1 - Calcul des efforts en aval des structures de type à auge

Il est alors possible de comparer les efforts avec la résistance du lit. Si les efforts calculés sont trop grands, il existe encore deux possibilités de les réduire:

- a) changer α et recalculer de nouveau à partir de s ou
- b) augmenter T pour augmenter la longueur L_s .

Si les efforts calculés sont compatibles avec la résistance du lit, la structure est enfin dimensionnée pour obtenir la plus petite fluctuation de pression à la sortie de la structure (σ_s).

6.1.2 Cheminement de dimensionnement pour obtenir la plus petite valeur de σ_s et σ_{max}

Afin d'obtenir la plus petite valeur de σ_s et de σ_{max} , la hauteur de sortie doit être plus grande ou égale à la valeur de s définie par l'équation 6.5 et, la longueur de la structure doit être égale à $0,3L_n$ (voir chapitres 5.5.3 et 5.5.4). Pour ces conditions, l'organigramme de la figure 6.3 peut être utilisé. La procédure est la même que pour l'organigramme de la figure 6.1 jusqu'au calcul de s . Toutefois, la longueur de la structure ($L_s=0,3L_n$) doit être calculée. Avec la détermination de α , R_s , L_s et s , la valeur de T est évaluée à partir de la relation trigonométrique suivante:

$$T = y_n - s + 0,3 L_n \tan \alpha + R_s (1 - \sin \alpha \tan \alpha - \cos \alpha) \quad (6.11)$$

Ensuite, il faut s'assurer que la valeur de T vérifie la relation 6.6 pour que la structure demeure submergée et si elle est incluse dans l'intervalle souhaité ($y_n \leq T \leq 1,5 y_n$). De la même façon que pour l'organigramme 6.1, trois situations peuvent survenir:

- a) la valeur de T est plus petite que y_n . Il faut alors changer α et recommencer le calcul par la détermination de s (équation 6.5);

- b) la valeur de T est plus grande que $1,5y_n$. Il est possible d'augmenter R_s et recalculer L_s ou changer α et recommencer le calcul pour la détermination de s (équation 6.5);
- c) la valeur de T est comprise dans l'intervalle $y_n \leq T \leq 1,5y_n$, la valeur calculée de T est recommandée

L'équation 6.7 sert par la suite à déterminer la cote de fond de la structure (C_f).

À partir des dimensions géométriques de la structure (α , R_s , s , C_f et L_s) et des conditions hydrauliques (y_t , Fr , ΔH , y_n et L_n), l'équation 6.10, la figure 6.2, le tableau 6.1 et les figures qui y sont indiquées servent à vérifier les efforts en aval du dissipateur. Comme dans le cas de l'organigramme de la figure 6.1. Si les efforts calculés ne sont pas compatibles avec la résistance du lit, il existe alors une seule possibilité qui consiste à changer α et recalculer de nouveau à partir de s .

Quand les efforts en aval ne sont pas compatibles avec la résistance du lit, pour aucun angle et aucune longueur égale à $0,3L_n$ il faut utiliser un bassin court, $L_s \geq 0,6 L_n$, (chapitre 2.6.2). Nous pensons que, même dans ce cas, l'angle de sortie doit être de 20° et que la hauteur de sortie doit respecter l'équation 6.5.

Les structures à auge ont comme principe de laisser l'écoulement faire son propre bassin de dissipation (érosion), mais celui-ci ne doit pas mettre en danger la structure. Il est possible d'estimer l'endroit où se produira l'érosion et les efforts provenant de la variation de pression.

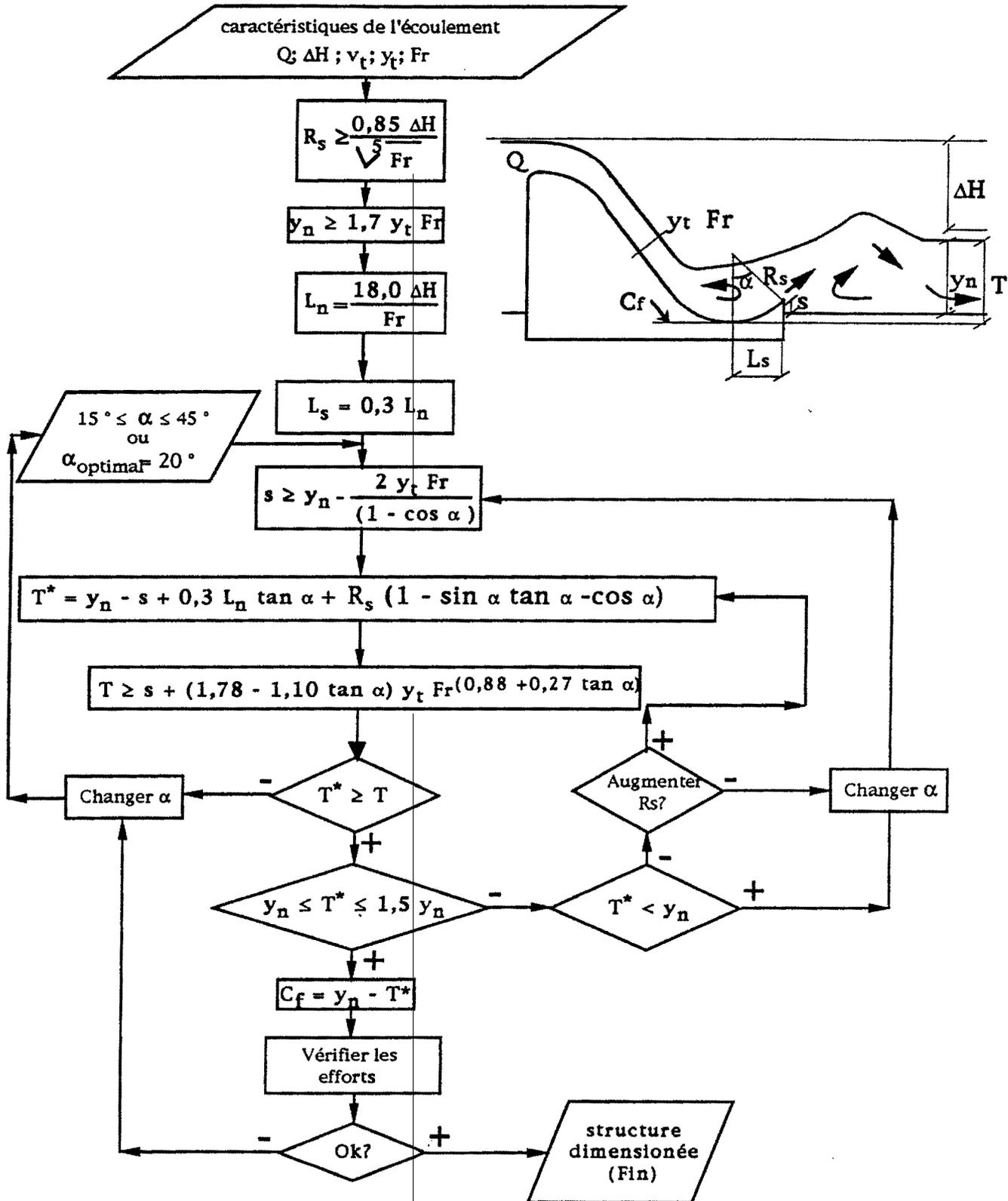


Fig. 6.3- Dimensionnement d'une structure à auge pour obtenir la plus petite valeur de σ_s et σ_{max}

6.2 Limitations des critères de dimensionnement

Les critères proposés présentent des limitations parce que certains paramètres sont demeurés constants au long de notre étude ou parce que le modèle imposait des restrictions sur l'aspect constructif, comme nous l'avons mentionné au chapitre 4. Nous pouvons citer les limitations suivantes:

- a) Le rayon de concordance (R_s) est demeuré constant lors de tous les essais. Il n'a cependant pas d'influence significative et directe sur la dissipation; son rôle est de faire harmonieusement le lien entre l'évacuateur et le dissipateur, de permettre de changer la longueur (L_s) sans changer la hauteur de sortie (s) ou de changer la hauteur de sortie (s) sans changer la longueur (L_s).
- b) La hauteur d'eau en aval (y_n) était constante pour un écoulement donné. Comme nous l'avons présenté au chapitre 4, la hauteur d'eau en aval (y_n) a été fixée pour chaque nombre de Froude à partir d'essais faits avec le bassin de type I, cas pour lesquels il n'y a pas de structure de dissipation. Ainsi le ressaut hydraulique se forme au pied de l'évacuateur ($y_n = y_1$). Une hauteur d'eau en aval plus grande que la hauteur conjuguée lente ($y_n > y_1$) sera toujours bénéfique, parce que le jet se dissipera surtout dans la masse d'eau, diminuant ainsi l'énergie du jet qui arrive au fond.
- c) La longueur minimale de la structure (L_s) essayée était de 250 mm. Nous pensons, en fonction de l'analyse des résultats, qu'il est possible dans certains cas, pour un nombre de Froude élevé, d'utiliser des structures encore plus courtes.
- d) La différence de niveau (T) utilisé lors des essais était comprise entre la valeur de y_n et $1,5 y_n$.
- e) Il peut exister un facteur d'échelle entre les pressions mesurées sur un modèle et celles mesurées sur un prototype. Peu d'études documentent cet aspect. D'après les vérifications entre prototype et modèle des amplitudes et des fréquences de fluctuation de pressions dans les dissipateurs d'énergie classiques (Lopardo [1988] et Lopardo [a]) nous pensons que, dans les dimensions du

modèle utilisé et les conditions hydrodynamiques expérimentées, l'effet d'échelle par influence visqueuse doit être négligeable.

Les points (a) à (d) ne sont pas de vraies limitations des résultats mais de limitations imposées par la construction du modèle (a; c et d) et par les conditions initiales des essais (b) pour obtenir un cas plus des favorables. D'une façon générale, toutes ces limitations gouvernent le choix de la géométrie de la structure pour un dissipateur plus efficace, mais pas nécessairement la plus économique. Même s'exister un facteur d'échelle entre les pressions mesurées sur un modèle et celles mesurées sur un prototype, point (e), les conclusions sur le dimensionnement de la structure sont encore valide, en fonction de l'analyse comparative (qualitative), qui nous oriente à la dimension plus efficace. Comme on a fait traditionnellement pour essais d'érosion. Dans ce cas seulement l'estimation des efforts est affectée.

6.3 Comparaison avec les critères proposés par les autres chercheurs

La plupart partie des critères proposés par les autres auteurs utilise le rayon de concordance comme paramètre principal de dimensionnement. Dans notre cas, nous l'avons gardé constant pour tous les essais. Afin de comparer les caractéristiques de dimensionnement obtenues par l'utilisation de l'organigrammes des figures 6.1 et 6.3 avec les valeurs obtenues par les autres chercheurs, nous utilisons comme critère de comparaison les paramètres suivants comme nous l'avons fait au chapitre 3.6:

- a) l'angle de sortie (α);
- b) la longueur de la structure (L_s),
- c) la différence de niveau (T) entre la cote de fond et le niveau d'eau en aval (N_a);
- d) la hauteur d'eau sur la sortie de la structure (h_s).

Rappelons que le dimensionnement obtenu à partir des critères des différents chercheurs donne des solutions toujours satisfaisantes sur le plan du comportement hydraulique de la structure mais, avec des efficacités différentes. La présente étude permet en outre de prédire les efforts transmis sur le radier pour un écoulement donné et, par conséquence, de choisir la structure en fonction de ce critère.

Nous allons donc comparer les dimensions minimales et maximales, obtenues à partir des organigrammes des figures 6.1 et 6.3. Ces deux situations représentent les dimensions limites d'utilisation de la structure pour obtenir la valeur minimale de la fluctuation de pression pour les angles plus grands ou égaux à 15° aux endroits stratégiques suivants:

- a) à la sortie de la structure, et;
- b) dans la région où le jet frappe le fond du lit.

6.3.1 Angle de sortie - comparaison des valeurs proposées par différents chercheurs

Lorsque nous comparons la valeur de l'angle optimal ($\alpha=20^\circ$) trouvé dans ce travail avec les critères des autres chercheurs, nous observons que cette valeur:

- a) coïncide avec la valeur minimale recommandée par Valença [1990] pour la rampe ascendante;
- b) est comprise dans l'intervalle $15^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$ suggéré par Tamada [1989] pour les structures à auge et rampe ascendante;
- c) coïncide avec la valeur recommandée par Li [1988], qui a proposé un angle optimal de 20° pour la sortie d'un bassin court.
- d) est près de la valeur recommandée pour l'inclinaison des blocs de sortie des bassins courts étudiés par Peterka [1957] ($1:2 \rightarrow \alpha \approx 26^\circ$).

6.3.2 Longueur de la structure - comparaison des valeurs proposées par différents chercheurs

Si nous comparons la longueur de la structure exprimée sous forme réduite par L_s/L_n en fonction de l'angle de sortie, avec les résultats des autres chercheurs, nous constatons que les dimensions minimales ($L_s = f(s \geq s_2)$) obtenues par les autres chercheurs coïncident avec nos valeurs. Par contre, nos dimensions maximales ($L_s = 0,3L_n$) sont légèrement plus grandes. La figure 6.4 indique le gamma des valeurs proposées pour L_s/L_n en fonction de α pour les différents chercheurs.

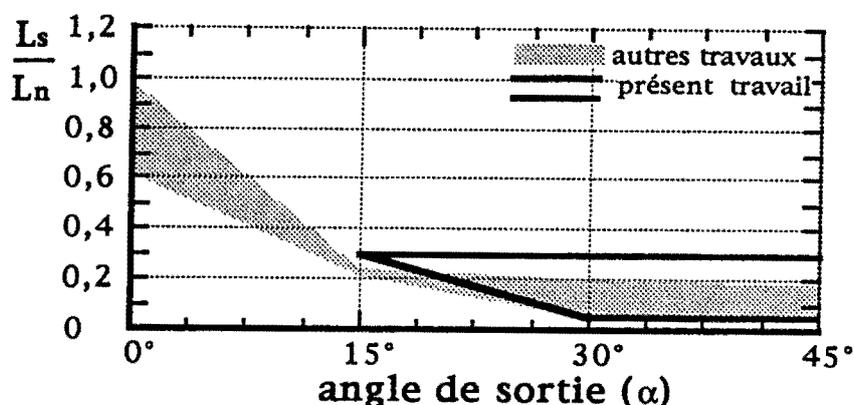


Fig. 6.4 - Longueur de la structure (L_s/L_n) - comparaison des valeurs proposées par différents chercheurs en fonction d'angle α

6.3.3 Cote de fond - comparaison des valeurs proposées par différents chercheurs

Lorsque nous analysons la valeur de T/y_n en fonction de α (figure 6.5), nos résultats coïncident assez bien avec ceux des autres chercheurs. Pour les angles plus grands ou égaux à 15°, la limite supérieure de T/y_n coïncide avec l'ensemble des autres chercheurs. Prenant ce qui concerne la limite inférieure, les valeurs proposées sont légèrement supérieures aux autres chercheurs, pour les angles compris entre 15° et 30°. Pour les angles supérieurs à 30° nous avons une valeur de $T/y_n = 1,0$ parce que nous avons limité les résultats à $y_n \leq T \leq 1,5y_n$. Cependant, nous croyons

qu'il est possible d'utiliser $T < y_n$ pour les angles plus grands que 30° et de faibles nombres de Froude (chapitre 5.2.1).

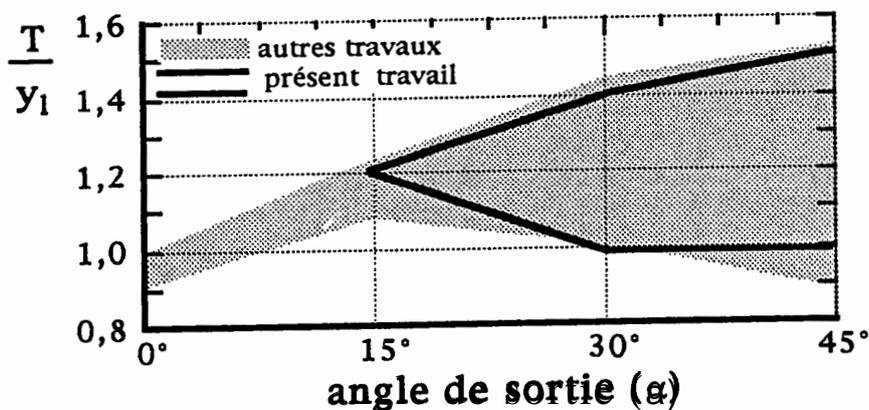


Fig. 6.5 - Calage de la structure (T/y_n) - comparaison des valeurs proposées par différents chercheurs en fonction d'angle α

6.3.4 Cote de sortie - comparaison des valeurs proposées par différents chercheurs

Lorsque nous examinons la cote de sortie en fonction de la hauteur d'eau sur la sortie de la structure (h_s) et de l'angle α , nos résultats donnent une plage de variation très limitée de h_s/y_1 . La différence entre les valeurs maximales et minimales de nos données peut être expliquées en fonction de la variation des conditions hydrauliques. Nous pouvons considérer que la relation h_s/y_1 augmente linéairement de 0,7 à 0,8 pour des angles compris entre 15° et 45° .

Les valeurs obtenues sont situées dans la limite inférieure des résultats des autres chercheurs pour les angles compris entre 15° et 30° . Pour les angles plus élevés que 30° , nos valeurs de h_s/y_1 augmentent graduellement avec l'angle comme l'indique la figure 6.6. Cependant, les valeurs des autres chercheurs diminuent rapidement pour angles compris entre 30° et 45° . Ces résultats sont tout à fait normal, étant donné que notre critère détermine la valeur minimale de la hauteur de sortie (s) en fonction du fond du lit et que la hauteur d'eau en aval (y_n) a

été constante pour un écoulement donné et égale à y_1 . Cette condition limite nos résultats à une valeur toujours inférieure à 1,0 en fonction de s . Nous croyons qu'en respectant la hauteur minimale de sortie (s_2), nous pouvons utiliser les valeurs de h_s/y_1 plus grandes que les valeurs fournies par notre critère. Dans cette condition, une augmentation de h_s/y_1 représente une augmentation de y_n , donc $y_n > y_1$ ce qui sera toujours bénéfique, parce que la dissipation se fera davantage dans la masse d'eau et l'énergie qui arrive au fond sera moins intense.

Nous croyons également qu'il est possible d'utiliser les valeurs de h_s/y_1 plus petites que les valeurs fournies par notre critère, lorsque l'angle est plus élevé que 30° et que l'écoulement présente un faible nombre de Froude. De fait, nous supposons que le fond de la structure, dans ce cas-ci, peut être placée à une cote plus haute que le radier aval (chapitre 6.3.3).

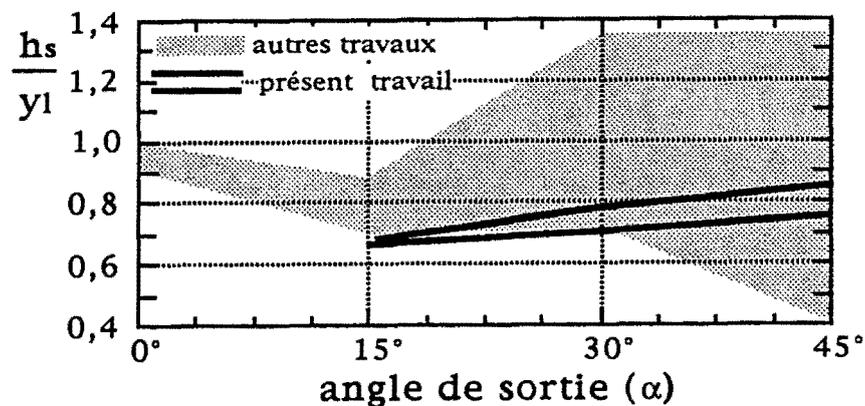


Fig. 6.6 - Cote de sortie (h_s/y_1) - comparaison des valeurs proposées par différents chercheurs en fonction de l'angle α

6.3.5 Résumé de la comparaison avec les critères proposés par les autres chercheurs

En résumé, la comparaison avec les critères utilisés par les autres chercheurs montre que, règle générale, nos résultats sont toujours

compris à l'intérieur des résultats obtenus par les autres chercheurs. D'une façon particulière, nos résultats sont beaucoup plus restreints, parce que d'une part, nous avons fixés la valeur de l'angle de sortie à une valeur plus grande ou égale à 15° . Également, nous sommes plus restreints au niveau de la détermination de la cote de fond de la structure ($C_f=f(T)$ et $y_n \leq T \leq 1,5 y_n$) et au niveau de la hauteur minimale de sortie ($h_s=f(s)$). Par contre, pour la longueur de la structure (L_s) nos valeurs sont comprises dans un intervalle plus large et nous proposons une valeur maximale de la structure égale à $0,3L_n$.

Nous croyons que les relations indiquées dans le tableau 6.1 peuvent être utilisées dans le cas des structure dimensionnéesa par d'autres critères afin d'estimer les efforts résultants sur le lit. Cette hypothèse doit cependant être vérifiée par des travaux futurs.

CHAPITRE VII

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

7.1 Rappel des objectifs

Le travail présenté a pour but de proposer un regroupement des critères de dimensionnement des structures de dissipation d'énergie. L'analyse est basée sur une étude en modèle réduit, à partir de laquelle plusieurs structures ont été étudiées. Pour y arriver, les objectifs suivants étaient fixes:

- a) comparaison de deux (2) types de structures de dissipation d'énergie hydraulique (auge et rampe ascendante) avec la condition sans dissipateur;
- b) analyse de la distribution de pression moyenne et de la distribution de valeur moyenne des fluctuations de pression en aval des structures à auge et rampe ascendante possédant différentes dimensions géométriques et conditions hydrauliques;
- c) Analyse de l'influence des paramètres géométriques et hydrauliques sur le rendement du dissipateur;
- d) Établissement de critères de base de dimensionnement.

7.2 Méthodologie

Toute notre approche est basée sur la distribution des pressions moyennes et de leurs fluctuations mesurées en aval des structures de dissipation. Elles nous permettent non seulement de faire des analyses plus élaborées dans le domaine des fréquences, des valeurs extrêmes, etc., mais aussi d'obtenir diverses informations à caractères général et spécifique sur le processus de la dissipation d'énergie dans un écoulement macroturbulent. Ces informations sont utiles à l'ingénieur en structures hydrauliques pour dimensionner les dissipateurs et choisir la meilleure structure.

L'analyse approfondie de la distribution des fluctuations de pression se montre appropriée pour faire la comparaison de la performance des différentes géométries de structures de dissipation d'énergie et, nous pouvons même l'utiliser pour étudier d'autres phénomènes hydrauliques.

7.3 Comparaison entre les dissipateurs à auge, à rampe ascendante et à la condition sans dissipateur

Selon la révision bibliographique et les résultats des essais effectués, nous avons constaté que les deux (2) types de structures de dissipation d'énergie hydraulique (dissipateur à auge et rampe ascendante) peuvent être étudiés avec la même approche. Le dissipateur à rampe ascendante est une variation du dissipateur à auge. Ces deux types de dissipateur ont démontré la même tendance au niveau du comportement par rapport à la position et la variation de pression.

La condition sans structure dissipe l'énergie par la formation d'un ressaut hydraulique. Cette condition présente des valeurs de fluctuations de pression élevées, ce qui indique qu'on doit protéger le lit en adoptant un bassin de type I ou un autre type de dissipateur (par exemple: dissipateur à auge ou rampe ascendante).

Les structures à auge et rampe ascendante dissipent l'énergie dans la masse d'eau ainsi que par impact sur le radier. Ces dissipateurs ont comme caractéristique de diriger l'écoulement de sorte qu'il frappe le fond du lit loin de la structure. Ces structures présentent des valeurs de fluctuations de pression plus faibles que celles obtenues avec la condition sans structure lorsqu'elles ont une hauteur de sortie appropriée. D'une façon générale, les deux types de structures fonctionnent bien et peuvent être utilisés comme des solutions acceptables, indépendamment de l'angle adopté, s'ils sont dimensionnés avec une hauteur de sortie, une cote de fond et une longueur appropriées.

7.4 Distribution de pressions et de leurs fluctuations en aval des dissipateurs à auge

Par l'ensemble des essais effectués, l'analyse des distributions de pression moyenne, de fluctuation de pression incluant les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement montre qu'il est possible de caractériser les distributions par des caractéristiques communes quels que soient les paramètres utilisés. Ces caractéristiques communes sont observées à des distances (comptées à partir du fond de la structure - figures 5.48 et 6.2) définies comme suit:

- a) L_s = position qui correspond à la sortie de la structure;
- b) L_i = position correspond au point où la pression moyenne présente une valeur minimale. Cette position correspond également à l'endroit où la valeur moyenne de la fluctuation de pression passe par une valeur minimale, lorsque la hauteur de sortie s est plus petite qu'une certaine valeur défini par l'équation 6.5 et aussi à l'endroit où le niveau d'eau atteint la cote la plus haute. Cette position coïncide aussi avec la présence du rouleau de fond situé en aval de la structure.
- c) $L_{\sigma_{max}}$ = position qui correspond à l'endroit où la valeur moyenne de la fluctuation de pression présente une valeur maximale (σ_{max}). Physiquement, cette position coïncide avec le point d'impact du jet principal sur le radier.

- d) L_t = position à partir de laquelle la composante verticale de la vitesse du jet est significative. C'est à partir de cette position que l'épaisseur du jet tend rapidement vers toute la profondeur normale de l'écoulement. Cette position est définie par la droite passant par σ_{max} et par le point où le gradient de la fluctuation de pression change de valeur.
- e) L_a = position où le jet principal atteint toute la profondeur de l'écoulement. À cette position, nous observons de nombreuses bulles d'air et l'écoulement est encore instable. Cette position est définie par l'intersection de deux droites. Une droite est parallèle au fond du canal avec une valeur de σ_n et une autre qui passe par σ_{max} et σ_t ;
- f) L_n = position qui délimite l'influence de la structure de dissipation. Les valeurs de la pression moyenne et les valeurs moyennes de la fluctuation de pression deviennent constantes. En aval de cette position nous retrouvons le régime normal de l'écoulement.

