

## Communication 2

LABORATOIRE DE CONSTRUCTIONS HYDRAULIQUES

Département de Génie Civil

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne



# RESSAUT HYDRAULIQUE FORCÉ PAR SEUIL

Nicola-V. BRETZ

Directeur du Laboratoire :  
Prof. R. Sinniger

LAUSANNE, 1988



P R E F A C E

-----

En relation avec la réalisation d'ouvrages hydrauliques, l'ingénieur se voit très souvent confronté avec de l'eau s'écoulant à grande vitesse. Surtout à l'aval des réservoirs artificiels, soit à la sortie d'une vidange de fond, soit au pied d'un évacuateur de crues, des grandes vitesses d'écoulement sont inévitables. Pour protéger le lit naturel aval, des dispositifs constructifs doivent permettre la dissipation au moins d'une partie de l'énergie inhérente à l'eau s'écoulant à grande vitesse. Bien que de nombreuses manières pour dissiper cette énergie sont connues depuis longtemps, l'analyse détaillée des phénomènes hydrauliques y relatifs n'est pas achevée à ce jour. Au contraire, seuls quelques cas très simples, comme par exemple le ressaut hydraulique, peuvent être calculés de manière approximative.

Pour mieux connaître le phénomène de la dissipation d'énergie, le ressaut forcé par seuil est analysé dans la présente étude. Une observation soigneuse des différents types d'écoulements dans le modèle hydraulique, une campagne de mesures détaillées des caractéristiques de l'écoulement et finalement une formulation analytique des résultats ont su mettre en évidence les particularités d'un tel ressaut.

  
Prof. R. Sinniger



R E S U M E

-----

Dans les constructions hydrauliques, il est très souvent question de restituer l'eau à un cours d'eau, après l'avoir utilisée. Cette restitution ne peut pas se faire sans autre : si l'eau est rejetée avec de grandes vitesses, elle risque d'engendrer une érosion pouvant causer d'importants dégâts. Ainsi apparaît la nécessité de réaliser un bassin amortisseur pour briser les effets dévastateurs de l'eau libérée avec force. A l'intérieur de cet ouvrage, le ressaut hydraulique, siège de la dissipation d'énergie, est provoqué, avec l'aide d'un seuil. Le but de ce dernier est de favoriser la formation du ressaut hydraulique, d'accroître la dissipation d'énergie, de rendre le dissipateur plus compact et d'améliorer la stabilité du processus. De nombreuses configurations de bassin sont possibles; le cas étudié concerne un canal horizontal prismatique de section rectangulaire, à l'intérieur duquel un seuil continu est placé.

Les objectifs de cette recherche sont les suivants :

- 1) essayer de mieux comprendre et connaître le ressaut forcé par seuil continu en tant que phénomène hydraulique et
- 2) établir des principes de dimensionnement d'un bassin dissipateur avec seuil.

Les expériences sur modèle réduit en laboratoire se sont déroulées dans un canal de 10.8 m de long, 0.5 m de large et 0.7 m de haut; il est alimenté par un circuit fermé dont le débit maximal est de 400 l/s. Le nombre de Froude caractérisant l'écoulement a varié entre 4 et 14.

Une classification complète des différents types de ressaut forcé par seuil est présentée. Dans une première approche, cinq types de ressaut forcé sont étudiés : le ressaut forcé type A (analogue au ressaut classique), l'onde (ressaut minimal) et trois types intermédiaires. La répartition des vitesses met en évidence les zones de rouleaux de surface et de

fond, là où les vitesses sont négatives. La distribution des pressions montre que la force exercée sur la face amont du seuil est d'autant plus importante que le rouleau de surface est court.

Trois types de ressaut forcé sont retenus dans une seconde et nouvelle approche tenant compte non seulement des profils de surface mais aussi de la distribution des vitesses près du fond à l'aval du seuil : les ressauts forcés types A, B et B<sub>min</sub>; ces deux derniers sont plus courts que le type A et requièrent une moindre hauteur d'eau aval. Ils correspondent à un écoulement dont le courant principal à l'aval du seuil (avec des vitesses élevées) est encore proche de la surface. La zone du rouleau de fond derrière le seuil est caractérisé par une recirculation d'eau; son mouvement général a été mis en évidence à l'aide de mesures de direction des lignes de courant.