Pour chacune de ces six (6) positions, nous pouvons déterminer la valeur de la pression moyenne et la valeur moyenne de la fluctuation de pression pour une structure donnée en utilisant la figure 6.2, le tableau 6.1 et les figures qui y sont indiquées. À partir de la pression et de la valeur moyenne des fluctuations de pression, les valeurs extrêmes peuvent être évaluées à l'aide de l'équation 6.10, en supposant comme première approximation que, pour une section donnée, la distribution suit une loi de Pearson III.

7.5 Influence des paramètres géométriques et hydrauliques

À partir de l'analyse des 264 essais (44 structures avec 6 nombres de Froude), nous avons constaté, qu'en fonction des caractéristiques géométriques et hydrauliques, la structure peut fonctionner submergée ou non. Dans ce cas, les paramètres qui ont une influence sur ce facteur sont: la différence de niveau (T) entre la cote de fond et le niveau d'eau

en aval, la hauteur de sortie (s), la hauteur d'eau à l'entrée de la structure (y_t) à la hauteur du niveau d'eau aval, l'angle de sortie (α) et le nombre de Froude (Fr) de l'écoulement. La relation entre ces paramètres est donnée par l'équation 5.1.

Nous avons noté que les paramètres géométriques les plus importants pour le dimensionnement de la structure, après la submersion, sont l'angle de sortie (α) et la hauteur de sortie (s). Lorsque la hauteur de sortie est petite, le jet, à la sortie, reste près du radier, et l'effet de la dépression provoquée par le jet à la sortie de la structure transmet sur le lit une grande fluctuation de pression. En plus, la proximité du jet sur le radier ne permet pas une bonne formation du rouleau de fond, principalement lorsque l'inclinaison de la structure est faible.

À la suite de l'analyse des essais effectués avec la structure submergée (144 essais), nous avons observé que les six (6) positions définies précédemment sont fonction des paramètres géométriques et hydrauliques:

- a) la position L_s est définie par la longueur de la structure;
- b) la position L_i est directement dépendante de la longueur de la structure (L_s) et de la position L_n ;
- c) la position $L_{\sigma_{max}}$ est dépendante de l'angle (α), de la longueur de la structure (L_s), de la position L_n et de la longueur minimale de la structure que nous pouvons obtenir avec un rayon déterminé;
- d) la position L_t est directement proportionnelle à la position L_n ;
- e) la position L_a est directement proportionnelle à l'angle (α) et à la position L_n ;
- f) la position L_n est fonction du nombre de Froude (Fr) et de la différence d'énergie (ΔH) entre l'amont et l'aval.

Pour chaque position caractéristique définie précédemment, il a été possible de mettre en évidence les paramètres qui influencent la valeur

de la pression moyenne et la valeur moyenne de la fluctuation de pression (tableau 7.1).

Position	pression moyenne	valeur moyenne de la fluctuation de pression
L_s	$\alpha, L_s; L_n$	$\alpha; y_t; Fr$
L_i	$L_s; L_n$	$\alpha; y_t; Fr$
$L\sigma_{max}$	α	$\alpha, L_s; L_n; Fr$
L_t	α	α
L_a	$y_t; Fr$	α
L_n	$y_t; Fr$	$y_t; Fr$

Tab. 7.1 - Paramètres qui influence la pression moyenne et la valeur moyenne de la fluctuation de pression

La valeur minimale des fluctuations de pression à la sortie (σ_s) est toujours obtenue lorsque la hauteur de sortie (s) est plus grande qu'une certaine valeur s_2 fournie par l'équation 6.5. Nous avons aussi observé que la valeur minimale de la fluctuation de pression, où le jet frappe le lit ($L\sigma_{max}$), est toujours obtenue lorsque la structure est égale ou plus grande que $0,3L_n$. Nous avons remarqué que certaines conditions vont favoriser l'utilisation d'angles élevés, tandis que d'autres vont favoriser l'utilisation d'angles plus faibles. L'optimisation de l'angle afin d'obtenir la valeur moyenne de la fluctuation de pression (σ_s) la plus basse possible à la sortie de la structure et à la position où le jet frappe le lit (σ_{max}), et la plus grande valeur de $L\sigma_{max}$, donne une valeur idéale de 20° . Cependant, il est possible d'utiliser un angle compris entre 15° et 45° , qui se traduira par des efforts accrus sur le radier, en aval de la structure.

Le rayon de la structure (R_s) n'a pas d'influence importante et directe sur la dissipation. Sa fonction est de faire le lien entre l'évacuateur et le dissipateur et de permettre de changer la hauteur de sortie (s) sans changer la longueur (L_s) ou vice-versa.

7.6 Critères de base de dimensionnement

À partir de conclusions mentionnées ci-dessus nous avons défini les critères de base de dimensionnement des structures à auge. Une fois les conditions hydrauliques connues (Q , ΔH , y_t , Fr), la marche à suivre pour le dimensionnement est indiquée sur l'organigramme de la figure 6.1, valable lorsque l'on veut choisir la plus petite structure possible afin d'obtenir la plus petite valeur moyenne de fluctuation de pression à la sortie d'une structure, sans se préoccuper de la valeur maximale des fluctuations de pressions. Si l'on veut optimiser la structure pour obtenir également la plus petite valeur moyenne de la fluctuation de pression, à l'endroit où l'écoulement frappe le lit en aval, l'on se doit d'utiliser l'organigramme de la figure 6.3, qui est défini pour le cas où la longueur maximale de la structure est égale à $0,3 L_n$.

Après avoir déterminé les dimensions de la structure (α , R_s , L_s , s et C_f), il est possible d'évaluer les valeurs extrêmes de pression à l'aide du tableau 6.1 et des figures qui y sont indiquées. Il est alors possible de vérifier si la résistance du radier peut supporter les pressions. Dans le cas contraire il est alors possible de recalculer les dimensions de la structure en suivant les indications de l'organigramme de la figure 6.1 ou de la figure 6.3. Si les efforts sont compatibles avec la résistance du lit, le dissipateur sera enfin dimensionné .

7.7 Travaux futurs

Pour en arriver à l'unification complète des critères de dimensionnement des dissipateurs d'énergie hydraulique à auge pour des nombres de Froude (Fr) compris entre 3,0 et 8,0, nous recommandons d'étudier le fonctionnement d'une structure avec un angle de 20° pour différentes caractéristiques géométriques et hydrauliques. Il sera par la suite possible de confirmer certaines hypothèses faites par rapport au rayon (R_s), à la hauteur d'eau en aval de la structure (y_n), à la différence de

niveau (T) entre la cote de fond et le niveau d'eau en aval et à la longueur minimale de la structure essayée. Il serait intéressant aussi de trouver le type de distribution de probabilité, qui estimerait le mieux les valeurs extrêmes pour chaque position caractéristique de l'écoulement.

En parallèle, il est suggéré de faire des mesures de fluctuations de vitesse et des essais d'érosion à fond mobiles pour associer les valeurs extrêmes de pression et de vitesse à l'érosion.

Il est importante aussi de procéder à des photographies et enregistrement des essais sur vidéo pour analyser le comportement des rouleaux et faire leur analyse selon les approches de Long et Rajaratnam [1991].

Lopardo [1986; 1992 et al] ont vérifié que pour un nombre de Reynolds à l'entrée du ressaut (Re_r) plus grand ou égal à 100.000 et une hauteur d'eau à l'entrée du ressaut (y_r) supérieure ou égale à 3 cm, les résultats entre modèle et prototype sont transférables sans problèmes. Il serait important de vérifier la possibilité d'un problème d'échelle pour les petits nombres de Reynolds étant donné le phénomène d'aération qui n'est pas reproduit à l'échelle.

Il est à souligner que dans cette recherche, nous n'avons pas abordé le phénomène de la cavitation ni le phénomène d'instabilité ni de vibration de la structure.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie citée

1. Abdul-Khader, M. H. and Elango, K. [1974]. "Turbulent Pressure Field Beneath a Hydraulic Jump." *Journal of hydraulic research*, Vol.:12, No.:4, pp.:469-489.
2. Akbari, M. E., Mittal, M. K. and Pande, P. K. [1982]. "Pressure Fluctuations on the Floor of Free and Forced Hydraulic Jumps." *Proc., International conference on the hydraulic modelling of civil engineering structures, Coventry, England*. BHRA Fluid Engineering, 1982. pp.:87-93
3. Avila, C. M. [1986]. "Erosão a Jusante de Vertedouros." Pós-graduação em engenharia Hidráulica da Universidade Federal do Parana, 29 pp.
4. Bandini, A. [1959]. "Aproveitamentos Hidroelétricos." São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos. 96 p.

5. BCOLD [1981]. "Main Brazil Dams, Design, Constructuion and Performance." 653 p.
6. Bendat, J. S. and Piersol, A. G. [1971]. "Random Data: Analysis and Measurement Procedures." New York, Wiley-interscience. 407 p.
7. Berryhill, R. H. [1957]. "Stilling Basin Experiences of the Corps of Engineers." Journal of the hydraulic division, Vol.:83, No.:HY3, pp.:1264-36.
8. Berryhill, R. H. [1964]. "Energy Dissipators for Spillways and Outlet Works." Journal of the hydraulic division, Vol.:114, No.:5, pp.:469-483, Mai
9. Bhutto, H. B. G., Mirani, S. N. and Chandio, S. N. [1989]. "Characteristics of Free Hydraulic Jump in Rectangular Channel." Mehran university research journal of engineering and technonogy, Vol.: 8, No.: 2, pp.: 34-44.
10. Bidone, G. [1820]. "Experiences sur le Remous et la Propagation des Ondes." Reale Accudemia delle Scienze di Torino, Turin, pp.: 21-121
11. Bowers, C.E., Toso, J. [1985] "Karnafull Project, Modestudies of Spillway Damage" Journal of hydraulic engineering, Vol.: 111, No.: 2, pp.: 220-235.
12. Bowers, C.E., Tsai, F., et Kuha, R. [1967] "Hydraulic Studies of Spillway of the Karnafull Hydroelectric Project, Modestudies of Spilway Damage" Journal of hydraulic engineering, Vol.: 111, No.: 2, pp.: 220-235.
13. Chow, V. T. [1959]. "The Momentum Principle." Tiré de: "Open-Channel Hydraulics." McGraw-Hill, New-York. pp.: 76-109. McGraw Hill civil engineering series, 608 p.

14. Davis, C. V. [1952]. "Handbook of Applied Hydraulics." McGraw-Hill Book Company. 2ed. 1272 p.
15. Doddaiah, D. [1967]. "Scour Below Submerged Solid Bucket-type Energy Dissipators." XII Congrès de l'Association Internationale de Recherches Hydrauliques, Fort Collins, Comptes - rendus. Fort Collins, Vol.:3, pp.:105-116.
16. Daugharty, R. B. [1958]. "Discussion on Mcpherson's Works." Journal of the hydraulic division, Vol.:84, No.:Feb, pp.:1538-43
17. Drapeau, J., Marques, M. G. and Verrette, J. L. [1995]. "Analyse des Fluctuations de Pression sous le Ressaut Hydraulique en Aval d'un Évacuateur." (sous-presse)
18. Drapeau, J. [1995]. "Étude de la Fluctuation de Pression dans un Ressaut Hydraulique Libre en Aval d'un Évacuateur de Crues." Université Laval, Québec, Maitrise type B. p.
19. Drapeau, J., Marques, M. G. and Verrette, J. L. [1995]. "Évaluation de la Distribution et de la Fluctuation de Pression dans un Ressaut Hydraulique Libre en Aval d'un Évacuateur des Crues." (sous-
presse)
20. Elder, R. A. [1961]. "Model-prototype Turbulence Scaling." Proc., IAHR, 9, Dubrovnik. pp.:24-31.
21. Elevatorski, E. A. [1957]. "Discussion on "A Study of Bucket-type Energy Dissipator Characteristics." Journal of hydraulic division, Vol.:83, No.:HY5, pp.:1417-33-5, Oct.
22. Elevatorski, E. A. [1959]. "Hydraulic Energy Dissipators." New-York, McGraw-Hill. 214 p.
23. Endres, L. A. M. [1990]. "Contribuição ao Desenvolvimento de um Sistema para Aquisição e Tratamento de Dados de Pressões

- Instantâneas em Laboratório." Porto Alegre: UFRGS, Curso de Pós-Graduação em recursos hídricos e saneamento. 104 p.
24. Favre, A., Kovaznay, L., Dumas, R., Caviglio, J. and Coantic, M. [1976]. "La Turbulence en Mécanique des Fluides" Paris, Gauthier-Villars. 411 p.
 25. Fiorotto, V. and Rinaldo, A. [1988]. "Sul Dimensionamento delle Protezioni di Fond in Bacini di Dissipazione: Nuovi Risultati Teorici e Sperimentali." *Giornale del Genio Civile*, Vol.:126, No.:7-9, pp.:179-201.
 26. Fiorotto, V. and Rinaldo, A. [1992]. "Turbulent Pressure Fluctuations under Hydraulic Jumps." *Journal of hydraulic research*, Vol.:30, No.:4, pp.:499-520.
 27. French, R. H. [1987]. "Open Channel Hydraulics." New York, McGraw-Hill. 705 p.
 28. Gandolfo, J. S. and Cotta, R. D. [1955]. "Dissipateur d'Energie." VI General Meeting of the IAHR, Vol.:3, No.: C23, 1-9
 29. Gandolfo, J. S. and Cotta, R. D. [1957]. "Kinetic Energy Dissipation on Apronfor Gate Dams." VII General Meeting of the IAHR, Vol.:2, No.:D22, pp.:1-17
 30. Graf, W. H. and Altimakar, M. S. [1991]. "Hydrodynamique." Eryolles. 482 p.
 31. Grishin, M. M. [1982]. "Hydraulic Structures." Mir, Moscow. pp.: 41.
 32. Hager, W. H. and Bremen, R. [1989]. "Classical Hydraulic Jump: Sequent Depths." *Journal of hydraulic research*, Vol.: 27, No.: 5, pp.: 565-585.

33. Hartung, F. and Hausler, E. [1973]. "Scours, Stilling Bassins and Downstream Protection Under Free Overfall Jets at Dams." XI Congrès des Grands Barrages, Madrid, Vol.:Q.41, No.:R.3, pp.:39-56.
34. Hinze, J. O. [1975]. "Turbulence." New York, McGraw-Hill. p. 2^{ième}.
35. King, D. L. [1967]. "Analysis of Random Pressure Fluctuations in Stilling Basins." *Proc. 12Th Cong. of Int. Assoc. for Hydraulic Research., Fort Collins, Colorado,*
36. Kobus, H. [1980]. "Fundamentals." Tiré de: "Hydraulic Modelling." German Associaton for Water Resources and Land Improvement, Boston. pp.:1-17.
37. Lencastre, A. [1983]. "Hidraulica Geral." Ed. Luso-brasileira. Lisboa, Hidroprojecto, pp.: 654.
38. Levi, E. [1995]. "The Science of Water - the Foundation of Modern Hydraulics." New York, Asce press. 649 p.
39. Li, W.-H. "Criteria for Similitude of Scour below Hydraulic Structures." *Proc.,* pp.: C4-1/6,
40. Li, Z. C., Zhu, L. B. and Fen, Z. H. [1988]. "An Approach to Energy Dissipation with Bucket Basin." *International Syposium on Hydraulics for High Dams - Beijin,* pp.:43-48.
41. Llamas, J. [1972]. "Penetration of Ice Blocks in the Stilling Basin of a Dam." *Proc., Ice Symposium, Leningrad.* pp.: 1-8,
42. Llamas, J. [1992]. "Hydrologie Générale - Principes et Applications." Université Laval-Département de génie civil. Québec. 656 p. 2^{ième}.
43. Long, D., Steffler, P. M. and Rajaratnam, N. [1990]. "LDA Study of Flow Structure in Submerged Hydraulic Jump." *Journal of hydraulic research.,* Vol.:28, No.:4, pp.:437-460.

44. Lopardo, R. A. and Solari, H. G. [1980]. "Fluctuaciones de Presión en la Base de Resalto Libre." Proc., IX Congreso Latino Americano de Hidráulica, 1, Mérida, Venezuela. pp.:69-78,
45. Lopardo, R. A., Lio, J. C. D. and Vernet, G. F. [1982]. "Physical Modelling on Cavitation Tendency for Macroturbulence of Hydraulic Jump." Proc., International conference on the hydraulic modelling of civil engineering structures, Coventry, England. BHRA Fluid engineering. pp.:109-121,
46. Lopardo, R. A. [1986]. "Apunte sobre Flutuaciones Macroturbulentas de Presión, Medición, Análisis y Aplicación al Resalto Hidráulico." Proc., São Paulo. Apostila do curso de turbulência, cavitação e aeração de fenômenos hidráulicos. pp.: 45,
47. Lopardo, R. A., Chividini, M. F. and Berrilio, D. A. [1987]. "Effects of Hydraulic Jump Inflow Condition on the Decay of Turbulence in Stilling Basins." Proc., International symposium on new technology in model testing in hydraulic research, India. pp.:111-114,
48. Lopardo, R. A., Lio, J. C. D. and Henning, R. E. [1987]. "Modelling Techniques for Preventing Cavitation in Structures Submerged in Hydraulic Jumps." *Proc., AIRH Congress IAHR, Lausanne Switzerland.* pp.:177-182,
49. Lopardo, R. A. [1988]. "Stilling Basin Pressure Fluctuations." *Proc., International symposium on Model-Prototype correlation of Hydraulic structures,* Colorado Springs, U.S.A. pp.:1-18.
50. Lopardo, R. A. [1992]. "Presiones Fluctuantes en Disipadores a Resalto Forzado." *XV Congreso Latinoamericano de Hidraulica IAHR, Cartagena, Colombia,* Vol. 2, pag.301-311
51. Machado, L. I. [1979]. "O Projeto de Dissipadores de Energia, Tipo Concha Lisa." *Revista do Instituto de Engenharia, São Paulo,* Vol.:415, No.: pp.:52-55.

52. Machado, L. I. [1980]. "Teoria do Trampolim Submerso de Lançamento Simples." *Proc., Seminário nacional de grandes barragens, Anais, Recife*. Comité Brasileiro de Grandes Barragens. pp.:31-45.
53. Maestri, R. D. and Marques, M. G. [1989]. "Estudo Comparativo de Três Estruturas do Tipo Trampolim Submerso para um Vertedor de Demasias." Simposio brasileiro de recursos hidricos, Foz do Iguaçu. Anais São Paulo: ABRH., Vol.:2, No.:2, pp.:335-347.
54. Maestri, R. D., Santalo, J. B., Marques, M. G. and Leal, M. F. U. [1989]. "Barragem de Dona Francisca, Dissipação de Energia: Relatório Final." Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas de UFRGS, 92 p.
55. Maestri, R. D. and Marques, M. G. [1990]. "Escolha da Geometria do Dissipador de Energia da UHE Dona Francisca. I." Montevideo: Asociation Internacional de Investigaciones Hidraulicas, Vol.: 3, No.: 1, pp.: 291-301.
56. Marques, M. G. [1991]. "Contribuição ao Estudo da Influencia do Angulo de Saída nos Dissipadores Tipo Concha." Porto Alegre: UFRGS, Curso de Pós-Graduação em recursos hídricos e saneamento. 128 p.
57. Martins, R. "Recent Advances in Hydraulic Physical Models" Netherlands: Kluwer Academic Publishers; 1988.
58. Mason, P. J. [1982]. "The Choice of Hydraulic Energy Dissipators for Dam Outletworks Based on a Survey of Prototype Usage". *Proc. Inst. Civ. Engers., Part.1, 72*, pp.: 209-219.
59. Mason, P. J. and Arumugam, K. [1985]. "Free Jet Scour Below Dams and Flip Buckets." *Journal of hydraulic engineering*, Vol.: 111, No.: 2, pp.:220-235.

60. McCordquodale, J. A. and Mohamed, M. S. [1994]. "Ressauts Hydrauliques dans des Canaux en Contre-Pente." *Journal of Hydraulic Research*, Vol.:32, No.:1, pp.:119-130.
61. McPherson, M. B. and Karr, M. H. [1957]. "A Study of Bucket Type of Energy Dissipator Characteristics." *Journal of hydraulic division* , Vol.:83, Juin, No.:pp.:1266-1-18.
62. Macpherson, M.B. and Karr, M.H. [1957]. "Discussion by "A Study of Bucket-type Energy Dissipator Characteristics." *Journal of hydraulic division*, Vol.:83, No.:HY4, pp.:1348-57-64, Aug.
63. Neidert, S. H. [1980]. "Relato Geral sobre o Tema Desempenho de Vertedores, Dissipação, Cavitação e Erosão." *Seminário nacional de Grandes Barragens*, Vol.:3, No.:pp.:51-69.
64. O'Malley, C.D.[1969] "Leonard's Legacy" Berkeley and Los Angeles University of California Press.
65. Ortiz, J. P. [1982]. "Macroturbulência de Escoamento à Jusante de Estruturas de Dissipação por Ressalto." *Boletim técnico DAEE*, São Paulo, Vol.: 5, No.: pp.: 273-472.
66. Pereira, G. M. [1990]. "Erosão à Jusante de Dissipadores de Energia: Aspectos Hidráulicos." *Engevix*, pp.:
67. Peterka, A. J. [1957]. "Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators." Washington, U.S. Govt. Print. Off. 222 p.
68. Pinto, N. L. S. [1987]. "Hidraulica Aplicada." Curitiba, CHEPAR.
69. Pinto, N. L. S. [1989]. Lettre "Informe sobre Fundo Coesivo em Modelos Reduzidos." Curitiba: 19 dez. 1989 3f.

70. Rajan, B. H. and Rao, K. N. S. [1980]. "Design for Solid Roller Buckets." *Journal of Central Board of Irrigation and Power*, Vol.:37, No.:4, pp.:435-444.
71. Rajan, B. H., Rao, K. N. S., Gowda, G. and Raghavendra, V. J. [1982]. "An Experimental Study of the Shapes of Spillway." *Journal of Central Board of Irrigation and Power*, Vol.: 39, No.: 1, pp.: 75-85.
72. Rajaratnam, N. [1965]. "Submerged Hydraulic Jump." *Journal of hydraulic division* , Vol.:91, No.:HY4, pp.:71-96.
73. Rajaratnam, N. [1965]. "The Hydraulic Jump as Wall Jet." *Journal of hydraulic division* , Vol.: 91, No.: HY5, pp.:107-132.
74. Raju, R. [1991]. "Hydraulic jump." *Extrait de: "Flow Through Open Channel."* MacGraw-Will, N. Deli. pp.:171-203.
75. Rao, K. N. S. [1981]. "Design of Energy Dissipators." pp.:311-328.
76. Reinus, E. [1970]. "Head losses in Unlined Rock Tunnels." *Water Power and Dam Construction*, No.: july/August, pp.: 256-252.
77. Reinus, E. [1986]. "Rockerosion." *Water Power and Dam Construction*, Vol.: 38, No.: 6, pp.: 43-48.
78. Resch, F. J. and Leutheusser, H. J. [1971]. "Mesures de turbulence dans le ressaut hydraulique." *La houille blanche*, No.: 1, pp.: 17-32.
79. Reti, L. [1974]. "Léonard de Vinci; L'Humaniste, L'Artiste, L'inventeur." Paris, Robert Laffont, S.A. 319 p.
80. Rezende, B. S. [1965]. "Estagio de aperfeiçoamento na divisao de Hidraulica Fluvial e Urbana do Laboratorio Nacional de Engenharia Civil De Lisboa." Instituto de Pesquisas Hidraulicas da UFRGS,
81. Robert, P. [1993]. Paris, Dictionaires Le Robert. 2467 p.

82. Rouse, H. [1967]. "Engineering Hydraulics." New York, 1039 p. John Wiley & Sons.
83. Rudavsky, A. B. [1976]. "Selection of Spillways and Energy Dissipators in Preliminary Planning of Dam Developments." XII Congress on large dams Vol.: Q.46, No.: R.9, pp.:153-180.
84. Ruipeng, W. [1988]. "Selection of Energy Dissipator with Large Unit Discharge." Internacional symposium on hydraulics for high dams, Beijing, pp.:265-272.
85. Sauma Haddad, J.C. et Al "Una Aproximacion Analitica para la Superficie Libre del Resalto Hidraulico", XV Congreso Latinoamericano de Hidraulica IAHR, Cartagena, Colombia, Vol.2, pag.301-311
86. Schreiber, G. P. [1978]. "Usinas Hidráulicas." São Paulo. Ltda. E. B.
87. Sinniger, R. O. and Hager, W. H. [1989]. "Ouvrages de Dissipation." Tiré de: "Constructions Hydrauliques - Écoulements Stationnaires." Presses polytechniques romandes, Lausanne. pp.: 312-361. Traité de génie civil de l'école polytechnique fédérale de Lausanne, Vol.15, 439 p.
88. Spolarjic, A., Maksimovic, C. and Hajdin, G. [1982]. "Unsteady Dynamic Force Due to Pressure Fluctuations on the Bottom of an Energy Dissipator - an Example -." Proc., International conference on the hydraulic modelling of civil engineering structures, Paper C2, Coventry, England. BHRA fluid engineering. pp.:97-107,
89. Spur, K. J. W. [1985]. "Energy Approach to Estimating Scour Downstream of a Large Dam." Water Power and Dam Construction, Vol.:37, No.:7, pp.:81-89.
90. Tamada, K. [1980]. "Dissipação de Energia Hidráulica; Estudo Experimental de Alguns Tipos de Bacia de Dissipação."