Des principes de dimensionnement des bassins avec seuil sont établis pour les trois types de ressaut forcé retenus. Ils concernent le rapport des hauteurs conjuguées pour diverses hauteurs relatives du seuil. L'effet de ce dernier s'est avéré ne dépendre que de ces hauteurs relatives. Dans tous les cas, le rapport des hauteurs conjuguées pour le ressaut forcé par seuil est inférieur à celui du ressaut classique correspondant. L'effet de frottement a été séparé de celui du seuil : la relation des hauteurs conjuguées pour le ressaut forcé par seuil a ainsi pu être généralisée. La position du seuil dans le bassin et la longueur de celui-ci ne dépendent que du nombre de Froude amont. La distance entre le pied du ressaut et le seuil est inférieure à la longueur du rouleau du ressaut classique; la longueur du bassin est plus courte celle du ressaut classique. L'efficacité du ressaut forcé par seuil est plus élevée que celle du ressaut classique correspondant. Une étude portant sur l'érosion possible à l'aval du seuil sur un lit meuble a montré l'importance de protéger le fond du cours d'eau, sur une distance au-delà du seuil égale à la longueur du rouleau de fond. Le choix d'un des trois types de ressaut forcé par seuil dépend des conditions hydrologiques, géologiques, limnologiques et économiques de l'environnement dans lequel le bassin amortisseur avec seuil est réalisé.

T A B L E D E S M A T I E R E S

-----  
Page

VII	Préface
IX	Résumé
XI	Table des matières
XVII	Notations et abréviations
.	
1	1. INTRODUCTION
5	2. REVUE DE LA LITTERATURE
5	2.1 INTRODUCTION
5	2.2 PRESENTATION DU RESSAUT HYDRAULIQUE
5	2.21 Ressaut classique
8	2.22 Ressaut forcé
9	2.3 REVUE DE LA LITTERATURE
9	2.31 Rappel historique jusqu'à 1900
10	2.32 Développements jusqu'à la 2 <sup>e</sup> Guerre Mondiale
12	2.33 Travaux récents
12	1) ressaut classique et bassins amortisseurs
17	2) marches positives et négatives
23	3) blocs - seuils dentés
27	4) seuils continus
40	2.4 DIRECTIONS
43	3. INSTALLATIONS EXPERIMENTALES
	ESSAIS PRELIMINAIRES DU RESSAUT CLASSIQUE
43	3.1 INTRODUCTION

43	3.2	DESCRIPTION DES INSTALLATIONS FIXES
43	3.21	Généralités
43	3.22	Bassin d'alimentation
45	3.23	Canal de mesures
48	3.24	Canal de fuite
48	3.25	Circulation d'eau
50	3.26	Seuils
52	3.27	Vanne plane mobile
54	3.3	INSTRUMENTS DE MESURES
54	3.31	Généralités
54	3.32	Chariots porte-instruments
55	3.33	Limnimètre
56	3.34	Moulinets
58	3.35	Sonde de direction verticale
58	3.36	Sonde de direction horizontale
59	3.37	Prises de pression
60	3.38	Sonde de pression
61	3.4	ESSAIS PRELIMINAIRES DE BASE
61	3.41	Généralités
61	3.42	Domaine hydraulique
63	3.43	Détermination de la hauteur d'eau $h_1$ dans la configuration avec déversoir standard
68	3.44	Détermination de la hauteur d'eau $h_1$ dans la configuration du canal avec vanne plane
68	3.5	ESSAIS PRELIMINAIRES DU RESSAUT CLASSIQUE DANS LA CONFIGURATION DU CANAL AVEC DEVERSOIR STANDARD
68	3.51	Généralités
69	3.52	Description des essais
70	3.53	Mesures
70	3.54	Résultats
79	3.6	ESSAIS PRELIMINAIRES DU RESSAUT CLASSIQUE DANS LA CONFIGURATION DU CANAL AVEC VANNE PLANE
79	3.61	Généralités
80	3.62	Description des essais
80	3.63	Résultats