- Departamento de Água e Energia Elétrica, DAEE, Vol.:33, No.:3, pp.:225-236.
91. Tamada, K. [1989]. "Dissipadores de Energia com Baixo Número de Froude: Estudo Experimental." Universidade de São Paulo, Doutorado. 250p.
 92. Tennekes, H. and J.L.Lumley [1972]. "A First Course in Turbulence." Cambridge, Mit Press. 300 p.
 93. Toso, J. W. [1986]. "The Magnitude and Extent of Extreme Pressure Fluctuations in the Hydraulic Jump." Minnesota University, 163 p.
 94. U.S.Army [1977]. "High Overflow Dams Bucket-type Dissipator." Tiré de: "Hydraulic Design Criteria." Vicksburg. pp.: 112-6 - 112-6/2.
 95. U.S.B.R. [1987]. "Design of Small Dams" U.S.Govt. Print. Off, Denver.
 96. U.S.B.R. [1987]. "Spillways." Tiré de: "Design of Small Dams." U.S.Govt. Print. Off, Denver. pp.:339-434, 860p.
 97. Valença, R. and D.Carvalho [1989]. "Dimensionamento de bacias de dissipação em rampa contra-inclinada." Revista brasileira de Engenharia Caderno de Recursos Hídricos, Rio de Janeiro, Vol.: 7, No.: 2, pp.: 83-102.
 98. Vasiliev, D. F. and Buryev, V. I. [1967]. "Statical Characteristics of Pressures in the Region of Hydraulic Jumps." XII Congress of the IAHR Ft. Collins, Colorado, Vol.: 2, No.: 1, pp.: 1-8.
 99. Weizhang, K. [1988]. "Study on the Limit of Bucket Roller for Submergence." Proc., Internacioanal symposium on hydraulics for high dams, Beijing. pp.:335-340,

100. Wisner, P. [1967]. "Sur les Fluctuations de la Pression au Fond des Ressauts en Conduit et en Écoulement Libre." XII Congress of the IAHR Ft. Collins, Colorado, Vol.:2, No.:1, pp.:46-53.
101. Zhenxing, S. [1988]. "Hydraulic Test of Local Erosion Behind Standard Roller Bucket." Proc., International symposium on hydraulics for high dams, Beijing. pp.:122-129,
102. Zhiheng, Z. [1988]. "Hydraulic computation and desing for roller bucket." Proc., International symposium on hydraulics for high dams, Beijing. pp.: 114-121,
103. Zhuo-yi, D. [1991]. "Studies on the Two Dimentionnal Free Hydraulic Jump Taking Account of Turbulence Intensity and Other Factors." Journal of hydrodynamics, Vol.: B, No.: 2, pp.: 71-74.

Bibliographie complémentaire

1. Advani, R. M. and Modi, P. N. [1971]. "Discussion by Efficiency of hydraulic jump." *Journal of hydraulic division*, Vol.:97, No.:HY11, pp.:1923-2110.
2. Agroskin [1967]. "Conjugação de Niveis a Jusante de Vertedouros com dissipador tipo ressalto ondulado - traduction ENGEVIX." Tiré de: "Hidraulica de I.I." Moscou.
3. Allocca, J. A. and Stuart, A. [1984]. "Transducers: Theory & Applications." Reston, Virginia, Reston Publishing Company. 497 p. 5ième.
4. Barfuss, S. L. and Tullis, J. P. "Design of Riprapped Scourholes for Flip Bucket and Overfall Spillways." *Hydraulic Engineering*, pp.:1135-1142.

5. Belanger, J. B. [1828]. "Essai sur la Solution Numérique de Quelques Problèmes Relatifs au Mouvement Permanent des eaux courantes." Paris, Carilian-Goeury.
6. Berryhill, R. H. [1957]. "Experience with Prototype Energy Dissipators." *Journal of the hydraulic division*, Vol.: 89, No.: HY3, pp.: 1224-36.
7. Bowers, C. E. and Tsai, F. Y. [1969]. "Fluctuating Pressures in Spillway Stilling Basins." *Journal of the hydraulic division, ASCE*, Vol.:95, No.:Hy6, pp.:2071-2079.
8. Camargo, S. A. [1980]. "Macroturbulência de Pressão em Estruturas de Dissipação de Energia por Ressalto Hidráulico." *Proc., Seminário nacional de grandes barragens*, 1, Rio de Janeiro. pp.:207-237,
9. Catakli, O., Ozal, K. and Tandogan, R. [1973]. "A Study of Scours at the end of Stilling Basin and Use of Horizontal Beams as Energy Dissipators." *Proc., XI Congrès des Grands Barrages*, Madrid. pp.:23-37,
10. Dillon, G. S., Paul, T. C. and Sayal, S. K. [1988]. "Deflector Bucket as Energy Dissipator." *Irrigation and power*, Vol.: April,1988, pp.:154-167.
11. Dmitriev, A. F. and Khlapuk, N. N. [1990]. "Dissipation of Increased Turbulence of a Flow in a Bottom Hydraulic Jump." *Hydrotechnical construction*, Vol.:23, No.:7, pp.:390-395.
12. El-Khashab, A. M. [1987]. "Pressure Fluctuations on the Floor of Hydraulic Jumps." *Hydraulic engineering*, pp.: 116-121.
13. Farhoudi, J. and Smith, K. V. H. [1982]. "Time Scale for Scour Downstream of Hydraulic Jump." *Journal of the hydraulic division*, Vol.:108, No.:HY10, pp.:1147-1162.

14. Farhoudi, J. and Smith, K. V. H. [1985]. "Local Scour Profiles Downstream of Hydraulic Jump." *Journal of hydraulic research*, Vol.:23, No.:4, pp.:343-358.
15. Farhoudi, J. and Narayanan, R. [1991]. "Force on slab beneath hydraulic jump." *Journal of hydraulic engineering*, Vol.:117, No.:1, pp.:64-82.
16. Fletcher, B. P. and Saunders, P. E. [1988]. "Dynamic Loading on Sidewall Monoliths of a Spillway Stilling Basin." *U.S. Army engineer Waterways experiment station, Corps of engineers*, pp.:1-15
17. Frenette, M. [1987]. *Hydraulique des Cours d'Eau Université Laval- Département de génie civil - Québec*. Vol.:Cours GCI 15201
18. Frenette, M. [1987]. *Morphologie et Sédimentologie Fluviale Université Laval-Département de génie civil - Québec*. Vol.: Cours GCI 60332
19. Gardiner, S. R. M. and Hay, D. [1982]. "Dynamic Force Measurement on Stilling Basin Floor and Sidewalls." *Proc., International conference on th hydraulic modelling of civil engineering structures, Coventry, England*. BHRA Fluid Engineering. pp.:123-130,
20. Garg, S. P. and H.R.Sharma [1971]. "Efficiency of Hydraulic Jump." *Journal of the hydraulic division*, Vol.:97, No.:HY3, pp.:409-420.
21. Graf, W. H. and Altinakar, M. S. [1993]. "Hydraulique Fluviale - Écoulement Permanent Uniforme et Non Uniforme." Presses polytechniques romandes, Lausanne. *Traité de génie civil de l'école polytechnique fédérale de Lausanne*, Vol. 16, 259 p.
22. Hager, W. H. [1983]. "Open Channel Hydraulics of Flows with Increasing Discharge." *Journal of hydraulic research*, Vol.:21, No.:3, pp.:177-193.

23. Hager, W. H. and Hutter, K. [1983]. "Approximate treatment of the plane hydraulic jump with separation zone above the flow zone." *Journal of hydraulic research*, Vol.:21, No.:3, pp.:195-204.
24. Hager, W. H. and Dupraz, P.-A. [1985]. "Discharge characteristics of local, discontinuous contractions." *Journal of hydraulic research*, Vol.:23, No.:5, pp.:421-433.
25. Hager, W. H. [1985]. "Hydraulic Jump in Non-prismatic Rectangular Channels." *Journal of hydraulic research*, Vol.: 23, No.: 1, pp.: 21-35.
26. Hager, W. H. and Sinniger, R. [1985]. "Flow Characteristics of the Hydraulic Jump in a Stilling Basin with an Abrupt Bottom Rise." *Journal of hydraulic research*, Vol.:23, No.:2, pp.:101-113.
27. Hager, W. H. and Bretz, N. V. [1986]. "Hydraulic Jumps at Positive and Negative Steps." *Journal of hydraulic research*, Vol.:24, No.:4, pp.:237-253.
28. Hager, W. H. [1987]. "Discharge characteristics of local discontinuous contractions II." *Journal of hydraulic research*, Vol.:25, No.:2, pp.:197-213.
29. Hager, W. H. and Wanoschek, R. [1987]. "Hydraulic Jump in Triangular Channel." *Journal of hydraulic research*, Vol.:25, No.:5, pp.:549-564.
30. Hager, W. H. [1989]. "B-jump in Sloping Channel." *Journal of hydraulic research*, Vol.:27, No.:1, pp.:539-558.
31. Hager, W. H., Bremen, R. and Kawagoshi, N. [1990]. "Classical Hydraulic Jump: Length of Roller." *Journal of hydraulic research*, Vol.:28, No.:5, pp.:591-608.
32. Hager, W. H. [1992]. "Sill-Controlled Energy Dissipator." *Journal of hydraulic research*, Vol.:30, No.:2, pp.:165-180.

33. Hartung, F. and Csallner, K. [1972]. "Efficiency of Hydraulic Jump." *Journal of the hydraulic division [Discussion]*, Vol.:98, No.:Hy1, pp.:278-284.
34. Hordeski, M. F. [1987]. "Transducers for Automation." New York, Van Nostrand Reinhold Company Inc. 301 p.
35. Hughes, W. C. and Flack, J. E. [1984]. "Hydraulic Jump Properties over a rough bed." *Journal of the Hydraulic Engineering*, Vol.: 110, No.: 12, pp.:1755-1782.
36. Jinghui, X. [1988]. "Analysis and Calculation Formulas of Conjugate Water Surfaces for the Dissipator of Surface Regime and Bucket." *Proc., International Symposium on Hydraulics for High Dams.*, 1, Beijing. pp.:341-342,
37. Kawagoshi, N. and Hager, W. H. [1990]. "Wave Type Flow at Abrupt Drops." *Journal of hydraulic research*, Vol.:28, No.:2, pp.:235-252.
38. Kawagoshi, N. and Hager, W. H. [1990]. "B-jump in Sloping Channel." *Journal of hydraulic research*, Vol.:28, No.:4, pp.:461-480.
39. Kim, J. [1989]. "On the Structure of Pressure Fluctuations in Simulated Turbulent Channel Flow." *Journal of fluid mechanics*, Vol.:205, No.:pp.:421-451.
40. Kwok, S. and Tou, W. [1989]. "Pressure Fluctuations Measurement and Analysis in Hydraulic Jumps Using a Microcomputer." *Journal of the chinese institute of engineers* , Vol.:12, No.:3, pp.:393-402.
41. Leutheusser, H. J. and Ward, C. A. "Thermodynamic Aspects of Hydraulic Aeration." *Proc., International association for hydarulic research I.A.H.R.*, pp.:500-508,

42. Leutheusser, H. J. and Kartha, V. C. [1972]. "Effects of Inflow Condition on Hydraulic Jump." *Journal of hydraulic division*, Vol.: 98, No.: HY8, pp.:1367-1385
43. Leutheusser, H. J. and Birk, W. M. [1991]. "Drowprofing of low overflow structures." *Journal of hydraulic research*, Vol.: 117, No.: 2, pp.: 205-213.
44. Long, D., Rajaratnam, N., Steffler, P. M. and Smy, P. R. [1991]. "Structure of Flow in Hydraulic Jumps." *Journal of hydraulic research*, Vol.:29, No.:2, pp.:207-218.
45. Lopardo, R. A. and Vernet, G. F. [a] "Ondes à l'aval des Centrales Voisines aux Évacuateurs de Crues." *Proc., C.a.9, Association Internationale de Recherches hydrauliques*. pp.:73-80,
46. Lopardo, R. A. and Haddad, J. C. S. [b] "Estimations of Fatigue Aspects on Structures Submerged in Macroturbulent flows." pp.:1-7.
47. Lopardo, R. A., Lio, J. C. D., Vernet, G. F., Franco, H. and Tatone, G. [1982]. "Verificación Prototipo-modelo de Presiones Fluctuantes sobre Dientes Dissipadores." *Proc., X Congreso Latino-Americano de Hidráulica, 1, México*. pp.: 325-335,
48. Lopardo, R. A., Lio, J. C. D. and Vernet, G. F. [1984]. "Model-prototype Comparaison on Pressure Fluctuations in Hydraulic Jump Energy Dissipators." *Proc., Sumposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic structures, Esslingen um Neckar*. Germany. pp.:7.2.1-7.2.5,
49. Lopardo, R. A., Vernet, G. F. and Henning, R. E. [1984]. "Corelación de Presiones Instantáneas Inducidas por un Resalto Hidráulico Libre y estable." *Proc., XI Congreso Latino Americano de Hidráulica, 1, Buenos Aires*. pp.:23-24,

50. Lopardo, R. A. and Henning, R. E. [1984]. "Efecto de las Condiciones de Ingreso al Resalto Sobre el Campo de Presiones Instantáneas." *Proc., XII Congreso Latino Americano de Hidráulica*, 1, São Paulo. pp.:116-127,
51. Lopardo, R. A. and Henning, R. E. [1984]. "Temas Practicos de la Medición y Análisis de Presiones Instantáneas en Laboratorio." *Proc., XI Congreso Latino Americano de Hidráulica*, 1, Buenos Aires. pp.:375-386,
52. Lopardo, R. P., Angelaccio, C. M. and Chividini, M. F. [1984]. "Un Aspecto del Fenómeno de Separación en Escurrimientos Macroturbulentos." *Proc., XI Congreso latino-americano de hidraulica Anales*, 1, Buenos Aires. Asociación International de Investigaciones Hidraulicas. pp.:47-58,
53. Lopardo, R. A., Vernet, G. F. and Chividini, M. F. [1985]. "Modelling the Behaviour of High Head Hydraulic Jump Energy Dissipators Under Flood Conditions." *Proc., 2nd International Conference on the Hydraulic of Floods & Flood Control*, Cambridge, England. BHRA, The fluid engineering center. pp.:313-323,
54. Lopardo, R. A. and Henning, R. E. [1985]. "Experimental Advances on Pressure Fluctuations Beneath Hydraulic Jumps." *Proc., 21st IAHR Congress*, Melbourne, Australia. pp.:634-638,
55. Lopardo, R. A. [1987]. "Notas sobre Fluctuaciones Macroturbulentas de Presion, Medicion, analisis y Aplicacion al Resalto Hidraulico." *Revista latino americana de hidraulica*, Vol.: No.: 2, pp.:109-154.
56. Lopardo, R. A. [1988]. "Stilling basin pressure fluctuations." *Proc., International symposium on Model-Prototype corelation of Hydraulic structures*, Colorado Springs, U.S.A. pp: 1-18.
57. Mahmmod, K. [1971]. "Efficiency of Hydraulic Jump." *Journal of hydraulic division* [Discussion], Vol.: 97, No.: HY10, pp.:1790-1797.

58. Marques, M. G., Drapeau, J. and Verrette, J. L. [1994]. "Análise da Flutuação de Pressão Provocada pela Formação de um Ressalto Hidráulico a Jusante de Vertedouros." *Proc., Centro Interamericano de Estudos Avançados dos Recursos da água, Salvador-Bahia- Brasil. Universidade Católica do Salvador.* pp.:129-149.
59. Mason, P. J. [1982]. "The Choice of Hydraulic Energy Dissipator for Dam Outletworks Based on a Survey of Prototype Usage." *Proc. Inst. Civ. Engrs.*, 1, pp.:209-219.
60. Mazumdar, S. K. and Naresh, H. S. [1988]. "Use of Apputenances for Economic and Efficient Design of Jump-type Dissipator Having Diverging Side Walls for Flumed Canal Falls." *Journal C.L.* No.: 2, pp.:284-289.
61. Mehrotra, S. C. [1976]. "Length of Hydraulic Jump." *Journal of hydraulic division* , Vol.:102, No.:HY7, pp.:1027-1033.
62. Miche, B. [1990] *Aménagement des Ressources Hydrauliques.* Université Laval-Département de génie civil - Québec. Vol.:Cours GC1 8468 .
63. Mulan, W., Chauanfeng, J., Baolian, X. and Shuanlin, S. [1987]. "Pressure Fluctuations on Bottom of Bucket of Spillway." *Proc., Laussane.* pp.:268-269,
64. Mulan, W. and Guanping, Z. [1988]. "Risk Analyis in Prediction of Local Scour Dowstream of a Trajectory Bucket." *Proc., International symposium on hydraulics for high dams, Beijing.* pp.:1153-1159.
65. Narasimhan, S. and P.Bhargava, V. [1976]. "Pressure fluctuations in submerged jump." *Journal of hydraulic division* , Vol.:102, No.:HY3, pp.:339-350.
66. Narayanan, R. [1975]. "Wall Jet Analogy to Hydraulic Jump." *Journal of hydraulic division* , Vol.:101, No.:HY3, pp.:347-359.

67. Narayanan, R. [1978]. "Pressure fluctuations beneath submerged jumps." *Journal of hydraulic division* , Vol.:104, No.:HY9, pp.:1331-1342.
68. Narayanan, R. [1980]. "Cavitation Induced by Turbulence in Stilling Basin." *Journal of hydraulic division* [Technical notes], Vol.:106, No.:HY4, pp.:616-619.
69. Narayanan, R. [1980]. "Force Fluctuations on Sill of Hydraulic Jump." *Journal of hydraulic division* , Vol.:106, No.:HY4, pp.:589-599.
70. Norton, H. N. [1969]. "Handbook of transducers for electronic measuring systems." Englewood cliffs, N.J., Prentice Hall inc. 704 p. 3^{ième} .
71. Ohtsu, I. and Yasuda, Y. [1990]. "B-jump in Sloping Channel." *Journal of hydraulic research* [Discussion], Vol.:28, No.:1, pp.:105-119.
72. Ohtsu, I. and Yasuda, Y. [1991]. "Hydraulic Jump in Sloping Channel." *Journal of hydraulic engineering*, Vol.:117, No.:7, pp.:905-921.
73. Ohtsu, I. and Yasuda, Y. [1991]. "Drag on Vertical Sill of Forced Jump." *Journal of hydraulic research*, Vol.:29, No.:1, pp.:29-47.
74. Ortiz, J. P. [1987]. "As pressões e velocidades instantâneas induzidas pelo escoamento turbulento.", pp.:49-104.
75. Ouellette "Analyse Spectral" Université Laval-Département de génie civil - Québec. Vol.: Cours GCI 60333
76. Peter, Y. [1977]. "Length of Hydraulic Jump." *Journal of hydraulic division* , Vol.: No.:HY3, pp.:341-343.
77. Pinto, L. C. D. S., Vasconcellos, J. E. D. and Seyssel, R. L. "Análise Experimental da Flutuação de Pressão na Base de um Ressalto

- Hidráulico Livre e Afogado." *Proc., XIII congresso latinoamericano de hidráulica*, pp.:182-194,
78. Qingchao, L. [1988]. "High Water Head Buckets Desing Method Couting in Energy Loss." *Proc., Internacioanal symposium on hydraulics for high dams, Beijing*. pp.:345-346,
 79. Rahman, M. M., Faghri, A. and Hankey, W. L. "Computation of Turbulent Flow in a Thin Liquid Layer of Fluid Involving a Hydraulic Jump." pp.:71-80.
 80. Rajaratnam, N. and Subramanya, K. [1968]. "Profile of the Hydraulic Jump." *Journal of hydraulic division* , Vol.:94, No.:HY3, pp.:663-673.
 81. Rao, N. S. G. and Rajaratnam, N. [1963]. "The Submerged Hydraulic Jump." *Journal of hydraulic division* , Vol.:89, No.:HY1, pp.:139-162.
 82. Resch, F. J., Leutheusser, H. J. and Coantic, M. [1976]. " tude de la Structure Cin matique et Dynamique du Ressaut Hydraulique." *Journal of hydraulic research*, Vol.:14, No.:4, pp.:293-309.
 83. Rouse, H., Siao, T. and Nagaratanam, S. "Turbulence Characteristics of the Hydraulic Jump." *Proc., 124, ASCE*.
 84. Shiwu, Y. [1988]. "A New Approach to Spectral Estimation for Hydraulic Pressure Fluctuations." *Proc., The international symposium on hydraulics for high dams, Beijing*. pp.:499-506,
 85. Smith, C. D. and Chen, W. [1989]. "The Hydraulic Jump in a Steeply Sloping Square Conduit." *Journal of hydraulic research*, Vol.:27, No.:3, pp.:385-399.
 86. Sumi, T. [1988]. "Forced Hydraulic Jump Type Energy Dissipator with Secondary Dam." *Proc., The international symposium on hydraulics for high dams, Beijing*. pp.:106-113,

87. Toso, J. W. and Bowers, C. E. [1987]. "Design Considerations for Hydraulic Jump Structures." *Hydraulic engineering*, pp.:110-115.
88. Toso, J. W. and Bowers, C. E. [1988]. "Extreme Pressure in Hydraulic Jump Stilling Basins." *Journal of hydraulic engineering*, Vol.:114, No.:8, pp.:829-843.
89. Tou, K.-W. [1989]. "Pressure Fluctuations Measurement and Analysis in Hydraulic Jumps Using a Microcomputer." *Journal of the chinese Institute of Engineers*, Vol.:12, No.:3, pp.:393-402.
90. U.S.Army [1977]. "Spillways Stilling Basins." Tiré de: "Hydraulic Design Criteria." Vicksburg. pp.:112-1/2 , 112-2/2.
91. Verrette, J.-Ls [1989]. *Hydraulique des Conduites Université Laval - Département de génie civil Québec Vol: Cours GCI15200*
92. Verrette, J.-Ls [1989]. *Hydrodynamique Université Laval - Département de génie civil Québec Cours Québec Vol: Cours GCI 15199*
93. Vysotskii, L. I., Denisov, A. B. and Yudin, B. I. [1990]. "Calculation of a Hydraulic Jump on the Basis of a Hybrid Model." Traduit de *Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo*, No.:7, pp.:12-13.
94. Wanoschek, R. and Hager, W. H. [1988]. "Hydraulic Jump in Trapezoidal Channel." *Journal of hydraulic research*, Vol.:27, No.:3, pp.:429-446.
95. Warnock, J. E. [1936]. "Experiments Aid in Designing Grand Coulee Dam." *Civil Engineering*, Vol.:6.
96. Wilson, E. H. and Turner, A. A. [1971]. "Boundary Layer Effects on Hydraulic Jump Location." *Journal of hydraulic division*, Vol.: 98, No.:HY7, pp.:1127-1142.

97. Yrou-Koungtung, M., L. W. [1982]. "Optimal Desing of Stilling Basins for Overflow Spillways." *Journal of hydraulics division*, Vol.:108, No.:HY10, october, 1982, pp.:1163-1178.
99. Zhelin, D., Lizhong, N. and Longde, M. [1988]. "Some Hydraulic Problems of Slit-type Flip Buckets." *Proc., internacioanal symposium on hydraulics for high dams, Beijing*. pp.:287-294,

ANNEXES

TABLEAUX DES RÉSULTATS DES ESSAIS

Nous présentons, dans les annexes 1 à 72, les résultats de chaque essai au cours desquels la structure a fonctionné submergée. Nous y montrons, pour chaque prise, les valeurs mesurées de:

- a) La pression moyenne (P);
- b) La valeur moyenne de la fluctuation de pression - l'écart type (σ);
- c) Le coefficient d'asymétrie (A_d);
- d) Le coefficient d'aplatissement ou de kurtose (k); et
- e) La fréquence dominante (f_p).

La position de la prise (x^*) est fixée par rapport au début du bassin type I (figure 4.2). Pour avoir la position (x) par rapport à la partie la plus basse de la structure, nous devons utiliser l'équation A.1.

$$x = x^* - 0,7C_f \quad (A.1)$$

Le Tableau A.1 permet de trouver le numéro des annexes contenant les résultats correspondants aux recherches, selon le nombre de Froude à l'entrée du dissipateur (Fr), l'angle de sortie (α), la cote de fond (C_f) et la longueur de la structure (L_s) pour chaque essai.

α	C_f (mm)	L_s (mm)	Fr					
			3,1	3,6	4,6	5,5	6,4	7,6
0°	0	0	1	16	30	41	52	62
15°	0	250	non	non	non	non	non	non
		350	non	non	non	non	non	non
		450	non	non	non	non	non	non
		550	non	non	non	non	non	non
	-32	250	1	non	non	non	non	non
		350	non	non	non	non	non	non
		450	non	non	non	non	non	non
		550	non	non	non	non	non	non
	-64	350	2	16	30	42	53	63
		450	2	17	31	42	53	63
		550	3	non	non	non	non	non
		650	non	non	non	non	non	non
		750	non	non	non	non	non	non
	-96	450	3	17	31	43	54	64
		550	4	18	32	43	54	64
		650	4	18	32	44	55	65
750		5	19	33	44	55	65	
30°	0	250	non	non	non	non	non	non
		300	non	non	non	non	non	non
		350	non	non	non	non	non	non
	-32	250	5	19	33	45	non	non
		300	6	20	non	non	non	non
		350	6	non	non	non	non	non
		450	non	non	non	non	non	non
	-64	250	7	20	34	45	56	66
		300	7	21	34	46	56	66
		350	8	21	35	46	57	67
		450	8	22	non	non	non	non
	-96	300	9	22	35	47	57	67
		350	9	23	36	47	58	68
450		10	23	36	48	58	68	

Tableau A.1 - Index des Annexes des Essais

α	C_f (mm)	L_s (mm)	Fr					
			3,1	3,6	4,6	5,5	6,4	7,6
45°	0	250	10	24	non	non	non	non
		300	11	24	non	non	non	non
		350	11	25	non	non	non	non
	-32	250	12	25	37	48	59	69
		300	12	26	37	49	non	non
		350	13	26	38	non	non	non
	-64	250	13	27	38	49	59	69
		300	14	27	39	50	60	70
		350	14	28	39	50	60	70
	-96	250	15	28	40	51	61	71
		300	15	29	40	51	61	71
		350	15a	29	41	52	62	72

non = structure non submergée ou absence de mesures de fluctuation de pression

Tableau A.1 - Index des Annexes des Essais(suite)

Annexes 01 à 06 (Ft=3,1)

Annexes 1		Bassin $\alpha = 0^\circ$					Coquille $\alpha = 15^\circ$				
		Fr = 3,1		Cf = 0 mm			Fr = 3,1		Cf = -32 mm		
		Frr = 4,9		Ls = -			Frr = 4,9		Ls = 250 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	160.6	20.3	1.2230	7.0090	0.0	-	-	-	-	-
2	100	121.9	20.4	1.2102	6.8760	0.0	-	-	-	-	-
3	150	133.5	32.1	1.5790	8.3699	3.5	-	-	-	-	-
4	200	142.3	30.8	1.3333	6.6491	3.5	-	-	-	-	-
5	300	158.0	45.5	1.2676	6.2345	3.0	110.1	161.9	-0.7250	4.5499	3.0
6	400	187.5	46.5	0.8165	4.2620	3.0	120.1	112.6	0.3419	3.6196	-
7	500	207.6	56.0	0.7329	4.4634	1.5	290.3	121.2	-0.2000	2.6289	2.5
8	600	230.6	57.4	0.6414	3.9902	2.0	368.2	75.3	-0.0715	2.9616	-
9	700	239.5	53.0	0.3028	3.7093	1.5	360.3	42.8	-0.0784	3.5388	4.0
10	800	263.9	44.9	0.4552	4.0700	1.5	358.3	27.6	0.1352	3.9273	-
11	900	285.9	49.2	0.2280	3.9279	1.5	369.0	25.0	0.1255	3.9275	3.5
12	1000	302.4	53.8	0.1196	4.2648	3.5	373.2	21.8	-0.0197	4.1202	-
13	1200	326.0	44.1	0.0928	4.0212	3.5	387.1	17.7	-0.1018	4.2663	0.0
14	1400	353.6	37.6	-0.3612	5.2712	3.5	394.7	14.5	-0.1047	3.9921	-
15	1600	373.4	30.0	-0.2810	4.2570	0.0	402.4	12.6	-0.1426	3.8799	0.0
16	1800	387.9	24.9	-0.0908	4.0833	0.0	412.5	11.2	-0.4743	4.1471	-
17	2000	397.8	19.3	-0.2711	4.4650	-	419.1	9.6	-0.3058	3.9072	-
18	2400	414.6	13.8	-0.4992	3.9772	-	421.6	6.7	-0.1927	3.2047	-
19	2800	423.8	9.9	-0.3272	4.4605	-	428.6	5.9	-0.3184	3.7641	-
20	3200	426.7	7.9	-0.2132	3.4612	-	437.6	4.7	-0.2466	4.0218	-
21	3600	425.6	7.6	-0.0254	2.7771	-	434.7	4.6	0.1428	3.8875	-
22	4000	427.4	6.8	0.0886	2.7778	-	429.6	4.4	-0.0075	3.2211	-

Annexes 01 à 06 (Ft=3,1)

Annexes 2		Coquille $\alpha = 15^\circ$					Coquille $\alpha = 15^\circ$				
		Fr = 3,1		Cf = -64 mm			Fr = 3,1		Cf = -64 mm		
		Frr = 4,9		Ls = 350 mm			Frr = 4,9		Ls = 450 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	143.6	173.0	0.0201	2.8646	-	-	-	-	-	-
8	600	321.6	99.8	-0.6984	3.6263	-	313.5	52.1	-0.3516	3.1675	-
9	700	336.9	53.9	-0.3175	3.3530	3.5	310.2	40.9	-0.1930	3.1054	3.0
10	800	-	-	-	-	-	311.1	29.7	-0.2106	4.4056	-
11	900	353.3	29.9	0.1470	4.5101	3.0	319.4	21.8	-0.0515	4.8659	3.5
12	1000	-	-	-	-	-	330.0	20.7	-0.1313	4.4406	-
13	1200	-	-	-	-	-	364.4	18.0	0.2615	3.4652	3.0
14	1400	-	-	-	-	-	394.2	16.3	0.1667	3.5260	-
15	1600	401.2	14.3	-0.0029	3.3290	0.0	404.3	13.3	-0.0673	4.3196	0.0
16	1800	-	-	-	-	-	409.2	10.1	0.0212	3.1657	-
17	2000	-	-	-	-	-	415.6	8.0	-0.0893	3.0936	-
18	2400	-	-	-	-	-	421.3	7.1	-0.0980	3.0750	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	432.2	5.6	-0.0240	2.8721	-	427.5	5.7	-0.0170	3.1745	-

Annexes 01 à 06 (Ft=3,1)

Annexes 3		Coquille $\alpha = 15^\circ$					Coquille $\alpha = 15^\circ$				
		Fr = 3,1		Cf = -64 mm			Fr =		Cf = -96 mm		
		Frr = 4,9		Ls = 550 mm			Frr =		Ls = 450 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	600	-	-	-	-	-	199.9	134.8	-0.1026	2.4333	2.5
9	700	331.1	26.8	-0.1538	2.9199	3.0	304.6	73.0	-0.7521	4.1580	-
10	800	317.6	27.5	-0.2471	3.3112	-	323.6	42.9	-0.3533	3.8006	-
11	900	314.9	19.3	-0.1876	3.4075	1.0	339.2	35.3	-0.2227	4.8561	2.5
12	1000	320.4	15.9	-0.0772	3.6337	-	355.9	32.3	-0.1829	4.1824	-
13	1200	337.6	17.4	0.0161	3.3873	0.0	376.8	26.7	-0.3041	5.3872	2.0
14	1400	377.2	17.6	0.0381	3.5530	-	391.4	20.5	-0.2976	4.6152	-
15	1600	397.0	16.5	-0.1151	3.6411	0.0	399.2	16.4	-0.5289	6.2009	0.0
16	1800	408.8	12.3	0.0867	3.2614	-	405.3	13.1	-0.1377	3.6307	-
17	2000	414.9	9.2	0.0719	3.4368	-	410.2	11.6	-0.4980	4.2973	0.0
18	2400	420.3	7.4	-0.0580	3.2892	-	410.8	10.8	-0.3606	3.5371	-
19	2800	422.7	6.5	-0.0190	3.1345	-	418.2	8.2	-0.3887	4.2224	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	426.8	5.4	-0.0913	3.0233	-	424.1	5.8	0.0154	3.0220	-

Annexes 01 à 06 (Ft=3,1)

Annexes 4		Coquille $\alpha = 15^\circ$					Coquille $\alpha = 15^\circ$				
		Fr = 3,1		Cf = -96 mm			Fr = 3,1		Cf = -96 mm 0		
		Frr = 4,9		Ls = 550 mm			Frr = 4,9		Ls = 650 mm 0		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad	k	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad	k	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	700	203.2	72.9	-0.0519	3.6671	2.0	-	-	-	-	-
10	800	279.0	96.1	0.0139	3.1607	-	341.9	24.5	-0.1919	2.8232	1.5
11	900	369.0	60.4	-0.1511	3.5380	2.5	328.9	22.2	-0.2290	3.4350	-
12	1000	394.2	40.5	-0.0908	3.4852	-	328.5	18.7	-0.2700	3.9713	-
13	1200	410.5	22.0	-0.1444	4.3525	2.0	340.9	15.9	0.1412	3.8850	3.5
14	1400	418.8	15.3	-0.4196	5.1804	-	369.8	15.2	0.0979	3.8134	-
15	1600	12.0	11.4	-0.4402	4.1953	0.0	391.7	14.1	0.0156	3.3273	0.0
16	1800	430.1	9.0	-0.6889	5.6881	-	404.9	11.0	-0.0539	3.2289	-
17	2000	430.0	7.7	-0.3461	3.6635	-	410.3	8.4	0.0498	2.8464	-
18	2400	440.6	6.4	-0.1454	3.3188	-	417.7	7.3	-0.0678	3.2203	-
19	2800	440.5	5.6	0.0884	3.3227	-	422.0	6.0	-0.1326	3.1239	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	436.2	4.9	0.0080	2.9671	-	423.6	5.4	-0.0320	3.2109	-

Annexes 01 à 06 (Ft=3,1)

Annexes 5		Coquille $\alpha = 15^\circ$					Coquille $\alpha = 30^\circ$				
		Fr = 3,1		Cf = -96 mm			Fr = 3,1		Cf = -32 mm		
		Frr = 4,9		Ls = 750 mm			Frr = 4,9		Ls = 250 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	309.8	23.8	-0.1514	2.8100	-
7	500	-	-	-	-	-	303.2	22.4	-0.1260	2.8520	2.0
8	600	-	-	-	-	-	284.8	19.0	0.1780	3.1410	-
9	700	-	-	-	-	-	260.1	19.8	-0.0090	3.0400	-
10	800	-	-	-	-	-	263.2	22.4	0.1940	3.5700	-
11	900	377.9	16.7	-0.1834	3.1780	3.0	308.4	26.7	0.3940	4.3600	1.5
12	1000	378.2	15.8	-0.2723	3.3799	-	363.6	33.5	0.4930	3.7140	-
13	1200	374.8	12.9	-0.2168	3.7073	3.5	409.4	33.0	0.3290	3.2140	2.5
14	1400	391.2	13.6	-0.0766	2.9690	-	403.1	22.4	0.2870	3.5940	-
15	1600	416.2	13.7	-0.1535	3.9219	0.0	399.9	13.3	0.1170	3.6630	0.5
16	1800	430.3	11.7	-0.1048	5.2013	-	404.4	9.0	-0.1820	3.6960	-
17	2000	436.0	9.2	0.1341	3.5411	-	410.5	7.1	-0.3490	4.2790	0.0
18	2400	444.2	7.3	0.0805	2.9230	-	421.7	5.5	-0.0740	3.2270	-
19	2800	-	-	-	-	-	424.7	5.0	-0.1660	3.5400	-
20	3200	449.7	6.2	0.1621	3.0737	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	450.0	5.8	-0.0157	3.0204	-	424.2	3.4	0.1070	3.3880	-

Annexes 01 à 06 (Ft=3,1)

Annexes 6		Coquille $\alpha = 30^\circ$					Coquille $\alpha = 30^\circ$				
		Fr = 3,1		Cf = -32 mm mm			Fr = 3,1		Cf = -32 mm		
		Frr = 4,9		Ls = 300 mm mm			Frr = 4,9		Ls = 350 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	308.3	19.7	-0.1408	2.7880	-	-	-	-	-	-
7	500	305.7	20.8	-0.173	2.8540	2.5	306.2	18.0	-0.0277	3.0450	3.0
8	600	297.0	18.4	0.158	3.4300		299.7	16.6	-0.0070	3.0850	-
9	700	265.9	18.2	0.016	3.3700	0.0	280.6	15.3	0.0069	3.2600	0.0
10	800	255.1	20.1	0.18	3.2470	-	259.1	17.7	-0.1161	3.3340	-
11	900	286.5	25.4	0.402	3.9440	0.0	276.8	22.7	0.2530	3.4450	0.0
12	1000	344.2	32.8	0.5016	3.5670	-	319.3	29.2	0.6206	4.7860	-
13	1200	411.1	33.8	0.42	3.7180	2.0	396.7	33.4	0.3880	3.3510	2.0
14	1400	405.3	24.5	0.309	3.3190	-	405.0	26.5	0.3550	3.2360	-
15	1600	400.6	14.5	-	-	2.0	395.1	17.1	0.2260	3.8040	2.0
16	1800	405.6	9.8	-0.118	3.3270	-	400.0	10.6	0.1000	3.7030	-
17	2000	411.1	7.4	-0.105	3.1360	0.0	408.6	7.1	-0.0290	3.2780	0.0
18	2400	421.1	5.7	-0.373	4.1870	-	418.7	5.7	-0.2135	3.6140	-
19	2800	425.3	5.1	-0.202	3.7740	-	424.7	5.0	-0.3610	3.8440	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	425.2	3.6	0.177	3.310	-	425.9	4.3	0.0150	3.4560	-

Annexes 07 à 12 (Ft=3,1)

Annexes 7		Bassin $\alpha = 30^\circ$					Coquille $\alpha = 30^\circ$				
		Fr = 3,1		Cf = -64 mm			Fr = 3,1		Cf = -64 mm		
		Frr = 4,9		Ls = 250 mm			Frr = 4,9		Ls = 300 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	12.0	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	12.0	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	12.0	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	12.0	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	12.0	-	-	-	-
6	400	319.2	30.0	-0.2250	3.0110	-	319.7	21.1	-0.0640	3.0550	-
7	500	313.1	27.4	-0.0930	3.0390	2.0	315.9	25.8	-0.1190	2.7770	2.5
8	600	300.0	23.5	0.1040	3.3750	-	306.9	21.9	-0.0040	3.0380	-
9	700	277.6	20.8	0.1480	3.0990	-	283.0	19.9	0.0207	3.1054	2.5
10	800	271.8	22.5	0.1140	3.2781	-	266.6	21.1	0.0868	3.0777	-
11	900	301.4	27.1	0.3700	3.5800	1.5	289.3	27.1	0.3705	3.5870	3.0
12	1000	351.8	32.7	0.4577	3.8300	-	339.2	31.7	0.8220	3.9578	-
13	1200	413.1	33.2	0.2930	3.2519	2.5	408.4	32.4	0.3720	5.7795	1.5
14	1400	413.3	23.9	0.2550	3.2306	-	414.0	24.3	0.4380	3.3410	-
15	1600	407.5	15.1	0.2070	3.6390	0.5	408.5	15.6	0.4380	4.1754	0.0
16	1800	411.8	9.2	0.0950	3.4020	-	411.1	9.9	0.1050	3.8030	-
17	2000	417.2	6.4	-0.0800	3.5850	0.0	415.7	7.3	-0.1670	3.6760	-
18	2400	424.7	4.9	-0.0732	3.2150	-	425.6	5.4	-0.0800	3.5029	-
19	2800	429.2	4.5	-0.1050	3.0740	-	428.6	4.6	-0.0450	3.1929	-
20	3200	12.0	-	-	-	-	12.0	-	-	-	-
21	3600	12.0	-	-	-	-	12.0	-	-	-	-
22	4000	428.5	4.2	0.0500	2.9960	-	428.8	4.3	0.0980	3.2107	-

Annexes 07 à 12 (Ft=3,1)

Annexes 8		Coquille $\alpha = 30^\circ$					Coquille $\alpha = 30^\circ$				
		Fr = 3,1		Cf = -64 mm			Fr = 3,1		Cf = -64 mm		
		Frr = 4,9		Ls = 350 mm			Frr = 4,9		Ls = 450 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	311.3	20.5	-0,157	3.0390	3.0	-	-	-	-	-
8	600	307.6	21.0	-0,0248	2.8820	-	330.6	19.1	0.0658	2.8033	-
9	700	293.5	18.8	0,018	3.2390	2.0	322.8	18.8	-0.1448	3.1840	1.5
10	800	272.0	19.8	-0,073	3.2740	-	298.3	18.1	-0.0826	3.0040	-
11	900	278.9	22.3	0,185	3.4560	1.5	12.0	18.3	-0.1631	3.6078	2.5
12	1000	324.7	28.2	0,356	3.7150	-	307.0	21.0	0.4187	3.7111	-
13	1200	403.3	32.3	0,426	3.4680	2.5	387.8	27.5	0.0426	3.9983	2.5
14	1400	410.1	25.0	0,269	3.6390	-	417.8	26.1	0.0339	3.5060	-
15	1600	404.5	26.2	0,243	3.2960	0.0	413.9	17.9	0.0175	3.3315	0.0
16	1800	406.1	10.3	0,119	3.4080	-	417.9	11.7	0.1262	3.5330	-
17	2000	412.3	7.5	-0,065	3.5540	-	420.5	8.4	-0.2530	4.6540	-
18	2400	422.9	5.3	-0,187	3.7610	-	430.5	5.4	-0.1349	3.4490	-
19	2800	425.7	4.4	-0,033	3.4950	-	435.6	4.7	-0.0072	3.3090	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	427.1	4.3	0,033	3.3990	-	433.6	4.6	0.0661	3.0124	-

Annexes 07 à 12 (Ft=3,1)

Annexes 9		Coquille $\alpha = 30^\circ$					Coquille $\alpha = 30^\circ$				
		Fr = 3,1		Cf = -96 mm			Fr = 3,1		Cf = -96 mm		
		Frr = 4,9		Ls = 300 mm			Frr = 4,9		Ls = 350 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	318.7	32.0	-0.2600	3.2213	3.0	323.7	21.1	-0.2125	3.0100	2.5
8	600	311.9	25.0	-0.7830	3.0114	-	317.3	23.4	-0.0385	3.2005	-
9	700	294.3	23.6	-0.0178	3.1026	3.5	306.7	21.4	-0.1476	3.0482	2.0
10	800	274.6	22.3	-0.0813	3.0364	-	275.6	22.7	0.0302	3.1397	-
11	900	282.7	25.5	0.1045	3.4022	3.0	-	-	-	-	-
12	1000	322.5	30.3	0.3687	4.1639	-	310.1	29.2	0.4131	3.9690	-
13	1200	401.5	35.2	0.4290	3.3113	3.0	398.1	34.6	0.3973	3.5203	1.5
14	1400	416.8	27.9	0.2515	3.4535	-	416.2	27.9	0.3244	3.5221	-
15	1600	412.5	17.8	0.1530	3.4220	0.0	409.0	17.7	0.4132	3.7316	0.0
16	1800	420.1	11.8	0.3839	4.6506	-	413.6	11.3	0.0725	3.4483	-
17	2000	421.7	7.5	-0.0978	3.4288	-	417.3	7.9	-0.0606	3.5375	-
18	2400	432.6	4.9	0.0254	3.1312	-	426.2	5.6	-0.1478	3.4079	-
19	2800	431.3	4.8	0.0287	3.1889	-	431.1	4.7	-0.1666	3.9349	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	431.2	4.4	-0.0900	3.0121	-	431.0	4.8	0.0347	3.0490	-

Annexes 07 à 12 (Ft=3,1)

Annexes 10		Coquille $\alpha = 30^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 3,1		Cf = -96 mm			Fr = 3,1		Cf = 0 mm		
		Frr = 4,9		Ls = 450 mm			Frr = 4,9		Ls = 250 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	309.3	17.0	0.1045	2.7590	3.0
6	400	-	-	-	-	-	307.7	17.2	-0.1928	3.1620	-
7	500	-	-	-	-	-	303.4	16.6	0.0539	3.1820	0.0
8	600	343.8	19.1	0.0658	2.8033	-	273.0	18.0	0.1681	3.1150	-
9	700	338.9	18.6	-0.1448	2.9080	1.5	264.5	20.3	0.1327	3.6120	0.0
10	800	321.0	18.1	-0.0826	3.0040	-	291.0	25.7	0.2954	3.4260	-
11	900	311.4	18.3	-0.1631	3.6078	1.0	339.6	34.8	0.3017	4.4790	2.0
12	1000	303.8	21.0	0.1887	3.5704	-	382.4	39.4	0.4553	3.5420	-
13	1200	377.4	27.5	0.0426	3.9983	2.5	409.7	37.1	0.3316	3.1540	2.0
14	1400	419.4	26.1	0.0339	3.5060	-	399.3	24.3	0.4082	3.8370	-
15	1600	418.7	17.9	0.0175	3.3315	0.0	397.4	15.1	0.1833	3.4330	0.0
16	1800	422.1	11.7	0.1262	3.5330	-	404.3	10.1	-0.7029	3.2590	-
17	2000	423.6	8.4	-0.2530	4.6540	-	411.5	7.0	-0.3118	3.0780	-
18	2400	434.8	5.4	-0.1349	3.4490	-	-	-	-	-	-
19	2800	440.1	4.7	-0.0072	3.3090	-	426.0	4.9	-0.2090	3.4810	-
20	3200	-	-	-	-	-	427.4	4.6	-0.2327	3.8161	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	436.1	4.6	0.0661	3.0124	-	426.7	4.1	0.0562	3.5010	-

Annexes 07 à 12 (Ft=3,1)

Annexes 11		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 3,1		Cf = 0 mm			Fr = 3,1		Cf = 0 mm		
		Frr = 4,9		Ls = 300 mm			Frr = 4,9		Ls = 350 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	318.4	17.0	-0.2135	3.6847	-	317.3	18.0	0.1147	3.3346	-
7	500	316.7	18.0	-0.1261	3.4440	0.0	315.3	18.2	0.0232	2.8400	2.0
8	600	296.7	19.2	0.1221	2.9256	-	306.1	19.2	0.1613	2.9798	-
9	700	285.3	21.7	0.1775	3.1739	2.0	291.4	20.6	0.0391	2.9820	2.0
10	800	301.9	27.7	0.1699	2.9687	-	297.4	26.4	0.2352	3.0207	-
11	900	339.9	36.7	0.3870	3.1011	2.0	324.2	32.2	0.3494	3.1655	2.0
12	1000	377.7	40.4	0.5199	3.5972	2.0	357.0	38.9	0.4109	3.4435	-
13	1200	407.7	41.4	0.3279	3.1548	2.0	399.0	39.2	0.3812	3.5810	2.5
14	1400	404.9	28.6	0.2363	3.0144	-	400.8	27.5	0.1673	2.9854	-
15	1600	402.3	17.0	0.1833	3.4780	2.0	398.8	17.0	0.1384	3.3147	3.0
16	1800	405.2	6.9	-0.2967	3.7041	0.0	402.2	10.7	0.0798	3.4947	-
17	2000	412.6	7.8	-0.2043	3.7043	-	410.1	7.8	-0.2741	3.6212	0.0
18	2400	424.2	5.9	-0.1202	3.2557	-	422.7	5.6	-0.1142	3.2064	-
19	2800	429.3	4.1	-0.2446	3.6735	-	426.4	4.9	-0.1505	3.3215	-
20	3200	431.4	4.5	-0.0178	3.3459	-	433.8	4.5	0.0242	3.2897	-
21	3600	438.4	4.0	0.0526	2.9800	-	430.4	3.9	0.1227	3.2520	-
22	4000	429.9	3.8	0.0797	3.1074	-	426.4	4.3	0.0056	3.1236	-

Annexes 07 à 12 (Ft=3,1)

Annexes 12		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 3,1		Cf = -32 mm mm			Fr = 3,1		Cf = -32 mm mm		
		Frr = 4,9		Ls = 250 mm mm			Frr = 4,9		Ls = 300 mm mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	330.4	18.0	-0.0230	2.7590	3.0	-	-	-	-	-
6	400	322.8	22.2	-0.1010	3.1620	-	311.2	17.8	0.0010	2.9427	-
7	500	317.7	19.9	-0.0570	3.1820	2.5	309.5	18.2	-0.1490	4.2390	2.5
8	600	291.7	17.7	0.0880	3.1150	-	299.0	18.1	0.1500	3.0170	-
9	700	277.6	19.0	0.3300	3.6120	0.0	282.8	20.6	0.1490	3.1670	1.5
10	800	291.8	26.6	0.3330	3.4260	-	294.7	27.9	0.2680	3.1010	-
11	900	335.7	31.5	0.5489	4.4790	1.5	324.9	34.9	0.5200	3.6300	1.5
12	1000	382.9	37.2	0.3930	3.5420	-	361.5	39.6	0.5940	3.8160	-
13	1200	418.1	37.4	0.2300	3.1540	1.5	402.4	42.0	0.3210	3.1220	2.0
14	1400	406.3	24.9	0.3920	3.8370	-	393.4	28.8	0.3940	3.4450	-
15	1600	402.6	15.6	0.1860	3.4330	0.0	390.2	16.7	0.2430	3.4210	2.0
16	1800	407.0	10.2	0.0080	3.2590	-	397.6	10.4	0.0890	3.4990	-
17	2000	412.1	8.0	-0.0460	3.0780	-	402.8	7.8	-0.2220	3.5350	0.0
18	2400	423.6	6.9	-0.0020	3.2260	-	412.9	5.7	-0.1950	3.6010	-
19	2800	426.1	5.8	-0.1490	3.4810	-	417.4	5.1	-0.0220	3.0520	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	428.3	4.5	0.1120	3.5010	-	418.0	4.3	-0.0350	3.3570	-

Annexes 13 à 18 (Ft=3,1)

Annexes 13		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 3.1		Cf = -32 mm			Fr = 3.1		Cf = -64 mm		
		Frr = 4.9		Ls = 350 mm			Frr = 4.9		Ls = 250 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	319.9	23.1	-0.1116	2.9660	-
7	500	320.7	19.8	0.0860	2.9200	1.5	314.1	20.5	0.0860	2.8460	2.5
8	600	314.3	18.9	0.1764	3.0920	-	299.9	21.0	0.1060	3.1210	-
9	700	293.9	21.5	0.2211	3.1970	1.5	275.4	21.3	0.0790	3.2550	0.0
10	800	291.9	26.5	0.2888	3.0900	-	280.7	26.0	0.1480	3.2020	-
11	900	319.0	31.5	0.3690	3.2840	2.0	318.7	34.5	0.4580	3.5450	1.5
12	1000	351.5	39.1	0.5275	3.4727	-	368.7	41.8	0.5230	3.4140	-
13	1200	403.8	42.2	0.3604	3.2510	2.0	416.3	43.3	0.3760	3.2930	1.5
14	1400	402.9	31.1	0.3236	3.3150	-	406.9	30.9	0.3960	3.5400	-
15	1600	398.4	18.3	0.3082	3.4984	0.0	403.0	18.0	0.3330	3.7380	0.0
16	1800	402.7	11.0	0.0445	3.3570	-	407.5	10.6	0.2190	3.5020	-
17	2000	408.8	8.1	-0.3290	4.1490	-	410.3	8.1	-0.0890	3.3070	-
18	2400	419.0	5.8	-0.3161	3.6870	-	420.7	5.7	-0.0730	3.1750	-
19	2800	424.0	4.8	-0.1923	3.5470	-	425.6	5.4	-0.0720	3.1080	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	424.3	4.1	0.0530	3.3200	-	426.6	4.8	0.0606	3.1480	-

Annexes 13 à 18 (Ft=3,1)

Annexes 14		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 3.1		Cf = -64 mm			Fr = 3.1		Cf = -64 mm		
		Frr = 4.9		Ls = 300 mm			Frr = 4.9		Ls = 350 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	328.5	16.2	0.0050	3.0890	-	-	-	-	-	-
7	500	327.8	17.9	-0.1610	3.6280	2.0	327.8	17.7	-0.0440	2.9070	1.5
8	600	319.3	18.4	0.0028	3.2410	-	324.1	18.8	0.0190	3.0890	-
9	700	289.8	20.8	0.1410	3.1680	2.5	303.4	20.3	0.1770	3.1630	3.5
10	800	290.8	27.5	0.3310	3.0808	-	291.7	24.6	0.1250	3.1090	-
11	900	323.1	35.5	0.5080	3.4870	3.0	313.0	31.3	0.3150	3.3640	2.5
12	1000	369.0	41.5	0.5170	3.4950	-	352.1	38.3	0.5410	3.5990	-
13	1200	419.0	47.1	0.4160	3.2320	2.0	412.1	44.0	0.3610	3.2660	3.0
14	1400	411.9	34.2	0.4220	3.5400	-	414.7	33.8	0.3590	3.6120	-
15	1600	406.1	20.0	0.3290	3.9310	0.5	405.9	20.3	0.3004	3.6250	0.0
16	1800	410.2	11.7	0.1320	3.6520	-	408.7	12.5	0.0720	3.4100	-
17	2000	415.9	8.5	-0.1920	3.8160	-	415.8	8.2	-0.0577	3.2430	-
18	2400	425.8	5.8	-0.1370	3.4010	-	424.3	6.0	-0.1710	3.5220	-
19	2800	429.6	5.5	0.0002	3.1380	-	430.5	5.3	-0.1680	3.6870	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	431.1	4.5	0.0358	2.9330	-	431.7	4.8	-0.0210	3.1650	-

Annexes 13 à 18 (Ft=3,1)

Annexes 15		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 3.1		Cf = -96 mm			Fr = 3.1		Cf = -96 mm		
		Frr = 4.9		Ls = 250 mm			Frr = 4.9		Ls = 300 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	329.6	30.0	-0.1700	3.1382	-	-	-	-	-	-
7	500	322.0	25.5	-0.0019	2.9668	2.5	325.4	16.7	-0.0494	3.1095	1.0
8	600	310.4	23.1	0.0405	3.3975	-	320.5	18.1	0.0643	2.8667	-
9	700	272.5	26.0	0.1711	3.1625	1.5	295.2	18.6	0.0560	3.2026	1.5
10	800	272.4	27.5	0.0549	3.3645	-	277.7	24.8	0.1001	2.7490	-
11	900	308.4	31.0	0.3119	3.2442	3.0	304.9	32.5	0.4087	3.8797	3.0
12	1000	354.1	38.0	0.4742	3.8049	-	352.4	39.2	0.4494	3.3310	-
13	1200	421.2	42.8	0.4025	3.4729	2.5	413.1	45.0	0.4196	3.4745	3.5
14	1400	418.8	34.2	0.1771	3.2330	-	410.3	36.3	0.4150	3.3261	-
15	1600	411.3	20.7	0.4257	3.8540	1.0	405.2	21.3	0.4110	3.6720	0.0
16	1800	413.9	12.3	0.0088	3.6020	-	408.4	13.0	0.2039	3.6128	-
17	2000	421.7	8.7	-0.2396	8.2136	0.0	418.1	9.1	-0.0151	3.4053	-
18	2400	427.9	6.5	-0.1514	3.2684	-	423.2	6.3	-0.0553	3.1411	-
19	2800	431.3	5.4	-0.0227	3.0968	-	426.9	5.6	-0.1562	3.2815	-
20	3200	-	-	-	-	-	429.9	5.3	-0.1590	3.3077	-
21	3600	-	-	-	-	-	429.0	5.2	-0.0369	3.3139	-
22	4000	431.3	5.5	-0.0227	3.1069	-	432.1	5.0	-0.0158	3.1162	-

Annexes 15a (Ft=3.1)

Annexes 15a		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = -$				
		Fr = 3.1		Cf = -96 mm			Fr = -		Cf = -		
		Frr = 4.9		Ls = 350 mm			Frr = -		Ls = -		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	327.8	16.6	0.0393	2.9573	1.0	-	-	-	-	-
8	600	323.7	18.2	-0.2057	3.5976	-	-	-	-	-	-
9	700	307.2	18.4	0.1141	3.1313	2.0	-	-	-	-	-
10	800	285.7	22.9	0.1176	3.1610	-	-	-	-	-	-
11	900	299.9	31.4	0.2848	3.2555	2.5	-	-	-	-	-
12	1000	340.2	37.5	0.4873	3.7050	-	-	-	-	-	-
13	1200	410.9	44.2	0.4672	3.3599	3.0	-	-	-	-	-
14	1400	411.9	37.0	0.3407	3.1911	-	-	-	-	-	-
15	1600	406.6	22.8	0.4623	3.7517	0.0	-	-	-	-	-
16	1800	409.7	13.4	0.1893	3.6159	-	-	-	-	-	-
17	2000	414.4	8.9	-0.0537	3.5740	-	-	-	-	-	-
18	2400	424.0	6.5	-0.2557	3.4577	-	-	-	-	-	-
19	2800	429.6	5.2	-0.0138	3.2185	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	429.9	4.7	-0.0246	3.0700	-	-	-	-	-	-

Annexes 13 à 18 (Ft=3,1)

Annexes 16		Bassin $\alpha = 0^\circ$					Coquille $\alpha = 15^\circ$				
		Fr = 3.6		Cf = 0 mm			Fr = 3.6		Cf = -64 mm 0.0		
		Frr = 5.4		Ls = -			Frr = 5.4		Ls = 350 mm 0.0		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	133.9	31.1	1.6003	8.2042	4.0	-	-	-	-	-
2	100	113.9	34.7	1.5556	6.9541	4.0	-	-	-	-	-
3	150	126.1	49.8	1.1966	5.2454	4.0	-	-	-	-	-
4	200	147.3	50.9	1.0788	4.8826	3.5	-	-	-	-	-
5	300	152.9	58.4	0.9488	4.4287	3.0	-	-	-	-	-
6	400	182.5	58.6	0.8255	4.1892	2.5	-	-	-	-	-
7	500	194.1	56.4	0.6692	3.9637	2.0	198.7	138.7	-0.0705	2.6210	3.5
8	600	214.2	55.1	0.5946	4.1780	1.5	291.5	60.2	-0.2273	3.2343	-
9	700	223.1	49.3	0.4428	4.4270	1.5	303.2	36.2	0.0172	3.9308	2.0
10	800	246.6	41.6	0.3217	4.0951	1.0	-	-	-	-	-
11	900	268.0	43.6	0.1089	4.4616	4.0	326.4	24.4	-0.4022	7.4934	2.0
12	1000	283.8	40.5	0.2283	4.8195	4.0	-	-	-	-	-
13	1200	306.0	34.0	0.1120	4.0764	3.5	-	-	-	-	-
14	1400	325.6	24.4	-0.1598	4.4741	0.0	-	-	-	-	-
15	1600	340.2	18.5	-0.0146	3.9230	0.0	362.1	9.8	-0.2966	3.9863	0.5
16	1800	351.7	15.4	-0.2502	4.1163	0.0	-	-	-	-	-
17	2000	360.2	12.2	-0.3717	4.2826	-	-	-	-	-	-
18	2400	368.6	8.4	-0.4043	3.7221	-	-	-	-	-	-
19	2800	373.3	6.3	-0.0276	3.0694	-	-	-	-	-	-
20	3200	374.1	6.3	-0.5147	6.6353	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	373.7	5.9	0.0619	2.8665	-	374.5	4.4	-0.0612	3.1811	-

Annexes 13 à 18 (Ft=3,1)

Annexes 17		Coquille $\alpha = 15^\circ$					Coquille $\alpha = 15^\circ$				
		Fr = 3.6		Cf = -64 mm			Fr = 3.6		Cf = -96 mm		
		Frr = 5.4		Ls = 450 mm			Frr = 5.4		Ls = 450 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad	k	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad	k	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	600	290.6	39.3	-0.2665	3.1570	-	229.8	90.9	-0.3292	2.9273	-
9	700	288.4	25.7	0.1582	3.4755	3.0	278.1	50.9	-0.2364	3.7212	4.0
10	800	288.3	17.1	-0.3671	5.4070	-	313.2	28.8	0.0916	3.9610	-
11	900	296.0	15.4	0.2782	4.2176	3.5	328.9	26.3	-0.3570	5.1339	3.0
12	1000	305.5	14.9	-0.0208	3.6265	-	328.1	25.7	-0.3159	5.5909	-
13	1200	338.9	14.1	0.0473	4.4022	2.0	344.4	17.9	-0.1786	4.3062	3.5
14	1400	355.2	12.0	0.0496	3.4387	-	355.4	14.2	-0.1805	4.2054	-
15	1600	361.5	8.4	0.0779	3.3753	0.0	360.5	11.3	-0.5705	4.5452	0.5
16	1800	364.9	6.6	0.0016	3.0394	-	364.3	9.0	-0.4814	4.8597	-
17	2000	368.1	6.2	-0.0589	3.0963	-	370.1	7.3	-0.3720	4.4077	0.0
18	2400	372.3	5.4	0.1024	3.0956	-	371.8	5.7	0.0895	3.1014	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	378.1	5.0	-0.0416	3.1731	-	344.5	5.1	0.0858	3.1724	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	375.9	4.9	-0.0691	3.2282	-	373.0	361.0	0.0704	3.1263	-

Annexes 13 à 18 (Ft=3,1)

Annexes 18		Coquille $\alpha = 15^\circ$					Coquille $\alpha = 15^\circ$				
		Fr = 3.6		Cf = -96 mm			Fr = 3.6		Cf = -96 mm		
		Frr = 5.4		Ls = 550 mm			Frr = 5.4		Ls = 650 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	700	303.7	36.4	-0.3618	3.4433	3.0	-	-	-	-	-
10	800	297.2	28.8	-0.2778	3.8706	-	313.1	19.9	-0.1526	2.9966	1.0
11	900	301.0	17.4	-0.0870	3.3796	3.5	304.6	15.6	-0.2081	3.7085	2.0
12	1000	306.0	13.4	0.2231	3.5964	-	303.1	13.2	-0.0917	3.6798	-
13	1200	333.5	14.4	-0.0453	3.2312	3.0	317.9	12.6	-0.1743	3.5098	3.5
14	1400	350.7	11.5	0.0642	3.4777	-	342.3	11.9	0.1246	3.9785	-
15	1600	360.7	9.9	-0.0264	3.8972	0.0	355.7	10.5	0.1333	3.8670	0.0
16	1800	365.2	7.4	0.0910	3.0880	-	360.2	7.8	-0.1296	3.0695	-
17	2000	368.0	6.7	0.0266	3.0224	-	364.6	6.6	-0.0489	2.9928	-
18	2400	373.6	6.1	-0.0398	3.0502	-	371.7	5.8	-0.0106	3.0744	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	376.2	5.2	0.0439	3.1196	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	377.6	5.0	0.1386	3.0312	-	376.3	5.3	-0.0658	3.1954	-

Annexes 19 à 24 (Ft=3,6)

Annexes 19		Coquille $\alpha = 15^\circ$					Coquille $\alpha = 30^\circ$				
		Fr = 3.6		Cf = -96 mm			Fr = 3.6		Cf = -32 mm		
		Frr = 5.4		Ls = 750 mm			Frr = 5.4		Ls = 250 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	276.4	22.6	-0.1440	2.7940	-
7	500	-	-	-	-	-	269.4	21.1	-0.1210	2.8930	2.5
8	600	-	-	-	-	-	242.3	16.8	0.0980	3.0700	-
9	700	-	-	-	-	-	231.0	18.2	0.1020	3.2240	0.0
10	800	-	-	-	-	-	264.8	22.8	0.4180	4.1250	-
11	900	334.3	12.1	-0.1988	3.1462	0.0	319.9	27.5	0.5600	4.0530	0.0
12	1000	328.2	10.7	-0.2122	3.0090	-	355.9	30.6	0.3940	3.4860	-
13	1200	332.6	10.3	-0.0670	3.3106	1.0	362.1	21.8	0.2720	3.4830	2.0
14	1400	346.6	11.4	0.1223	3.9670	-	355.4	12.5	0.1780	3.4630	-
15	1600	361.1	10.2	-0.0943	3.2105	0.0	360.8	7.6	-0.0550	3.1950	0.0
16	1800	367.0	7.9	-0.3621	4.9163	-	366.5	5.9	-0.0280	3.3740	-
17	2000	371.9	6.9	0.0326	3.0192	-	371.2	5.0	-0.2330	3.8720	-
18	2400	379.6	6.3	-0.0836	2.9727	-	374.8	4.8	-0.0630	3.3130	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	384.2	5.2	0.0143	3.0510	-	376.6	4.1	0.0260	3.1360	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	382.5	5.2	-0.0346	3.1264	-	374.7	3.8	0.0640	3.0990	-

Annexes 19 à 24 (Ft=3,6)

Annexes 20		Coquille $\alpha = 30^\circ$					Coquille $\alpha = 30^\circ$				
		Fr = 3.6		Cf = -32 mm			Fr = 3.6		Cf = -64 mm		
		Frr = 5.4		Ls = 300 mm			Frr = 5.4		Ls = 250 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	272.0	16.7	-0.0880	3.1100	-	282.4	32.0	-0.2700	2.9950	-
7	500	270.3	17.8	-0.1670	3.4770	3.0	273.5	24.3	-0.0150	2.7610	1.0
8	600	252.3	16.0	0.0250	3.3470	-	254.0	19.6	0.1340	3.1710	-
9	700	228.6	15.7	0.1250	3.3420	0.0	239.4	18.5	0.1650	3.3380	1.5
10	800	244.1	19.8	0.2310	3.3620	-	259.3	22.4	0.2970	3.4160	-
11	900	294.4	26.2	0.5410	3.7530	0.0	309.7	27.1	0.4906	3.9300	0.0
12	1000	341.0	29.9	0.5450	4.1480	-	351.5	30.7	0.5330	3.6970	-
13	1200	362.5	24.2	0.2850	3.4700	2.0	358.7	23.6	0.2630	3.2080	1.5
14	1400	362.4	14.2	0.1870	3.4870	-	361.4	13.9	0.1790	3.4370	-
15	1600	357.2	8.7	0.0860	3.6190	0.0	362.3	8.2	-0.0310	3.3570	0.0
16	1800	365.0	6.4	-0.1200	3.5560	-	368.8	6.6	-0.1010	3.5070	-
17	2000	369.7	5.2	-0.3300	5.0460	-	372.9	5.4	-0.2850	3.6820	-
18	2400	374.8	4.3	-0.1130	4.1190	-	376.8	4.5	-0.1320	3.3230	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	377.4	3.6	-0.1590	3.5304	-	378.7	4.1	0.0390	3.0080	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	375.7	4.7	0.0700	2.7580	-	376.2	3.8	0.0290	3.1490	-

Annexes 19 à 24 (Ft=3,6)

Annexes 21		Coquille $\alpha = 30^\circ$					Coquille $\alpha = 30^\circ$				
		Fr = 3.6		Cf = -64 mm			Fr = 3.6		Cf = -64 mm		
		Frr = 5.4		Ls = 300 mm			Frr = 5.4		Ls = 350 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	279.6	21.6	-0.1019	2.9980	-	-	-	-	-	-
7	500	277.0	9.0	-0.2410	3.2910	2.0	279.8	18.4	-0.0090	2.8620	3.0
8	600	259.0	18.0	0.0970	3.1700	-	273.7	16.9000	-0.0810	3.6920	-
9	700	231.6	17.0	0.0245	3.1480	3.5	246.3	15.3	-0.0460	3.2870	2.5
10	800	237.9	20.3	0.1180	3.4140	-	239.2	16.7000	0.0640	3.3370	-
11	900	290.7	26.2	0.5580	3.9910	3.5	275.2	22.8	0.6310	4.7140	3.5
12	1000	341.5	29.5	0.5820	4.3550	-	327.0	26.8000	0.4880	3.7440	-
13	1200	362.0	22.5	0.2100	3.3240	1.5	364.3	24.3	0.3080	3.6580	2.0
14	1400	355.6	13.8	0.2440	3.5510	-	357.3	14.3000	0.2600	3.7820	-
15	1600	359.6	8.9	0.0390	4.4050	0.0	358.9	8.8	0.1520	3.5680	0.0
16	1800	365.0	6.0		3.3840	-	363.0	6.3	-0.0070	3.3520	-
17	2000	370.2	5.3	-0.0995	3.2960	-	367.8	5.2	-0.1330	3.7620	-
18	2400	373.2	4.4	0.0210	3.2690	-	373.5	4.5	-0.0740	3.3190	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	375.4	4.0	0.1280	3.5900	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	377.2	3.7	0.2339	3.2584	-	373.7	3.5	0.1370	3.2760	-

Αντικείμενα 19 α Ζ+ (i=0,6)

Annexes 22		Coquille $\alpha = 30^\circ$					Coquille $\alpha = 30^\circ$				
		Fr = 3.6		Cf = -64 mm			Fr = 3.6		Cf = -96 mm 0.0		
		Frr = 5.4		Ls = 450 mm			Frr = 5.4		Ls = 300 mm 0.0		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	-	-	-	-	-	281.2	31.8	-0.1937	2.8040	1.5
8	600	296.4	12.6	-0.0500	2.8251	-	270.9	22.5	-0.0497	3.0900	-
9	700	292.8	11.8	-0.2290	3.5726	0.0	245.3	18.9	0.1198	3.0023	3.0
10	800	284.6	11.7	0.0395	3.0803	-	239.9	20.4	0.0770	3.5633	-
11	900	278.2	14.2	0.0270	3.3587	2.0	276.3	24.5	0.4269	3.6167	3.0
12	1000	297.3	18.7	0.4260	3.8869	-	229.0	29.4	0.4205	3.5563	-
13	1200	360.2	23.2	0.4340	3.8086	1.5	367.9	26.7	0.2753	3.2842	1.0
14	1400	366.0	16.1	0.0926	3.4892	-	360.8	15.6	0.2531	3.9210	-
15	1600	364.4	9.8	0.2330	5.0920	0.0	361.4	9.1	0.1006	3.5838	0.0
16	1800	370.0	6.6	-0.1349	3.5630	-	366.9	6.6	-0.1318	3.1869	-
17	2000	374.7	5.4	-0.0840	3.4540	-	-	-	-	-	-
18	2400	381.7	4.0	-0.0141	3.2180	-	379.7	4.7	0.0496	3.0237	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	383.6	3.4	-0.0141	3.5250	-	376.7	4.4	-0.0022	-0.0221	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	381.2	3.6	0.1020	3.0264	-	374.4	4.1	0.1204	3.1453	-

Annexes 19 à 24 (Ft=3,6)

Annexes 23		Coquille $\alpha = 30^\circ$					Coquille $\alpha = 30^\circ$				
		Fr = 3.6		Cf = -96 mm			Fr = 3.6		Cf = -96 mm		
		Frr = 5.4		Ls = 350 mm			Frr = 5.4		Ls = 450 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad	k	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad	k	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	287.7	21.7	-0.0311	2.9103	3.0	-	-	-	-	-
8	600	279.3	20.6	-0.0270	2.8626	-	293.5	17.4	0.0100	2.7280	-
9	700	261.4	17.5	0.0213	3.0413	2.0	291.2	14.7	-0.3100	4.5500	2.0
10	800	245.0	17.8	0.0155	3.2262	-	280.6	13.3	-0.0450	3.0584	-
11	900	268.6	22.2	0.4759	4.3924	2.0	271.6	15.6	0.0300	3.3989	1.5
12	1000	315.9	27.0	0.4219	3.7418	-	292.2	19.2	0.4506	4.0960	-
13	1200	367.9	26.6	0.2530	3.1368	2.5	354.2	23.3	0.2698	3.4560	2.0
14	1400	362.9	16.4	0.2771	3.6665	-	366.9	17.0	0.3145	3.5693	-
15	1600	362.2	9.3	0.1022	3.3304	0.0	365.6	9.9	0.0165	3.3950	0.0
16	1800	366.9	6.9	0.0068	3.4085	-	369.0	6.8	0.0283	3.4540	-
17	2000	370.4	5.6	-0.1243	3.4541	-	374.2	5.3	-0.1598	3.3281	0.0
18	2400	381.1	4.6	-0.0922	3.2948	-	379.2	4.5	-0.0260	3.2508	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	374.3	4.7	0.0512	3.0521	-	378.8	4.2	0.1278	3.0388	-

Annexes 19 à 24 (Ft=3,6)

Annexes 24		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 3.6		Cf = 0 mm			Fr = 3.6		Cf = 0 mm		
		Frr = 5.4		Ls = 250 mm			Frr = 5.4		Ls = 300 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	282.0	16.4	-0.0002	2.8111	3.0	-	-	-	-	-
6	400	280.0	16.9	-0.1573	3.4377	-	221.0	16.1	-0.2730	3.8900	-
7	500	265.1	15.4	0.2094	3.2981	0.0	276.9	15.3	0.0982	3.2177	3.0
8	600	241.2	16.2	0.0739	3.1311	-	255.9	16.1	0.1326	3.2033	-
9	700	256.6	20.9	0.2738	3.3013	2.0	260.2	19.8	0.1321	3.0698	2.0
10	800	298.2	27.3	0.2951	3.3772	-	288.8	26.2	0.2844	2.8312	-
11	900	342.1	33.8	0.4380	3.4539	2.0	327.2	31.9	0.3591	3.1962	2.5
12	1000	366.7	36.3	0.3021	3.1978	-	353.7	34.6	0.3137	3.2924	-
13	1200	360.1	25.0	0.3636	3.5277	3.0	359.4	26.0	0.2817	3.4000	2.5
14	1400	353.7	14.5	-0.6000	3.5250	-	354.0	14.4	0.1505	3.3404	-
15	1600	361.2	8.0	-0.0557	3.5784	0.0	357.5	8.5	-0.1321	3.8445	0.0
16	1800	367.4	6.0	0.0576	3.2975	-	363.1	6.2	-0.1827	3.4531	-
17	2000	375.7	5.4	-0.1300	3.8630	-	371.1	5.1	-0.1200	3.6550	-
18	2400	377.1	4.1	-0.1091	3.6292	-	375.3	3.9	-0.0091	3.3236	-
19	2800	382.5	3.6	0.1620	2.9990	-	383.2	4.0	0.0830	3.4550	-
20	3200	378.9	3.4	0.0604	3.2019	-	-	-	-	-	-
21	3600	384.1	3.7	-0.0600	3.1640	-	381.9	2.8	0,145	3.2300	-
22	4000	377.2	3.1	0.2134	3.2680	-	376.0	3.0	0.2581	3.3179	-

Annexes 25 à 30 (Ft=3,6)

Annexes 25		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 3.6		Cf = 0 mm			Fr = 3.6		Cf = -32 mm		
		Frr = 5.4		Ls = 350 mm			Frr = 5.4		Ls = 250 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	289.4	16.8	-0.1290	2.9092	3.0
6	400	286.7	15.2	0.0503	3.2678	-	285.3	19.7	-0.0077	2.8994	-
7	500	284.3	14.1	0.0202	3.1051	3.0	279.3	18.2	0.1116	3.1358	2.5
8	600	271.2	15.4	0.0994	3.0449	-	249.8	17.2	0.0680	3.1806	-
9	700	268.2	18.0	0.0865	3.0863	2.0	254.8	19.9	0.3962	3.2681	1.5
10	800	281.6	23.0	0.2678	3.1151	-	291.7	26.3	0.2949	4.1612	-
11	900	309.1	28.2	0.2777	3.2531	2.5	337.8	30.5	0.3706	3.2496	0.0
12	1000	336.6	31.1	0.3039	3.3141	-	368.0	33.3	0.3832	3.1160	-
13	1200	357.4	25.5	0.2117	3.4176	3.0	360.4	23.4	0.2860	3.4004	2.0
14	1400	350.5	15.3	0.1693	3.5075	-	356.0	13.1	0.1333	3.3311	-
15	1600	354.7	9.2	-0.0671	3.6109	0.0	360.8	8.6	0.0168	3.6917	0.0
16	1800	362.8	5.9	-0.0787	3.2311	-	366.9	6.7	-0.1131	3.4164	-
17	2000	376.4	4.8	-0.2300	3.4630	-	371.2	6.2	-0.0051	3.6660	-
18	2400	373.2	3.9	-0.0082	3.4110	-	375.4	6.0	0.1026	3.1382	-
19	2800	382.8	4.1	-0.1800	3.2990	-	-	-	-	-	-
20	3200	376.4	3.7	0.1171	3.5067	-	378.3	4.8	0.0344	3.4018	-
21	3600	379.6	3.3	0.1250	3.2300	-	-	-	-	-	-
22	4000	373.6	3.4	0.0986	3.4063	-	376.1	4.2	0.0307	3.2727	-

Annexes 25 à 30 (Ft=3,6)

Annexes 26		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 3.6		Cf = -32 mm			Fr = 3.6		Cf = -32 mm		
		Frr = 5.4		Ls = 300 mm			Frr = 5.4		Ls = 350 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	287.9	16.8	0.0200	3.0470	-	-	-	-	-	-
7	500	286.2	17.7	-0.0800	3.2300	2.5	292.4	16.7	0.1120	2.9800	3.0
8	600	263.2	16.3	0.2000	3.2010	-	280.5	15.5	0.0500	3.1300	-
9	700	258.9	20.2	0.3190	3.4050	2.0	269.1	17.7	0.1130	3.0700	2.0
10	800	286.1	26.0	0.4190	3.3550	-	279.2	22.5	0.2650	3.2200	-
11	900	327.5	32.6	0.4690	3.3860	2.0	314.0	27.9	0.3770	3.3740	2.5
12	1000	354.2	35.2	0.4900	3.6230	-	346.8	33.0	0.4620	3.6450	-
13	1200	358.1	27.3	0.3290	3.3200	2.0	362.2	26.8	0.3420	3.5720	3.0
14	1400	351.0	14.4	0.1740	3.2890	-	354.3	15.1	0.1580	3.2420	-
15	1600	355.9	9.1	-0.0520	3.4940	0.0	358.4	9.0	0.0840	3.6780	0.0
16	1800	362.0	6.6	-0.3220	3.8160	-	365.5	6.2	-0.0740	3.8570	-
17	2000	367.1	5.7	-0.0920	4.8720	-	369.3	5.0	-0.3230	4.1500	-
18	2400	372.4	4.5	-0.0750	3.4870	-	375.4	4.2	-0.0980	3.4900	-
19	2800	374.4	4.1	-0.0820	3.5500	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	376.8	3.6	0.1030	3.1460	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	380.1	3.8	-0.0040	3.0080	-	376.9	3.5	0.0940	3.2300	-

Annexes 25 à 30 (Ft=3,6)

Annexes 27		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 3.6		Cf = -64 mm			Fr = 3.6		Cf = -64 mm		
		Frr = 5.4		Ls = 250 mm			Frr = 5.4		Ls = 300 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	285.2	22.7	-0.0850	2.6520	-	293.7	14.9	-0.0060	3.0120	-
7	500	277.9	19.4	-0.0061	2.8950	3.0	292.7	16.1	-0.0200	3.2204	2.5
8	600	252.1	18.5	0.0940	3.2640	-	276.8	16.7	0.1980	3.2360	-
9	700	245.2	20.7	0.1080	3.1050	1.5	261.0	19.3	0.0720	3.2240	1.5
10	800	274.6	27.4	0.5040	3.7180	-	279.2	26.1	0.4230	3.3710	-
11	900	326.4	33.0	0.3950	3.4000	0.0	322.9	31.3	0.4570	3.6260	2.0
12	1000	360.7	38.9	0.4840	3.4390	-	361.3	36.5	0.5630	4.0690	-
13	1200	364.1	27.6	0.3360	3.5430	1.5	366.7	30.0	0.4180	3.3440	2.0
14	1400	357.0	15.7	0.1890	3.6890	-	359.5	16.4	0.4220	3.7020	-
15	1600	359.4	9.4	-0.0070	3.3890	0.0	361.2	9.9	0.2660	3.8470	0.0
16	1800	365.3	6.8	-0.2180	3.7250	-	367.5	6.8	-0.1520	3.3550	-
17	2000	370.6	5.7	-0.2490	3.6080	-	371.7	5.7	-0.0590	3.4990	-
18	2400	374.5	4.9	-0.0790	3.0930	-	377.7	4.7	-0.1110	3.4610	-
19	2800	-	-	-	-	-	378.7	4.5	-0.2610	4.6680	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	375.9	4.5	0.0217	3.0380	-	378.0	4.0	0.1340	3.1770	-

Annexes 25 à 30 (Ft=3,6)

Annexes 28		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 3.6		Cf = -64 mm			Fr = 3.6		Cf = -96 mm		
		Frr = 5.4		Ls = 350 mm			Frr = 5.4		Ls = 250 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	290.0	31.6	-0.2697	3.1261	-
7	500	292.9	15.6	0.1045	2.8510	1.0	285.2	23.3	-0.1000	3.1908	2.5
8	600	285.4	16.7	0.0250	2.8460	-	264.0	19.4	0.2047	3.0821	-
9	700	262.7	18.3	0.1780	3.3400	1.5	245.8	20.8	0.1056	3.3205	2.0
10	800	271.4	22.3	0.3260	3.4240	-	263.0	25.4	0.5274	3.6181	-
11	900	308.4	29.5	0.4635	4.2860	1.5	313.6	32.7	0.5406	3.6114	2.0
12	1000	347.4	33.5	0.4070	3.4310	-	355.4	36.7	0.3969	3.4490	-
13	1200	364.3	27.2	0.3250	3.3600	2.0	368.8	28.7	0.1639	3.2075	3.5
14	1400	357.6	16.7	0.2840	3.4680	-	360.7	17.7	0.1831	3.5358	-
15	1600	360.2	9.9	0.0763	3.5550	0.0	362.4	10.3	0.2156	3.5333	0.0
16	1800	366.3	6.7	-0.1362	3.4410	-	367.0	7.7	-0.0367	3.4345	-
17	2000	370.2	5.7	-0.1794	3.1620	-	372.7	6.1	-0.1795	3.6543	-
18	2400	376.7	4.8	-0.0510	3.2890	-	376.1	5.2	-0.0308	2.9644	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	277.9	3.2	0.1038	2.9009	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	376.4	4.8	0.0180	3.4010	-	377.1	5.6	0.0507	2.9297	-

Annexes 25 à 30 (Ft=3,6)

Annexes 29		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 3.6		Cf = -96 mm			Fr = 3.6		Cf = -96 mm		
		Frr = 5.4		Ls = 300 mm			Frr = 5.4		Ls = 350 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	291.1	16.5	0.0039	3.1332	1.0	294.2	13.8	0.0136	3.0424	1.5
8	600	275.6	17.2	0.0834	3.2526	-	289.5	15.9	-0.0156	3.0162	-
9	700	251.0	18.1	0.0230	3.2530	1.5	264.6	16.7	0.1271	3.0639	1.5
10	800	261.6	25.5	0.4866	3.9271	-	261.5	22.1	0.2891	3.3333	-
11	900	305.1	32.5	0.5538	3.5419	2.0	295.7	27.7	0.4274	3.3246	2.0
12	1000	349.9	36.0	0.4679	3.6394	-	339.5	33.2	0.4922	3.6042	-
13	1200	367.1	32.3	0.3680	3.4669	1.0	368.2	31.6	0.2028	3.2845	2.0
14	1400	358.8	19.2	0.3633	3.6989	-	360.1	18.6	0.3800	3.7913	-
15	1600	358.5	11.3	0.0952	3.5604	0.0	359.9	11.0	0.2199	3.7383	0.0
16	1800	364.7	7.6	-0.1293	3.3897	-	364.6	7.2	-0.3376	4.8979	-
17	2000	368.5	6.4	-0.2664	3.5818	-	370.8	5.6	-0.2118	3.4884	-
18	2400	374.6	5.0	-0.0628	3.2005	-	376.4	4.8	-0.1948	3.3589	-
19	2800	375.6	5.1	-0.0130	3.2355	-	-	-	-	-	-
20	3200	376.8	4.8	-0.0490	3.2336	-	379.1	4.3	0.0176	3.0945	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	375.5	5.0	-0.0960	3.0601	-	375.8	4.1	0.0218	3.3467	-

Annexes 25 à 30 (Ft=3,6)

Annexes 30		Bassin $\alpha = 0^\circ$					Coquille $\alpha = 15^\circ$				
		Fr = 4,6		Cf = 0 mm			Fr = 4,6		Cf = -64 mm		
		Frr = 6,3		Ls = -			Frr = 6,3		Ls = 350 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	75.8	21.0	2.0564	12.7597	0.0	-	-	-	-	-
2	100	67.8	25.0	1.7575	8.6684	0.0	-	-	-	-	-
3	150	84.2	38.7	1.2648	6.3407	4.0	-	-	-	-	-
4	200	98.2	41.9	1.2220	5.9060	4.0	-	-	-	-	-
5	300	111.2	51.3	0.9382	4.5144	3.5	-	-	-	-	-
6	400	137.8	53.0	0.8852	4.3301	3.0	-	-	-	-	-
7	500	150.4	53.5	0.8119	4.3085	3.0	225.7	75.6	-0.3696	3.1708	2.5
8	600	171.3	49.9	0.6745	4.4718	3.5	248.2	32.3	0.0326	3.4384	-
9	700	177.7	43.0	0.3179	3.6841	1.5	263.5	23.0	-0.0029	3.8960	1.0
10	800	202.5	37.1	0.3295	3.9751	1.5	275.5	18.3	-0.2359	4.1961	-
11	900	223.2	32.7	0.2226	4.2472	1.0	285.4	14.4	-0.3118	4.8490	1.5
12	1000	239.2	31.5	0.1253	4.3890	3.5	292.6	13.0	-0.4810	6.2906	-
13	1200	258.6	23.9	-0.0754	3.6819	0.0	299.2	8.6	-0.1685	4.6906	0.0
14	1400	276.7	16.7	-0.2217	4.2727	0.0	-	-	-	-	-
15	1600	287.5	12.0	-0.5137	5.5200	-	305.0	5.2	-0.1770	3.5786	-
16	1800	289.3	8.9	-0.3793	4.1055	-	-	-	-	-	-
17	2000	297.7	7.4	-0.1046	3.2557	-	305.2	4.4	0.0557	3.2040	-
18	2400	300.8	5.5	-0.1696	3.0039	-	-	-	-	-	-
19	2800	302.3	4.9	0.1099	3.0842	-	308.3	3.9	0.0113	3.0370	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	301.0	5.6	0.2510	3.0507	-	306.2	3.0	0.1111	2.9705	-

Annexes 31 à 36 (Ft=4,6)

Annexes 31		Coquille $\alpha = 15^\circ$					Coquille $\alpha = 15^\circ$				
		Fr = 4.6		Cf = -64 mm			Fr = 4.6		Cf = -96 mm		
		Frr = 6.3		Ls = 450 mm			Frr = 6.3		Ls = 450 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad	k	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad	k	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	600	249.3	21.6	-0.2045	3.1153	1.5	220.7	50.1	-0.1125	3.3750	-
9	700	244.3	12.8	-0.2692	3.7039	-	244.7	31.2	0.0314	3.7926	4.0
10	800	244.0	10.4	0.2278	4.5717	3.0	264.2	23.3	-0.1157	3.7323	-
11	900	252.4	10.5	0.1732	4.0918	-	277.6	19.5	-0.2366	4.4826	2.5
12	1000	267.4	11.4	0.0012	3.5136	1.0	286.1	15.2	-0.3792	4.3709	-
13	1200	286.7	10.0	0.0070	3.4385	-	295.4	9.9	-0.5058	5.1786	1.0
14	1400	293.4	7.1	0.1089	3.1272	1.5	299.8	7.2	-0.2669	3.7851	-
15	1600	297.6	5.6	0.1404	3.3099	-	301.2	6.5	-0.5286	4.0403	0.0
16	1800	300.6	4.8	0.1045	3.1606	0.0	304.1	5.3	-0.0501	3.1962	
17	2000	302.8	4.6	0.0922	3.0704	-	-	-	-	-	-
18	2400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	2800	306.3	4.4	0.1037	3.1421	-	306.4	4.5	-0.1164	3.2177	
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	306.4	4.3	-0.0378	2.9556	-	305.1	4.4	0.1310	2.9006	-

Annexes 31 à 36 (Ft=4,6)

Annexes 32		Coquille $\alpha = 15^\circ$					Coquille $\alpha = 15^\circ$				
		Fr = 4.6	Cf = -96 mm				Fr = 4.6	Cf = -96 mm			
		Frr = 6.3	Ls = 550 mm				Frr = 6.3	Ls = 650 mm			
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad	k	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad	k	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	700	258.4	20.6	-0.3040	3.3830	3.5	-	-	-	-	-
10	800	256.1	14.0	-0.2820	3.2319	-	267.6	10.4	-0.0920	3.0752	0.0
11	900	257.3	9.2	0.0724	3.0790	2.0	264.1	8.8	-0.2355	3.4079	-
12	1000	267.5	9.2	-0.0317	3.6952	-	265.0	9.0	0.0805	3.4537	2.0
13	1200	285.8	9.2	0.0875	3.2994	1.0	282.7	8.7	0.0937	3.7961	-
14	1400	294.7	7.1	-0.0794	3.4911	-	293.4	7.5	-0.0948	3.4537	-
15	1600	299.7	5.8	-0.0973	3.5025	0.0	298.3	6.2	-0.0420	3.1242	0.0
16	1800	301.5	5.3	0.0036	3.0127	-	301.0	5.5	0.0793	3.0325	-
17	2000	302.4	5.3	-0.0945	3.0907	0.0	303.7	5.4	-0.1059	3.0051	-
18	2400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	2800	307.2	4.6	0.0171	2.8475	-	309.2	4.9	-0.0313	3.0259	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	306.3	4.7	-0.0244	2.8610	-	306.7	4.6	0.0943	2.9935	-

Annexes 31 à 36 (Ft=4,6)

Annexes 33		Coquille $\alpha = 15^\circ$					Coquille $\alpha = 30^\circ$				
		Fr = 4.6		Cf = -96 mm			Fr = 4.6		Cf = -32 mm		
		Frr = 6.3		Ls = 750 mm			Frr = 6.3		Ls = 250 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	226.1	15.7	-0.0660	2.8720	-
7	500	-	-	-	-	-	216.7	13.3	0.0500	3.1210	2.5
8	600	-	-	-	-	-	194.9	13.3	0.0790	3.0120	-
9	700	-	-	-	-	-	221.1	18.4	0.4590	3.9790	0.0
10	800	-	-	-	-	-	271.7	23.7	0.4060	3.5380	-
11	900	281.8	7.3	-0.0670	3.2690	0.0	296.8	23.0	0.2270	3.1060	0.0
12	1000	279.1	7.2	-0.1255	3.3420	-	295.9	18.8	0.2570	3.5150	-
13	1200	286.4	8.0	-0.0497	2.9680	1.5	291.2	9.2	0.1860	3.7040	2.5
14	1400	297.8	7.7	0.2003	3.9121	-	298.4	5.5	-0.0480	3.4670	-
15	1600	303.2	6.3	-0.1048	3.1262	0.0	301.5	4.4	-0.1690	4.1180	0.0
16	1800	304.8	5.8	-0.0513	3.3590	-	303.6	4.0	0.0703	3.1720	-
17	2000	307.9	5.5	-0.0029	3.1672	-	304.4	4.2	0.1370	3.0800	-
18	2400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	2800	312.5	4.7	0.0951	2.8650	-	307.4	3.5	0.1020	3.0840	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	311.7	4.7	0.0544	3.0770	-	305.4	3.3	0.2190	3.0430	-

Annexes 31 à 36 (Ft=4,6)

Annexes 34		Coquille $\alpha = 30^\circ$					Coquille $\alpha = 30^\circ$				
		Fr = 4.6		Cf = -64 mm			Fr = 4.6		Cf = -64 mm 0.0		
		Frr = 6.3		Ls = 250 mm			Frr = 6.3		Ls = 300 mm 0.0		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	235.0	24.7	-0.1230	2.9300	1.0	239.3	16.9	-0.0560	2.9620	-
7	500	224.6	17.1	-0.0069	3.0370	-	233.3	15.0	-0.0750	3.1010	1.5
8	600	205.1	15.0	0.0666	3.1350	0.0	211.0	13.5	-0.0002	3.0800	-
9	700	221.7	18.5	0.2901	3.7090	-	208.7	15.3	0.2320	3.9370	1.5
10	800	269.5	23.4	0.5640	4.0210	2.5	250.9	21.7	0.6220	4.1350	-
11	900	301.9	24.9	0.1835	3.3070	-	293.5	23.4	0.4330	3.6580	2.5
12	1000	304.8	19.3	0.1840	3.3090	1.5	301.6	19.3	0.3080	3.3620	-
13	1200	300.2	9.8	0.1080	3.4960	-	297.0	10.0	0.1330	3.1940	0.5
14	1400	303.0	6.0	0.0150	3.1140	0.0	300.6	6.3	0.0290	3.4920	-
15	1600	306.6	4.9	-0.0420	2.9190	-	303.0	4.8	-0.1600	3.8520	0.0
16	1800	308.1	4.6	0.0340	3.2610	-	306.9	4.3	0.0170	3.1410	-
17	2000	315.6	3.9	0.0590	3.1460	-	307.3	4.0	0.0460	3.0540	-
18	2400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	2800	310.7	4.1	-0.0110	3.2600	-	308.5	3.7	0.0720	3.1580	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	308.8	3.9	0.0050	3.0140	-	306.4	3.5	0.1590	3.1490	-

Annexes 31 à 36 (Ft=4,6)

Annexes 35		Coquille $\alpha = 30^\circ$					Coquille $\alpha = 30^\circ$				
		Fr = 4.6		Cf = -64 mm			Fr = 4.6		Cf = -96 mm		
		Frr = 6.3		Ls = 350 mm			Frr = 6.3		Ls = 300 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	239.3	13.2	-0.0830	3.2700	2.0	238.7	23.6	-0.0730	2.8792	3.0
8	600	227.6	11.5	0.0290	3.0540	-	222.4	15.3	-0.0125	3.0223	-
9	700	211.3	12.7	-0.0490	3.3270	3.0	210.0	15.5	0.0925	3.1796	2.0
10	800	231.8	16.9	0.5470	4.9200	-	240.4	20.0	0.4039	3.8888	-
11	900	278.5	21.8	0.3620	3.4420	2.5	286.7	23.0	0.4013	3.4058	2.0
12	1000	302.1	20.3	0.3160	3.4180	-	304.3	21.4	0.1977	3.3545	-
13	1200	295.3	11.0	0.2000	3.9470	1.0	299.4	11.6	0.0691	3.3974	1.5
14	1400	298.0	6.0	0.0690	3.6140	-	301.0	6.6	-0.0201	3.1674	-
15	1600	302.3	4.8	-0.2610	5.7700	0.0	304.7	5.4	0.0043	3.1033	0.0
16	1800	305.2	4.2	-0.3760	5.4040	-	-	-	-	-	-
17	2000	305.0	4.0	-0.2280	4.2990	-	308.4	4.4	-0.0031	3.0490	-
18	2400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	2800	308.5	3.5	3.5000	3.4200	-	308.9	4.2	0.0063	3.0804	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	305.9	3.3	3.3000	3.0580	-	307.3	4.1	-0.0288	2.9352	-

Annexes 31 à 36 (Ft=4,6)

Annexes 36		Coquille $\alpha = 30^\circ$					Coquille $\alpha = 30^\circ$				
		Fr = 4.6		Cf = -96 mm			Fr = 4.6		Cf = -96 mm		
		Frr = 6.3		Ls = 350 mm			Frr = 6.3		Ls = 450 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	240.4	17.7	-0.0695	2.8810	3.5	-	-	-	-	-
8	600	235.0	14.8	-0.3520	5.1758	-	256.7	11.1	-0.0903	3.0080	-
9	700	214.1	13.9	0.0073	5.2699	3.0	252.5	9.5	0.0385	3.2990	1.5
10	800	226.5	15.9	0.2759	3.5558	-	244.6	10.1	-0.0270	3.0880	-
11	900	271.3	21.0	0.5033	3.7315	3.0	253.5	13.4	0.2526	3.6895	2.5
12	1000	299.6	22.0	0.3272	3.2612	-	281.9	17.7	0.4277	3.9296	-
13	1200	300.8	12.2	0.1139	3.3954	2.5	304.9	13.5	0.2511	3.6235	1.0
14	1400	299.4	7.2	-0.0448	3.9397	-	306.2	6.8	0.2046	3.5779	-
15	1600	304.4	5.5	-0.0460	3.3114	0.0	309.7	4.8	-0.1101	3.3720	0.0
16	1800	306.4	4.8	-0.0769	3.0948	-	311.2	4.2	-0.1980	5.1330	-
17	2000	-	-	-	-	-	311.5	3.7	0.1016	3.3810	-
18	2400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	2800	310.3	3.7	0.0269	3.0340	-	258.1	2.5	0.3342	5.0490	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	307.2	4.3	-0.0406	2.8825	-	311.7	3.5	0.0545	3.2508	-

Annexes 37 à 45 (Ft=4,6)

Annexes 37		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 4.6		Cf = -32 mm			Fr = 4.6		Cf = -32 mm		
		Frr = 6.3		Ls = 250 mm			Frr = 6.3		Ls = 300 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	244.5	13.8	-0.0945	3.0013	3.5	-	-	-	-	-
6	400	234.4	16.0	-0.2774	3.6530	-	238.1	13.3	0.0600	3.0800	-
7	500	217.5	13.4	0.1960	3.2625	0.0	232.8	12.2	0.0430	2.9700	2.5
8	600	207.4	15.5	0.1616	3.2900	-	212.0	13.3	0.1510	3.0350	-
9	700	241.9	21.0	0.3646	3.8500	0.0	230.1	18.8	0.2540	3.5000	2.5
10	800	284.5	26.5	0.3928	3.3800	-	263.8	23.4	0.3140	3.3600	-
11	900	299.3	26.4	0.2024	3.2076	2.0	295.0	29.0	0.3700	3.2500	2.5
12	1000	295.1	20.0	0.3202	3.5880	-	297.6	24.9	0.3790	3.6950	-
13	1200	289.8	9.8	0.0327	3.4200	3.5	291.0	12.1	0.9260	3.6301	3.0
14	1400	296.8	6.1	-0.0289	3.5500	-	295.2	6.6	-0.1830	4.0100	-
15	1600	300.8	5.4	0.0053	3.5500	0.0	300.8	4.8	-0.1210	3.5600	0.0
16	1800	-	-	-	-	-	305.0	4.3	-0.1420	3.6500	-
17	2000	304.6	4.3	0.0672	3.1200	-	307.1	3.9	0.0340	3.1500	-
18	2400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	2800	306.0	4.2	0.0866	3.1300	-	309.2	3.4	0.0460	3.3400	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	303.0	4.0	0.1195	3.0660	-	307.2	2.8	0.3180	4.0500	-

Annexes 37 à 45 (Ft=4,6)

Annexes 38		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 4.6		Cf = -32 mm			Fr = 4.6		Cf = -64mm		
		Frr = 6.3		Ls = 350 mm			Frr = 6.3		Ls = 250 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	233.5	17.3	-0.0760	2.9430	
7	500	240.5	11.2	0.0090	3.1550	2.5	220.5	13.9	-0.0010	2.9429	0.0
8	600	153.1	12.2	0.0730	3.0600	0.0	206.7	16.1	0.1300	3.1320	
9	700	228.9	15.1	0.1640	3.2400	3.0	235.8	22.1	0.3630	3.6240	1.5
10	800	248.4	20.0	0.4020	3.9410	-	283.5	28.0	0.3700	3.3740	
11	900	280.0	23.8	0.4970	3.7780	0.0	302.5	28.3	0.3620	3.7390	1.5
12	1000	294.1	22.4	0.3570	3.3640	-	299.9	23.7	0.1590	3.4750	
13	1200	281.3	11.0	0.1520	3.3840	3.0	292.8	11.0	0.0390	3.4130	0.5
14	1400	292.4	5.9	0.0240	3.6490	-	297.1	6.9	-0.0470	3.2020	
15	1600	298.4	4.3	0.0320	3.4670	0.0	301.9	5.3	-0.0960	3.2830	0.5
16	1800	-	-	-	-	-	303.6	5.1	-0.0300	3.5230	
17	2000	302.7	3.4	0.1000	3.5210	-	305.8	5.0	-0.0320	2.9990	0.0
18	2400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	2800	304.9	2.9	0.2840	3.1430	-	306.5	4.2	0.0058	3.0450	
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	300.1	2.8	0.3770	3.7990	-	304.1	4.4	0.0339	3.1100	-

Annexes 39 à 41 (Ft=4,6)

Annexes 39		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Ft = 4.6		Cf = -64 mm			Ft = 4.6		Cf = -64 mm		
		Fr = 6.3		Ls = 300 mm			Fr = 6.3		Ls = 350 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	245.0	12.6	-0.0060	3.0837	-	-	-	-	-	-
7	500	241.8	13.0	-0.0130	3.0681	1.5	246.8	11.7	0.0156	2.9060	1.0
8	600	227.6	13.8	0.0855	2.9350	-	232.9	12.9	0.1242	3.1182	-
9	700	234.0	18.0	0.2250	3.0820	1.0	230.0	14.9	0.2010	3.2936	1.0
10	800	273.3	24.4	0.4090	3.5110	-	256.5	20.3	0.4053	3.3869	-
11	900	302.0	26.7	0.3260	3.2270	2.0	292.5	25.2	0.3676	3.4021	1.5
12	1000	303.7	23.0	0.2510	3.4000	-	300.8	22.6	0.2495	3.2009	-
13	1200	294.6	11.4	0.1920	3.2940	0.0	294.1	11.0	0.2051	3.7081	0.0
14	1400	299.0	6.4	0.0620	3.4810	-	298.3	6.3	0.1123	3.8312	-
15	1600	-	4.9	-0.1260	3.5670	-	-	4.7	0.0129	3.6685	-
16	1800	308.1	4.4	-0.0352	3.1480	-	307.4	4.0	0.0833	3.1366	-
17	2000	-	4.1	0.0025	3.1070	-	-	3.8	0.0694	4.3660	-
18	2400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	2800	-	3.9	0.0530	3.0170	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	308.1	3.3	0.1080	3.2510	-	307.1	3.2	0.1416	3.1820	-

Annexes 39 à 41 (Ft=4,6)

Annexes 40		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Ft = 4.6		Cf = -96 mm			Ft = 4.6		Cf = -96 mm		
		Fr = 6.3		Ls = 250 mm			Fr = 6.3		Ls = 300 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	244.5	25.9	-0.2546	3.2899	3.0	-	-	-	-	-
7	500	232.7	16.8	0.0454	3.0797	-	244.6	14.1	0.0210	3.1768	-
8	600	211.5	18.0	0.1205	2.8550	2.0	223.2	14.2	0.1348	3.0354	2.5
9	700	226.6	20.6	0.3682	3.5313	-	224.9	17.2	0.2290	3.3529	-
10	800	273.8	27.5	0.6065	4.2433	2.0	261.2	23.8	0.5751	3.8857	2.0
11	900	305.6	30.3	0.4558	3.6457	-	296.9	28.6	0.4022	3.4520	-
12	1000	308.2	24.2	0.2743	3.2802	0.0	302.9	29.9	0.2909	3.1982	0.0
13	1200	299.6	12.5	0.1454	3.4752	-	295.5	13.6	0.1998	3.1373	-
14	1400	301.2	7.6	-0.0597	3.4673	-	297.2	7.5	-0.0113	3.4551	-
15	1600	306.2	6.2	-0.0815	2.9915	-	301.7	5.7	-0.0005	2.9999	-
16	1800	308.6	6.0	-0.1724	3.2248	-	306.7	5.4	-0.0079	2.9860	-
17	2000	-	5.5	-0.0611	3.0919	-	306.4	5.2	-0.0160	2.9295	-
18	2400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	2800	-	5.4	-0.0423	3.0251	-	306.2	4.4	0.0218	3.0266	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	317.9	6.0	-0.0952	2.7522	-	307.0	4.7	0.0176	2.9795	-

Annexes 39 à 41 (Ft=4,6)

Annexes 41		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Bassin $\alpha = 0^\circ$				
		Ft = 4.6		Cf = -96 mm			Ft = 5.5		Cf = 0 mm		
		Fr = 6.3		Ls = 350 mm			Fr = 7.2		Ls = -		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	58.3	20.8	1.3976	7.6521	3.5
2	100	-	-	-	-	-	52.0	23.8	1.8008	9.9207	4.0
3	150	-	-	-	-	-	68.4	38.7	1.3030	7.0722	4.5
4	200	-	-	-	-	-	83.8	40.6	1.1720	5.8923	3.5
5	300	-	-	-	-	-	89.3	46.1	0.8549	4.2223	3.5
6	400	-	-	-	-	-	114.7	48.9	0.7841	4.4995	3.0
7	500	246.8	13.3	-0.0080	3.0100	1.5	128.4	48.3	0.6266	3.9765	3.5
8	600	236.1	12.8	0.0716	2.9377	-	147.6	43.3	0.3754	3.8001	3.5
9	700	225.2	14.7	0.1714	3.3900	3.0	158.3	35.4	0.2290	3.7267	4.0
10	800	247.8	19.9	0.4449	84.0000	-	179.2	25.1	0.2153	3.6505	1.0
11	900	288.9	25.8	0.4415	3.3059	2.0	197.1	26.4	0.0651	3.6893	4.0
12	1000	304.0	24.1	0.3180	3.3491	-	211.6	22.3	-0.0018	3.7552	4.0
13	1200	296.9	12.8	0.2235	4.1122	0.0	230.5	14.9	-1.0161	12.1133	0.0
14	1400	298.9	6.7	0.0749	3.5882	-	239.9	9.5	-0.5955	5.5686	0.0
15	1600	302.1	4.9	0.0246	3.3765	-	243.6	6.9	-0.6624	5.5821	0.0
16	1800	304.5	4.5	-0.1330	3.9475	-	245.8	5.1	-0.1345	3.6141	-
17	2000	306.7	4.1	0.0364	2.9644	-	248.3	4.3	-0.0002	3.2822	-
18	2400	-	-	-	-	-	249.5	4.1	0.2017	3.2676	-
19	2800	307.1	3.4	0.1123	3.1240	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	305.3	3.6	0.1250	3.0203	-	249.0	3.9	0.1925	3.0688	-

Annexes 37 à 45 (Ft=4,6)

Annexes 42		Coquille $\alpha = 15^\circ$					Coquille $\alpha = 15^\circ$				
		Fr = 4.6		Cf = -64 mm			Fr = 4.6		Cf = -64 mm		
		Frr = 6.3		Ls = 350 mm			Frr = 6.3		Ls = 450 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	189.2	40.4	-0.7043	5.1980	1.0	-	-	-	-	-
8	600	209.1	14.1	-0.1098	4.8241	-	216.4	11.5	-0.2663	3.2076	-
9	700	220.5	11.0	-0.4271	5.1540	2.0	213.9	7.5	-0.1180	3.4361	1.5
10	800	239.7	11.4	-0.1460	4.5941	-	218.3	7.9	-0.1566	4.4808	-
11	900	243.5	7.7	-0.2170	3.0911	1.5	228.7	8.1	0.1029	3.3740	1.5
12	1000	247.5	6.7	-0.1670	3.5760	-	238.0	7.5	0.1059	3.5210	-
13	1200	254.9	4.7	-0.1567	3.7851	0.0	244.3	5.3	0.1468	3.2880	0.0
14	1400	253.4	3.9	0.1253	3.2990	-	248.3	4.6	0.0328	3.2653	-
15	1600	253.8	3.7	0.0929	3.1141	-	250.7	4.3	-0.0170	3.1784	-
16	1800	253.5	4.0	0.2741	6.6970	-	-	-	-	-	-
17	2000	254.4	3.6	0.1326	3.0480	-	-	-	-	-	-
18	2400	255.9	3.5	0.1078	3.1260	-	255.8	3.5	0.0853	3.1320	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	254.2	3.6	0.0325	3.0704	-	255.0	3.5	0.1178	3.1366	-

Annexes 37 à 45 (Ft=4,6)

Annexes 43		Coquille $\alpha = 15^\circ$					Coquille $\alpha = 15^\circ$				
		Fr = 4.6		Cf = -96 mm			Fr = 4.6		Cf = -96 mm 0.0		
		Frr = 6.3		Ls = 450 mm			Frr = 6.3		Ls = 550 mm 0.0		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	600	199.5	34.6	-0.1797	3.6030	0.0	-	-	-	-	-
9	700	225.7	21.2	-0.2445	4.3540	-	226.1	12.3	-0.3305	3.506	1.5
10	800	238.0	14.1	-0.6071	5.7889	2.0	219.3	7.7	-0.2352	3.3353	-
11	900	243.7	8.9	-0.0308	5.6008	-	228.1	7.1	0.1251	3.9414	2.0
12	1000	248.3	7.2	-0.2569	4.3890	1.5	236.7	7.2	0.0147	3.4337	-
13	1200	253.1	5.1	-0.1361	3.3907	-	247.9	6.0	-0.0971	3.1110	0.0
14	1400	252.5	4.6	-0.0473	3.1288	0.0	249.3	5.0	-0.0257	3.2679	-
15	1600	253.4	4.4	0.0305	3.0596	-	251.7	4.5	-0.1710	3.2605	-
16	1800	255.1	4.1	-0.0673	3.2948	-	-	-	-	-	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	256.3	3.7	0.1492	0.1492	-	256.7	4.0	-0.0595	3.025	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	256.4	3.8	0.0821	3.1741	-	255.7	3.7	0.1149	2.9399	-

Annexes 37 à 45 (Ft=4,6)

Annexes 44		Coquille $\alpha = 15^\circ$					Coquille $\alpha = 15^\circ$				
		Fr = 4.6	Cf = -96 mm				Fr = 4.6	Cf = -96 mm			
		Frr = 6.3	Ls = 650 mm				Frr = 6.3	Ls = 750 mm			
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	800	233.3	6.3	-0.1995	3.3362	-	-	-	-	-	-
11	900	234.3	6.3	-0.0154	3.1537	0.0	246.7	5.3	0.1069	3.0550	0.0
12	1000	235.6	6.7	-0.0508	3.3060	-	244.9	5.6	-0.0460	3.4602	-
13	1200	247.8	5.9	-0.0624	3.1919	0.0	252.6	6.4	0.2146	3.4754	0.0
14	1400	251.1	5.2	0.0226	2.8494	-	258.5	5.3	-0.0203	3.1540	-
15	1600	252.5	4.9	0.1354	3.0234	-	260.2	4.9	-0.0205	3.1227	-
16	1800	254.0	4.3	-0.0166	3.1215	-	261.4	4.7	-0.0359	3.3397	-
17	2000	-	-	-	-	-	261.8	4.4	0.1322	3.2410	-
18	2400	257.7	4.2	-0.0322	3.3224	-	265.6	4.1	-0.0359	3.1930	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	266.2	4.1	-0.0180	3.2290	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	257.1	4.1	0.1289	3.0128	-	264.3	4.1	-0.0372	3.0606	-

Annexes 37 à 45 (Ft=4,6)

Annexes 45		Coquille $\alpha = 30^\circ$					Coquille $\alpha = 30^\circ$				
		Fr = 4.6		Cf = -32 mm			Fr = 4.6		Cf = -64 mm		
		Frr = 6.3		Ls = 250 mm			Frr = 6.3		Ls = 250 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	194.2	12.8	0.0050	2.9790	-	201.1	17.9	-0.1740	2.9020	-
7	500	177.8	10.6	0.0240	3.0640	0.0	182.5	12.6	-0.0470	3.2050	1.0
8	600	183.0	13.5	0.3210	3.6480	-	187.6	13.6	0.2590	3.7840	-
9	700	225.5	19.6	0.4330	3.5380	0.0	227.5	18.5	0.4810	3.7930	0.0
10	800	247.1	19.2	0.2000	3.1020	-	251.1	18.6	0.1590	3.1360	-
11	900	247.3	13.4	0.2670	3.5060	3.0	252.2	13.9	0.1740	3.1840	2.0
12	1000	246.2	9.2	0.0600	4.2020	-	251.0	9.2	0.3160	3.6560	-
13	1200	250.6	4.6	-0.1600	3.7930	0.0	251.5	5.1	-0.5150	8.0840	0.0
14	1400	252.7	3.7	-0.1520	4.0760	-	252.7	4.3	-0.0090	3.2000	-
15	1600	253.5	3.4	0.0810	3.3430	-	254.2	3.8	0.0783	3.2820	-
16	1800	253.8	3.4	0.2030	3.3830	-	254.2	3.7	0.1420	3.1100	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	255.0	3.3	0.2140	3.2730	-	256.7	3.6	0.1270	3.0690	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	251.5	2.8	0.2050	3.9370	-	255.3	3.5	0.0990	3.0160	-

Annexes 46 à 51 (Ft=5,5)

Annexes 46		Coquille $\alpha = 30^\circ$					Coquille $\alpha = 30^\circ$				
		Fr = 5.5		Cf = -64 mm			Fr = 5.5		Cf = -64 mm		
		Frr = 7.2		Ls = 300 mm			Frr = 7.2		Ls = 350 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	203.5	13.0	-0.0463	2.9710	-	-	-	-	-	-
7	500	194.2	11.6	-0.0910	3.3070	-	209.0	9,8	-0.2630	3.7510	-
8	600	181.2	12.0	-0.0400	3.1560	2.0	194.6	9,1	-0.1130	3.0520	1,5
9	700	208.3	16.1	0.4280	3.5890	-	198.5	11,5	0.1680	3.3850	-
10	800	245.3	19.1	0.2180	3.2460	0.0	233.9	16,8	0.4800	3.7410	0.0
11	900	250.6	13.9	0.1680	3.6040	-	253.1	14,5	0.2280	3.4270	-
12	1000	249.0	9.6	0.1790	3.7200	-	252.5	10,2	0.0480	3.6080	-
13	1200	251.4	4.9	0.0630	3.4040	-	250.5	4,9	0.0400	3.5080	-
14	1400	252.8	4.0	0.1360	3.2780	-	254.2	3,7	0.0410	3.3490	-
15	1600	253.5	3.7	0.0670	3.3940	-	254.7	3,3	0.0430	3.6090	-
16	1800	253.7	3.4	0.1770	3.1180	-	256.1	3,2	0.1430	3.5020	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	-	-	-	-	-	257.5	2,9	0.2210	3.8120	-
19	2800	253.3	3.4	0.2120	2.9080	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	254.6	3.1	0.1510	3.1890	-	254.9	2,8	0.2900	3.6820	-

Annexes 46 à 51 (Ft=5,5)

Annexes 47		Coquille $\alpha = 30^\circ$					Coquille $\alpha = 30^\circ$				
		Fr = 5.5		Cf = -96 mm			Fr = 5.5		Cf = -96 mm		
		Frr = 7.2		Ls = 300 mm			Frr = 7.2		Ls = 350 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	198.1	15.2	-0.1364	2.9248	2.5	206.4	12.5	-0.1794	3.2202	0.0
8	600	183.7	11.7	-0.0488	3.3533	-	197.4	10.4	-0.0028	3.1070	-
9	700	198.9	14.8	0.5277	3.9880	1.0	192.7	10.9	0.0873	3.2676	2.5
10	800	238.8	18.9	0.5261	3.7217	-	244.1	15.6	0.3389	3.3536	-
11	900	252.2	15.5	0.2640	3.6407	0.0	254.2	15.9	0.1937	3.3142	1.0
12	1000	250.6	10.8	0.1985	3.6893	-	251.8	11.6	0.1564	3.5002	-
13	1200	252.1	5.6	0.1546	3.4549	0.0	254.2	6.0	0.0986	3.8076	0.0
14	1400	252.7	4.3	0.0587	3.3028	-	255.2	4.2	0.1447	3.4044	-
15	1600	253.7	4.2	0.0464	3.3231	-	-	-	-	-	-
16	1800	255.2	4.0	0.0806	3.0911	-	256.2	3.6	0.1218	3.0938	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	254.7	3.7	0.0659	2.9623	-	257.9	3.3	0.1119	3.1059	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	253.5	3.9	0.1209	2.9798	-	256.3	3.4	0.1327	3.1306	-

Annexes 46 à 51 (Ft=5,5)

Annexes 48		Coquille $\alpha = 30^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 5.5		Cf = -96 mm			Fr = 5.5		Cf = -32 mm		
		Frr = 7.2		Ls = 450 mm			Frr = 7.2		Ls = 250 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	202.0	9.9	-0.0460	3.2550	3.0
6	400	-	-	-	-	-	197.7	10.8	-0.0740	3.1470	-
7	500	-	-	-	-	-	179.8	11.7	0.1480	3.0470	2.0
8	600	226.1	7.2	-0.0070	2.9510	-	195.6	17.6	0.5310	3.8160	-
9	700	222.4	7.0	-0.0198	3.1320	0.0	238.1	23.0	0.3480	3.3230	0.0
10	800	221.4	8.5	0.1382	3.7591	-	249.6	20.1	0.3020	3.3080	-
11	900	236.9	11.6	0.3450	3.7507	1.5	245.3	13.5	0.2950	3.4730	2.5
12	1000	250.3	11.6	0.3426	3.8020	-	245.0	9.1	0.1830	3.5171	-
13	1200	260.0	6.1	0.2155	3.3870	0.0	250.1	4.7	-0.0160	3.6000	0.0
14	1400	260.9	3.8	0.1805	3.2732	-	253.9	4.0	-0.0780	3.8730	-
15	1600	262.0	3.5	0.0967	3.2926	-	254.8	3.8	0.0260	3.3740	-
16	1800	262.8	4.5	0.0737	2.9610	-	254.0	3.5	0.1430	3.1880	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	263.5	3.2	0.2052	3.2950	-	12.0	3.5	0.2120	3.2017	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	263.1	3.3	0.2134	3.2379	-	252.8	3.0	0.3150	4.5410	-

Annexes 46 à 51 (Ft=5,5)

Annexes 49		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 5.5		Cf = -32 mm			Fr = 5.5		Cf = -64 mm		
		Frr = 7.2		Ls = 300 mm			Frr = 7.2		Ls = 250 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	204.8	10.3	-0.0050	3.0340	-	204.1	12.8	-0.0410	3.0700	-
7	500	196.0	11.4	-0.0770	3.0740	2.5	184.3	12.1	-0.0060	3.1820	1.5
8	600	191.3	13.4	0.1640	3.1020	-	194.0	16.2	0.4030	3.9280	-
9	700	222.6	20.0	0.3910	3.3150	3.0	237.1	22.6	0.5500	3.2500	0.0
10	800	247.0	20.1	0.2520	3.1120	-	253.8	21.6	0.1650	3.2970	-
11	900	246.9	14.1	0.1900	3.4240	3.0	249.8	15.9	0.2270	3.6200	2.0
12	1000	246.4	9.2	0.0890	3.3610	-	247.7	10.2	0.1530	3.5300	-
13	1200	250.0	4.7	-0.1160	3.8780	0.0	252.1	5.6	-0.1000	3.4060	0.5
14	1400	252.8	3.6	-0.1480	3.5910	-	253.9	4.6	0.0590	3.0240	-
15	1600	254.2	3.1	0.1710	3.2740	-	254.1	4.5	0.0190	3.0260	0.0
16	1800	254.3	3.0	0.1970	3.2370	-	254.4	4.3	0.0640	2.8490	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	255.1	2.8	0.2550	3.2710	-	255.5	4.2	-0.0179	2.8790	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	252.8	2.9	0.3610	3.4890	-	254.5	4.1	0.1020	3.0720	-

Annexes 46 à 51 (Ft=5,5)

Annexes 50		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 5.5		Cf = -64 mm			Fr = 5.5		Cf = -64 mm		
		Frr = 7.2		Ls = 300 mm			Frr = 7.2		Ls = 350 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	206.0	10.5	-0.0830	3.4540	-	-	-	-	-	-
7	500	195.4	10.6	0.1940	3.1620	2.0	213.0	8.9	0.0064	3.0480	1.5
8	600	193.3	13.3	0.2450	3.3130	2.0	202.8	10.9	0.0457	3.2245	-
9	700	225.5	20.2	0.5770	4.0100	1.5	210.3	14.7	0.3769	3.3142	2.0
10	800	253.0	21.3	0.3160	3.3340	-	243.0	17.9	0.3651	3.4446	-
11	900	252.1	15.2	0.3820	3.5840	2.5	251.3	14.0	0.3519	3.6934	2.0
12	1000	248.8	10.2	0.2740	3.6260	-	246.0	9.3	0.1378	3.3758	-
13	1200	251.9	5.2	-0.1030	4.4450	0.0	250.0	4.6	-0.5137	7.8901	0.5
14	1400	253.6	3.9	-0.0330	3.6760	-	254.0	3.6	0.0168	3.3905	-
15	1600	255.0	3.6	0.6290	3.2200	-	255.7	3.3	0.0757	3.2267	0.0
16	1800	-	-	-	-	-	254.6	3.1	0.1367	3.2680	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	256.2	3.1	0.1330	3.1750	-	256.1	2.7	0.3382	3.6328	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	255.2	3.0	0.1560	3.3670	-	254.2	2.9	0.2478	3.3372	-

Annexes 46 à 51 (Ft=5,5)

Annexes 51		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 5.5		Cf = -96 mm			Fr = 5.5		Cf = -96 mm		
		Frr = 7.2		Ls = 250 mm			Frr = 7.2		Ls = 300 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	205.1	17.0	-0.2528	3.4459	-	-	-	-	-	-
7	500	188.4	12.5	-0.0112	3.0729	2.5	205.1	10.9	-0.0085	3.2490	1.5
8	600	189.3	16.0	0.2404	3.6343	-	191.3	13.3	0.1403	3.3490	-
9	700	230.1	22.5	0.4870	3.7396	1.5	215.5	18.9	0.7834	5.0120	1.5
10	800	254.6	22.0	0.2010	3.2878	-	247.6	22.5	0.4010	3.5420	-
11	900	252.7	17.3	0.2456	3.5142	1.5	251.2	18.5	0.3138	3.3009	1.0
12	1000	250.6	12.3	0.3150	3.7274	-	248.6	12.3	0.2180	3.4560	-
13	1200	251.2	6.5	-0.0462	3.1422	0.0	249.8	5.8	0.0107	3.2830	0.0
14	1400	253.7	6.1	-0.1166	2.9081	-	252.9	4.6	0.0292	3.1490	-
15	1600	255.8	5.5	-0.1090	3.0489	-	254.0	4.2	0.0106	3.2503	-
16	1800	255.9	5.7	-0.0447	-0.0447	-	254.6	4.1	0.1084	3.0430	-
17	2000	-	-	-	-	-	255.9	3.9	0.0317	3.0270	-
18	2400	256.5	5.4	-0.0355	-0.0356	-	256.6	3.8	0.1743	3.0640	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	254.7	5.8	-0.1184	3.0665	-	254.6	4.0	0.0195	3.0609	-

Annexes 52 à 57 (Ft=5,5)

Annexes 52		Bassin $\alpha = 45^\circ$					Bassin $\alpha = 0^\circ$				
		Fr = 5.5		Cf = -96 mm			Fr = 6.4		Cf = 0 mm		
		Frr = 7.2		Ls = 350 mm			Frr = 8.1		Ls = -		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	40.1	14.8	1.5199	8.7792	0.0
2	100	-	-	-	-	-	43.5	21.6	1.7125	9.1247	4.0
3	150	-	-	-	-	-	57.5	31.5	1.1921	6.3911	4.5
4	200	-	-	-	-	-	72.9	35.1	1.0191	5.3844	4.0
5	300	-	-	-	-	-	85.1	42.3	0.9219	4.8350	3.5
6	400	-	-	-	-	-	107.4	42.8	0.6964	4.0320	3.0
7	500	212.1	9.7	0.0145	3.1895	2.0	124.1	39.3	0.4373	3.8146	2.0
8	600	201.8	10.4	0.1105	3.1153	-	142.9	35.5	0.3570	3.9395	4.0
9	700	206.8	13.8	0.3536	3.2717	3.0	158.7	26.7	0.1353	3.9095	4.0
10	800	241.5	19.9	0.4739	3.6512	-	176.8	19.7	-0.0180	3.8171	0.0
11	900	254.9	17.6	0.2986	3.5303	2.0	194.5	17.7	-0.2238	5.0622	0.0
12	1000	251.8	12.4	0.2880	3.5610	-	204.1	13.9	-0.4771	4.8874	0.0
13	1200	252.7	5.3	0.0709	3.2835	0.0	212.1	7.5	-0.5073	4.6322	-
14	1400	255.0	4.0	-0.0327	3.4460	-	216.5	5.3	-0.4519	6.3065	-
15	1600	256.9	3.4	0.0660	3.2413	-	217.8	4.0	0.0202	3.3183	-
16	1800	257.1	3.3	0.1031	3.2289	-	218.3	3.8	0.1962	2.9173	-
17	2000	-	-	-	-	-	219.0	3.5	0.1748	3.0188	-
18	2400	258.7	2.8	0.2530	3.4657	-	218.7	3.5	0.2352	2.9630	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	256.4	3.0	0.2254	3.3093	-	218.0	3.6	0.1916	3.0999	-

Annexes 52 à 57 (Ft=5,5)

Annexes 53		Coquille $\alpha = 15^\circ$					Coquille $\alpha = 15^\circ$				
		Fr = 6.4		Cf = -64 mm			Fr = 6.4		Cf = -64 mm		
		Frr = 8.1		Ls = 350 mm			Frr = 8.1		Ls = 450 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	12.0	21.2	-0.6640	5.0135	-	-	-	-	-	-
8	600	195.1	9.6	0.1300	7.0513	2.5	216.4	8.3	-0.2071	3.5734	-
9	700	195.2	7.5	0.0896	3.1388	-	213.9	6.0	0.0158	3.5886	1.5
10	800	202.7	6.8	-0.1250	3.1741	0.0	218.3	6.3	0.1380	3.2794	-
11	900	209.8	5.8	-0.0060	2.9572	-	228.7	5.9	0.0077	3.1740	0.0
12	1000	215.1	5.0	0.0911	3.2895	0.0	238.0	5.3	0.0420	3.2995	-
13	1200	219.8	4.3	0.0222	3.1620	-	244.3	4.3	0.0144	3.3191	-
14	1400	220.2	4.1	0.0444	3.1904	-	248.3	3.9	0.1520	3.1617	-
15	1600	220.8	3.7	0.1142	3.2221	-	250.7	3.8	0.0077	3.0639	-
16	1800	12.0	3.4	0.0196	3.2642	-	-	-	-	-	-
17	2000	12.0	3.4	0.1063	3.3657	-	-	-	-	-	-
18	2400	-	-	-	-	-	255.8	3.4	0.1151	3.4179	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	223.7	3.3	0.1158	3.2630	-	255.0	3.3	0.1267	3.2288	-

Annexes 52 à 57 (Ft=5,5)

Annexes 54		Coquille $\alpha = 15^\circ$					Coquille $\alpha = 15^\circ$				
		Fr = 5.5		Cf = -96 mm			Fr = 5.5		Cf = -96 mm		
		Frr = 7.2		Ls = 450 mm			Frr = 7.2		Ls = 550 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	600	190.9	26.7	-0.4680	4.2268	0.0	-	-	-	-	-
9	700	207.5	12.5	-0.0037	5.0483	-	200.4	8.3	-0.4057	4.3954	0.0
10	800	214.4	7.2	-0.0661	5.4970	0.0	200.4	6.4	-0.1157	3.6570	-
11	900	219.7	6.0	-0.1003	3.3758	-	208.3	5.8	0.0513	3.3418	0.5
12	1000	223.5	5.1	-0.0753	3.2549	0.0	214.4	5.1	0.0487	3.3823	-
13	1200	222.3	4.1	-0.1226	3.3352	-	218.9	4.8	-0.0216	3.0985	0.0
14	1400	223.2	3.9	0.0479	3.0897	-	220.4	4.2	0.1843	3.2438	-
15	1600	224.6	4.0	-0.2036	3.5474	-	221.5	4.1	0.0322	3.2046	-
16	1800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	231.2	3.5	0.0789	3.1963	-	225.1	3.7	0.0563	3.1317	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	232.1	3.5	0.1567	3.0655	-	223.3	3.6	0.0362	3.3656	-

0
f

Annexes 52 à 57 (Ft=5,5)

Annexes 55		Coquille $\alpha = 15^\circ$					Coquille $\alpha = 15^\circ$				
		Fr = 6.4		Cf = -96 mm			Fr = 6.4		Cf = -96 mm 0.0		
		Frr = 8.1		Ls = 650 mm			Frr = 8.1		Ls = 750 mm 0.0		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	800	207.0	5.3	-0.1380	3.0800	0.0	-	-	-	-	-
11	900	206.5	5.7	-0.0522	3.0763	-	217.6	4.3	-0.0280	3.1618	0.0
12	1000	212.4	5.7	0.0006	3.1676	-	217.6	5.3	-0.0730	3.0990	-
13	1200	219.6	4.8	-0.1480	3.3370	-	224.6	4.8	-0.0363	3.1642	-
14	1400	220.8	4.3	0.0682	2.9399	-	226.2	4.3	0.1730	2.9919	-
15	1600	221.1	4.2	0.0251	3.0184	-	226.6	4.3	0.2054	3.2180	-
16	1800	-	-	-	-	-	227.1	4.1	0.0968	3.1648	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	223.9	3.9	-0.0039	3.3171	-	230.0	3.9	0.0262	2.8732	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	231.6	3.8	-0.0158	3.2150	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	223.2	3.8	-0.0129	3.1523	-	229.1	3.6	0.1121	3.1360	-

Annexes 52 à 57 (Ft=5,5)

Annexes 56		Coquille $\alpha = 30^\circ$					Coquille $\alpha = 30^\circ$				
		Fr = 6.4		Cf = -64 mm			Fr = 6.4		Cf = -64 mm		
		Frr = 8.1		Ls = 250 mm			Frr = 8.1		Ls = 300 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	174.7	12.7	-0.0790	3.0200	0.0	186.1	8.8	-0.1470	3.5930	-
7	500	162.4	10.5	0.0190	3.0700	-	174.2	9.4	0.1440	3.2840	2.0
8	600	180.9	12.7	0.5700	3.8920	2.0	182.6	13.0	0.3680	3.6170	-
9	700	212.6	16.1	0.3370	3.0350	-	215.8	17.4	0.3890	3.2930	0.0
10	800	219.1	12.1	0.1710	3.1670	0.0	219.0	13.6	0.3370	3.3660	-
11	900	218.3	7.8	0.0760	3.6150	-	216.7	8.2	0.1620	3.3570	-
12	1000	219.5	5.3	0.0171	3.4590	-	218.6	5.4	0.1210	3.4870	-
13	1200	222.0	3.9	-0.0230	3.4140	-	221.2	3.7	0.0870	3.3250	-
14	1400	221.8	3.6	0.0320	3.2300	-	221.0	3.3	0.1050	3.2820	-
15	1600	222.2	3.4	0.1090	3.3540	-	221.2	3.1	0.1620	3.2170	-
16	1800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	223.7	3.3	0.0570	3.2490	-	222.3	3.0	0.1850	3.3020	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	222.2	3.1	0.1170	3.2620	-	220.9	2.9	0.2070	3.3310	-

Annexes 52 à 57 (Ft=5,5)

Annexes 57		Coquille $\alpha = 30^\circ$					Coquille $\alpha = 30^\circ$				
		Fr = 6.4		Cf = -64 mm			Fr = 4.6		Cf = -96 mm		
		Frr = 8.1		Ls = 350 mm			Frr = 6.3		Ls = 300 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	186.9	6.8	-0.0010	2.9070	2.0	176.7	11.2	-0.0304	3.0840	0.0
8	600	179.6	7.6	-0.1310	3.1560	-	169.3	10.4	0.0787	3.7588	-
9	700	191.2	10.6	-0.4700	4.0510	1.5	196.4	14.1	0.5357	3.8763	2.0
10	800	217.2	12.7	0.2670	3.2840	-	219.3	13.7	0.1629	3.6628	-
11	900	222.2	9.1	0.3070	3.8230	0.0	220.7	9.3	0.0802	3.2110	0.0
12	1000	222.0	5.8	0.2070	4.0560	-	222.0	6.2	0.1062	4.6183	-
13	1200	224.8	3.4	0.1200	3.5080	-	222.0	4.1	-0.0106	3.1952	-
14	1400	226.3	3.2	0.1890	3.4270	-	223.3	3.6	-0.0135	3.2132	-
15	1600	-	-	-	-	-	223.3	3.7	0.0875	2.9630	-
16	1800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	219.3	2.9	0.2760	3.5160	-	230.8	3.4	0.0803	3.0417	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	224.1	2.9	0.2900	3.5650	-	231.0	3.4	0.0000	3.1510	-

Annexes 58 à 63 (Ft=6,4)

Annexes 58		Coquille $\alpha = 30^\circ$					Coquille $\alpha = 30^\circ$				
		Fr = 6.4		Cf = -96 mm			Fr = 6.4		Cf = -96 mm		
		Frr = 8.1		Ls = 350 mm			Frr = 8.1		Ls = 450 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	186.8	9.5	-0.0302	3.1743	0.0	-	-	-	-	-
8	600	178.4	8.0	-0.0121	3.1370	-	201.2	6.0	0.0102	3.0864	-
9	700	183.6	10.4	0.2501	3.7734	2.0	198.5	6.3	0.0133	3.0360	0.0
10	800	211.4	13.0	0.4287	3.7335	-	204.2	8.8	0.0699	3.2699	-
11	900	221.5	10.1	0.3470	3.8527	0.0	215.7	9.3	0.0965	3.4574	0.0
12	1000	223.1	6.9	0.1061	3.3151	-	222.1	6.9	0.0691	3.2347	-
13	1200	225.6	3.8	-0.0698	4.7700	-	225.9	4.5	0.0769	3.7487	-
14	1400	224.4	3.3	0.0001	3.8953	-	189.2	3.5	0.1256	3.3535	-
15	1600	225.4	3.1	0.2229	3.5262	-	227.1	3.4	0.0990	3.6049	-
16	1800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	226.5	3.0	0.3360	3.9080	-	229.5	3.3	0.0184	3.2290	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	223.7	3.2	0.1680	3.3442	-	227.3	3.3	0.1345	3.4550	-

Annexes 58 à 63 (Ft=6,4)

Annexes 59		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 6.4		Cf = -32 mm			Fr = 6.4		Cf = -64 mm		
		Frr = 8.1		Ls = 250 mm			Frr = 8.1		Ls = 250 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	178.7	8.7	-0.0460	2.8790	3.0	-	-	-	-	-
6	400	173.4	9.5	-0.0186	2.9990	-	178.4	10.5	-0.0692	3.0300	-
7	500	144.8	11.3	0.0685	3.1420	2.0	165.4	11.7	0.1904	3.1140	2.0
8	600	185.7	17.3	0.2290	3.2330	-	192.3	17.5	0.4377	3.3890	-
9	700	210.5	18.9	0.1788	3.1640	2.5	220.6	18.5	0.1870	3.1020	0.0
10	800	214.8	14.5	0.1206	3.3207	-	218.7	14.2	0.0860	3.2100	-
11	900	215.0	8.3	0.0699	3.4313	2.5	218.2	8.7	0.0940	3.5410	0.5
12	1000	217.3	5.5	0.0051	3.7060	-	219.6	5.6	0.1370	3.2870	-
13	1200	219.9	3.4	0.1082	3.2900	0.5	221.9	4.0	-0.0540	3.2810	0.0
14	1400	220.9	3.4	0.1124	3.1820	-	222.6	4.0	0.0430	3.2880	-
15	1600	220.7	3.2	0.1550	3.1140	0.0	221.8	4.0	-0.0450	2.9960	-
16	1800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	222.5	3.1	0.1980	3.4090	-	223.6	3.8	0.0296	3.0800	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	219.4	2.8	0.2709	3.7880	-	222.0	3.7	0.0222	3.1350	-

Annexes 58 à 63 (Ft=6,4)

Annexes 60		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 6.4		Cf = -64 mm			Fr = 6.4		Cf = -64 mm		
		Frr = 8.1		Ls = 300 mm			Frr = 8.1		Ls = 350 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	186.1	8.8	-0.1470	3.5930	-	-	-	-	-	-
7	500	174.2	9.4	0.1440	3.2840	2.0	190.1	7.6	-0.0079	3.2990	2.0
8	600	182.6	13.0	0.3680	3.6170	-	183.4	9.6	0.0606	3.2040	-
9	700	215.8	17.4	0.3890	3.2930	0.0	200.4	14.3	0.4965	4.3030	1.5
10	800	219.0	13.6	0.3370	3.3660	-	219.2	13.4	0.2770	3.4120	-
11	900	216.7	8.2	0.1620	3.3570	-	218.3	8.2	0.2792	4.9450	0.0
12	1000	218.6	5.4	0.1210	3.4870	-	215.7	5.2	0.0072	3.4120	-
13	1200	221.2	3.7	0.0870	3.3250	-	222.1	3.4	0.1117	3.3360	-
14	1400	221.0	3.3	0.1050	3.2820	-	222.6	3.1	0.1039	3.7780	-
15	1600	221.2	3.1	0.1620	3.2170	-	224.2	2.9	0.1977	3.5720	-
16	1800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	222.3	3.0	0.1850	3.3020	-	151.2	4.2	0.4285	2.7100	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	220.9	2.9	0.2070	3.3310	-	222.0	2.7	0.2489	3.1110	-

Annexes 58 à 63 (Ft=6,4)

Annexes 61		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 6.4		Cf = -96 mm			Fr = 6.4		Cf = -96 mm		
		Frr = 8.1		Ls = 250 mm			Frr = 8.1		Ls = 300 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	187.9	13.2	-0.2052	3.0891	-	-	-	-	-	-
7	500	172.6	11.6	-0.0578	3.7101	0.0	178.6	9.1	0.0140	3.1463	0.0
8	600	189.7	17.1	0.5257	4.4930	-	175.6	13.0	0.3119	3.5790	-
9	700	221.7	20.4	0.1942	3.3131	1.5	209.6	18.0	0.4101	3.3932	1.5
10	800	226.1	15.7	0.1212	3.4267	-	220.7	15.6	0.3284	3.4596	-
11	900	224.0	10.9	0.1765	3.5678	0.0	217.7	9.9	0.1949	3.6413	0.0
12	1000	223.8	7.9	0.0411	2.9215	-	217.3	6.2	0.1798	3.4377	-
13	1200	227.4	5.8	-0.1041	3.0946	-	221.1	4.1	0.0441	3.1641	-
14	1400	228.1	6.0	-0.0983	3.0247	-	222.0	3.8	-0.0296	3.1319	-
15	1600	229.5	5.6	-0.0590	2.9180	-	222.6	3.7	0.0256	3.3995	-
16	1800	228.6	6.2	0.0105	2.7824	-	-	-	-	-	-
17	2000	228.9	5.9	0.0097	2.6860	-	-	-	-	-	-
18	2400	220.9	6.0	-0.0484	2.6665	-	222.9	3.3	0.0806	3.2873	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	227.1	4.9	-0.0032	3.0092	-	220.9	3.5	0.1016	3.1169	-

Annexes 58 à 63 (Ft=6,4)

Annexes 62		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Bassin $\alpha = 0^\circ$				
		Fr = 6.4		Cf = -96 mm			Fr = 7.6		Cf = 0 mm		
		Frr = 8.1		Ls = 350 mm			Frr = 9.3		Ls = -		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	41.6	17.3	1.4928	7.9040	3.5
2	100	-	-	-	-	-	42.4	21.5	1.6297	8.3947	4.0
3	150	-	-	-	-	-	55.8	33.1	0.9847	5.3262	4.5
4	200	-	-	-	-	-	73.0	36.2	0.8148	4.1984	3.5
5	300	-	-	-	-	-	84.8	41.1	0.8135	4.2299	3.5
6	400	-	-	-	-	-	107.1	34.8	0.4199	3.3975	3.5
7	500	191.7	7.7	0.0368	3.1264	1.0	126.6	28.7	0.3010	4.2297	3.5
8	600	180.5	9.1	0.2155	3.2144	-	144.6	24.4	0.1010	4.3298	4.0
9	700	196.7	13.2	0.5401	4.1779	2.0	158.5	18.6	-0.1107	3.7323	0.0
10	800	221.5	14.2	0.2198	3.3096	-	172.8	12.0	-0.1571	4.1921	0.0
11	900	220.6	10.1	0.1873	3.1203	0.0	179.0	10.0	-0.5068	4.8938	0.0
12	1000	221.6	6.5	0.2239	3.6774	-	182.0	7.2	-0.9233	6.1538	-
13	1200	222.7	3.6	-0.1744	4.1306	-	185.4	4.5	-0.5012	4.1291	-
14	1400	224.5	3.2	0.1580	3.3943	-	185.3	3.6	0.0455	3.3290	-
15	1600	224.0	3.0	0.1610	3.5736	-	186.8	3.4	0.1178	3.4761	-
16	1800	-	-	-	-	-	186.9	3.2	0.2005	3.3623	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	225.0	2.7	0.2740	3.6536	-	-	-	-	-	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	224.1	2.7	0.2902	3.4664	-	-	-	-	-	-

Annexes 58 à 63 (Ft=6,4)

Annexes 63		Coquille $\alpha = 15^\circ$					Coquille $\alpha = 15^\circ$				
		Fr = 7.6		Cf = -64 mm			Fr = 7.6		Cf = -64 mm		
		Frr = 9.3		Ls = 350 mm			Frr = 9.3		Ls = 450 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	170.4	11.5	-0.6357	4.9000	1.5	-	-	-	-	-
8	600	175.2	6.6	-0.3670	4.5804	-	-	-	-	-	-
9	700	181.4	5.1	0.1409	3.4770	0.0	179.6	4.7	-0.0181	3.3814	0.0
10	800	183.8	5.0	-0.0464	3.3590	-	180.6	4.4	0.1170	3.3987	-
11	900	185.9	4.1	-0.1060	3.3250	0.0	182.8	4.2	0.1580	3.4078	0.0
12	1000	186.1	3.7	0.0090	3.2351	-	186.1	3.8	0.2278	3.3302	-
13	1200	188.2	3.5	0.1084	3.3290	-	187.1	3.4	0.0990	3.3082	-
14	1400	189.7	3.2	0.2970	3.5190	-	187.3	3.3	0.1661	3.2420	-
15	1600	188.5	3.1	0.2211	3.6490	-	-	-	-	-	-
16	1800	189.1	3.1	0.1640	3.4140	-	187.2	3.2	0.1840	3.3169	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	188.6	3.0	0.2040	3.1188	-	187.7	3.0	0.1273	3.3950	-

Annexes 64 à 69 (Ft=7,6)

Annexes 64		Coquille $\alpha = 15^\circ$					Coquille $\alpha = 15^\circ$				
		Fr = 7.6		Cf = -96 mm			Fr = 7.6		Cf = -96 mm		
		Frr = 9.3		Ls = 450 mm			Frr = 9.3		Ls = 550 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	600	172.4	13.7	-0.6540	6.1791	-	-	-	-	-	-
9	700	178.3	6.6	-0.3257	6.2880	0.0	129.3	5.4	-0.3881	3.8003	0.0
10	800	183.8	4.8	0.2447	3.4879	-	179.3	5.3	0.0516	4.2732	-
11	900	185.1	4.1	0.1518	3.3746	-	183.9	4.4	0.0056	3.2593	-
12	1000	186.3	4.4	-0.1190	3.4055	-	181.7	3.0	0.2820	3.3582	-
13	1200	188.2	3.8	0.0733	3.1694	-	187.0	3.6	0.1087	3.1800	-
14	1400	187.6	3.4	0.0935	3.4086	-	109.5	4.0	-0.1567	3.0576	-
15	1600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	1800	182.5	3.4	0.1306	3.1599	-	189.9	3.3	0.1674	3.3221	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	188.2	3.1	0.2330	3.4672	-	189.6	3.3	0.1152	3.2713	-

Annexes 64 à 69 (Ft=7,6)

Annexes 65		Coquille $\alpha = 15^\circ$					Coquille $\alpha = 15^\circ$				
		Fr = 7.6		Cf = -96 mm			Fr = 7.6		Cf = -96 mm		
		Frr = 9.3		Ls = 650 mm			Frr = 9.3		Ls = 750 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	800	177.7	4.4	-0.0653	3.0713	-	-	-	-	-	-
11	900	182.8	4.4	-0.2096	3.3549	0.0	187.4	4.2	-0.0124	3.0880	0.0
12	1000	184.9	4.4	0.1623	3.0544	-	190.9	4.5	0.1315	3.2360	-
13	1200	185.1	4.1	0.0074	3.1547	-	194.6	4.2	-0.0326	3.1024	-
14	1400	186.6	3.9	-0.0121	3.2183	-	194.3	4.1	0.1637	3.2270	-
15	1600	-	-	-	-	-	196.9	4.3	0.1936	3.1060	-
16	1800	188.1	3.6	0.1376	3.4014	-	197.3	3.8	0.0939	3.3826	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	-	-	-	-	-	199.2	3.7	-0.0990	3.2420	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	199.6	3.4	0.0942	3.0114	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	187.5	3.4	0.1480	3.2550	-	196.7	3.6	0.2198	3.3350	-

Annexes 64 à 69 (Ft=7,6)

Annexes 66		Coquille $\alpha = 30^\circ$					Coquille $\alpha = 30^\circ$				
		Fr = 7.6		Cf = -64 mm			Fr = 7.6		Cf = -64 mm		
		Frr = 9.3		Ls = 250 mm			Frr = 9.3		Ls = 300 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	157.8	8.8	-0.0875	3.1110	-	167.4	7.1	-0.0179	3.0290	-
7	500	156.4	8.4	0.2000	3.4220	0.0	161.5	6.4	0.0640	2.9135	0.0
8	600	173.3	11.2	0.2630	3.6000	-	165.6	8.2	0.2482	3.5120	-
9	700	186.2	10.0	0.1750	3.3710	0.0	182.0	9.2	0.4140	4.1650	0.0
10	800	188.2	6.1	0.1590	3.8401	-	187.2	6.5	0.0470	3.6690	-
11	900	189.8	4.4	0.0930	4.3080	0.5	189.4	4.0	0.1680	3.4730	-
12	1000	188.2	3.5	0.1530	3.4060	-	189.6	3.3	0.1980	3.2670	-
13	1200	187.9	3.1	0.1410	3.3190	-	190.8	3.1	0.2590	3.4120	-
14	1400	188.8	3.2	0.1548	3.4750	-	188.6	3.0	0.2190	3.4750	-
15	1600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	1800	188.0	3.0	0.2280	3.6050	-	188.7	2.9	0.2260	3.4870	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	186.9	3.0	0.2000	3.2840	-	188.1	2.7	0.1920	3.6320	-

Annexes 64 à 69 (Ft=7,6)

Annexes 67		Coquille $\alpha = 30^\circ$					Coquille $\alpha = 30^\circ$				
		Fr = 7.6		Cf = -64 mm			Fr = 7.6		Cf = -96 mm 0.0		
		Frr = 9.3		Ls = 350 mm			Frr = 9.3		Ls = 300 mm 0.0		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	167.6	4.9	0.0790	3.2420	1.0	160.6	7.9	-0.0810	3.0845	2.0
8	600	166.0	6.2	0.0250	3.1510	-	162.2	8.7	0.1103	3.6178	-
9	700	176.1	7.4	0.2610	3.6140	0.0	180.8	10.0	0.2582	3.7040	1.5
10	800	183.0	6.4	0.2233	3.7130	-	187.7	7.1	0.1226	3.8776	-
11	900	188.7	4.5	0.1670	3.5530	-	189.4	4.7	0.1841	3.2782	0.0
12	1000	190.2	3.5	0.1480	3.3020	-	189.7	3.7	0.1978	3.5889	-
13	1200	191.2	3.1	0.2110	3.2350	-	190.6	3.2	0.1993	3.3164	-
14	1400	189.4	2.9	0.2080	3.6620	-	188.8	3.2	0.2342	3.4995	-
15	1600	-	-	-	-	-	188.0	3.2		3.5831	-
16	1800	189.2	2.9	0.2790	3.4990	-	-	-	-	-	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	188.4	2.7	0.3190	3.5840	-	189.0	3.0	0.0000	3.0000	-

Annexes 64 à 69 (Ft=7,6)

Annexes 68		Coquille $\alpha = 30^\circ$					Coquille $\alpha = 30^\circ$				
		Fr = 7.6		Cf = -96 mm			Fr = 7.6		Cf = -96 mm		
		Frr = 9.3		Ls = 350 mm			Frr = 9.3		Ls = 450 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	162.2	5.9	-0.4860	2.9949	1.5	-	-	-	-	-
8	600	161.7	6.0	0.1121	3.5257	-	178.4	4.6	0.0186	3.2839	-
9	700	171.4	8.0	0.3183	3.1830	0.0	179.2	6.1	0.0295	3.1591	0.0
10	800	181.0	7.4	0.0711	3.2859	-	185.3	6.6	0.0042	3.0600	-
11	900	186.3	5.4	0.1390	3.5432	-	189.3	5.3	-0.0608	3.5458	-
12	1000	187.7	4.1	0.0406	3.9620	-	134.3	3.3	0.0540	3.4700	-
13	1200	187.8	3.2	0.0711	3.6873	-	121.6	3.8	0.1082	3.1003	-
14	1400	187.0	3.2	0.2590	3.4849	-	133.4	3.5	0.1662	3.3105	-
15	1600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	1800	188.3	3.0	0.1389	3.4660	-	149.5	3.3	0.1326	3.4127	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	186.6	3.0	0.2022	3.4281	-	195.1	3.1	0.1676	3.1466	-

Annexes 64 à 69 (Ft=7,6)

Annexes 69		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 7.6		Cf = -32 mm			Fr = 7.6		Cf = -64 mm		
		Frr = 9.3		Ls = 250 mm			Frr = 9.3		Ls = 250 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	159.4	8.1	-0.1420	2.9030	2.5	-	-	-	-	-
6	400	152.2	9.2	0.1082	2.9740	-	152.6	8.7	-0.1000	3.2610	-
7	500	147.5	12.5	0.2285	3.1030	2.5	157.5	12.7	0.4900	4.0990	1.0
8	600	180.4	17.0	0.3430	3.0810	-	184.6	15.3	0.2500	3.0100	-
9	700	181.8	11.7	0.0220	3.0810	3.0	190.0	11.1	0.1420	3.3320	2.0
10	800	187.0	6.9	0.0175	3.2910	-	12.0	6.4	0.0365	3.0900	-
11	900	189.6	4.1	-0.1750	4.2930	0.5	189.1	4.3	-0.0060	3.5860	0.5
12	1000	190.4	3.1	0.1841	3.6050	-	12.0	3.8	0.0300	3.4270	-
13	1200	192.1	2.9	0.2800	3.4690	0.0	189.7	3.6	0.1370	3.1810	1.0
14	1400	190.6	2.7	0.3130	3.7460	-	12.0	3.6	0.0800	3.1900	-
15	1600	-	-	-	-	-	12.0	3.4	0.0890	3.2781	0.0
16	1800	189.9	2.7	0.3190	3.4770	-	12.0	3.3	0.1550	3.3619	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	189.0	2.6	0.3360	3.9220	-	188.6	3.3	0.1340	3.4001	-

Annexes 70 à 72 (Ft=7,6)

Annexes 70		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 7.6		Cf = -64 mm			Fr = 7.6		Cf = -64 mm		
		Frr = 9.3		Ls = 300 mm			Frr = 9.3		Ls = 350 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	165.2	6.7	0.0087	3.0820	-	-	-	-	-	-
7	500	158.6	8.2	0.2870	3.4570	2,5	147.4	8.1	0.1550	3.1580	-
8	600	175.2	12.0	0.4190	3.7980	-	155.1	12.0	0.2378	3.4030	-
9	700	191.4	10.8	0.1820	3.2680	3.0	169.8	11.3	0.1002	3.2000	0.0
10	800	189.3	6.4	0.1800	3.4320	-	171.8	7.2	0.1005	4.2230	-
11	900	190.5	3.9	0.0433	3.3820	-	170.6	4.0	0.1110	3.4140	-
12	1000	190.1	3.3	0.1430	3.5350	-	171.3	3.3	0.0015	3.7110	-
13	1200	188.4	2.7	0.3110	3.7540	-	172.8	3.0	0.1310	3.4090	-
14	1400	189.7	2.7	0.3580	3.7390	-	173.0	2.9	0.2298	3.4120	-
15	1600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	1800	189.1	2.6	0.3250	3.8840	-	172.6	2.8	0.2650	3.4820	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	188.5	2.6	0.3870	3.9440	-	171.4	2.8	0.2497	3.3370	-

Annexes 70 à 72 (Ft=7,6)

Annexes 71		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 7.6		Cf = -96 mm			Fr = 7.6		Cf = -96 mm		
		Frr = 9.3		Ls = 250 mm			Frr = 9.3		Ls = 300 mm		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	157.4	10.3	0.2269	3.5176	-	-	-	-	-	-
7	500	158.9	11.8	0.5496	4.5181	2.0	156.5	7.6	-0.1017	3.5066	0.0
8	600	184.2	15.5	0.3260	4.9685	-	171.9	12.7	0.5553	3.8739	-
9	700	193.3	11.9	-0.0426	3.5189	0.0	189.4	11.9	0.1796	3.2669	-
10	800	192.1	8.1	0.1085	3.6261	-	187.8	7.6	0.1453	3.2044	-
11	900	193.1	5.4	0.0906	3.0220	-	187.9	4.6	0.0922	3.4240	-
12	1000	193.8	5.2	0.0131	3.1881	-	188.1	3.7	0.1364	3.5851	-
13	1200	193.9	5.3	-0.0866	2.8393	-	190.5	3.2	0.2476	3.3589	-
14	1400	192.3	5.0	0.0104	2.7852	-	189.9	3.1	0.2550	3.4452	-
15	1600	192.5	4.4	-0.0050	2.9684	-	190.3	3.1	0.3152	3.3047	-
16	1800	193.1	5.3	-0.0196	2.9300	-	189.9	3.0	0.2347	3.4521	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	191.4	5.0	-0.0941	3.0114	-	190.1	3.1	0.1503	3.1827	-

Annexes 70 à 72 (Ft=7,6)

Annexes 72		Coquille $\alpha = 45^\circ$					Coquille $\alpha = 45^\circ$				
		Fr = 7.6		Cf = -96 mm			Fr =		Cf =		
		Frr = 9.3		Ls = 350 mm			Frr =		Ls =		
prise #	x* (mm)	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz	P (mm)	σ (mm)	Ad -	k -	fp hz
1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	500	165.0	6.1	0.1653	3.1088	1.5	-	-	-	-	-
8	600	164.4	8.3	0.3303	3.4307	-	-	-	-	-	-
9	700	179.3	10.7	0.2387	3.4826	0.0	-	-	-	-	-
10	800	186.5	8.1	0.0636	3.5929	-	-	-	-	-	-
11	900	187.3	5.1	0.2665	3.1650	-	-	-	-	-	-
12	1000	188.8	3.7	0.1804	3.4847	-	-	-	-	-	-
13	1200	190.8	3.0	0.2775	3.4950	-	-	-	-	-	-
14	1400	188.6	3.0	0.2810	3.5274	-	-	-	-	-	-
15	1600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	1800	187.9	2.9	0.1760	3.4272	-	-	-	-	-	-
17	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	2800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	3600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4000	187.2	2.8	0.2386	3.5488	-	12.0				