84	3.7	CONCLUSION
87	4.	RESSAUT FORCE PAR SEUIL - ESSAIS PRELIMINAIRES
87	4.1	INTRODUCTION
88	4.2	DESCRIPTION DES CAS DE RESSAUT FORCE ET CLASSIFICATION
88	4.21	Cas de base
90	4.22	Combinaisons
90	4.23	Classification
97	4.3	INFLUENCE DE LA LARGEUR DU SEUIL SUR LES HAUTEURS CONJUGUEES
97	4.31	Introduction
100	4.32	Résultats
102	4.4	CORRECTION SUR LES HAUTEURS CONJUGUEES
108	4.5	VITESSES ET PRESSIONS DANS LE RESSAUT FORCE
108	4.51	Répartition axiale des vitesses
111	4.52	Pressions
113	4.6	NOUVELLE CLASSIFICATION
114	4.7	CONCLUSION
117	5.	RESSAUT FORCE PAR SEUIL - ETUDES DETAILLEES
117	5.1	INTRODUCTION
118	5.2	LIGNES D'EAU
118	5.21	Ressaut forcé type A
119	5.22	Ressaut forcé type $B_{min}$

120	5.3	DISTRIBUTION DES VITESSES
120	5.31	Ressaut forcé type A
121	5.32	Ressaut forcé type $B_{min}$
123	5.33	Comparaison
124	5.4	DIRECTIONS DES LIGNES DE COURANTS
125	5.41	Ressaut forcé type A
127	5.42	Ressaut forcé type $B_{min}$
129	5.43	Ressaut forcé type C
132	5.44	Axonométrie
132	5.5	EROSION
132	5.51	Introduction
134	5.52	Installations et essais
135	5.53	Commentaires
140	5.6	REPARTITION DES PRESSIONS
141	5.61	Ressaut forcé type A
142	5.62	Ressaut forcé type $B_{min}$
143	5.63	Pressions sur le seuil
144	5.64	Remarques sur les pressions
145	5.7	CONCLUSION
147	6.	<b>PRINCIPES DE DIMENSIONNEMENT</b>
147	6.1	INTRODUCTION
147	6.11	Généralités
148	6.12	Procédure des essais
149	6.13	Essais préliminaires
150	6.2	HAUTEURS CONJUGUEES
150	6.21	Limite de formation
152	6.22	Hauteurs conjuguées du ressaut forcé par seuil
157	6.23	Confirmation par d'autres essais

158	6.3	LONGUEURS DE BASSIN
162	6.4	EFFICACITE DU DISSIPATEUR
164	6.5	DISCUSSION DES RESULTATS
164	6.51	Hauteurs conjuguées
169	6.52	Longueurs
172	6.53	Efficacité
173	6.54	Recommandations
173	6.6	EXEMPLE DE CALCUL
175	6.6	CONCLUSION
177	7.	<b>CONCLUSION</b>
177	7.1	ENVIRONNEMENT
177	7.2	RAPPEL DES OBJECTIFS
177	7.3	PRINCIPAUX RESULTATS
177	7.31	Connaissance du ressaut forcé par seuil
180	7.32	Principes de dimensionnement
183	8.	<b>ANNEXES</b>
183	8.1	BIBLIOGRAPHIE
189	8.2	ETALONNAGE DE LA SONDE DE PRESSION
189	8.21	Influence de l'angle $\theta$
191	8.22	Influence de l'angle $\phi$
193	8.23	Lignes de charge et de pression le long du canal

195	8.3	EFFET DE FROTTEMENT SUR LES HAUTEURS CONJUGUEES DU RESSAUT CLASSIQUE
195	8.31	Introduction
195	8.32	Force de frottement
198	8.33	Evaluation de l'intégrale définie
199	8.34	Equation de Bélanger généralisée
201	8.35	Valeur limite du paramètre hydraulique $\Lambda$
202	8.36	Application au ressaut classique
205	8.4	PHOTOS D'ESSAIS
255	8.5	TABLE DES MESURES

NOTATIONS ET ABREVIATIONS

-----

Les notations et abréviations sont définies dans le texte à l'endroit où elles apparaissent la première fois. Dans la liste ci-après, il arrive qu'une abréviation ait plusieurs utilisations différentes, notamment lorsqu'elle est utilisée spécifiquement par un auteur auquel cas la référence bibliographique est donnée.

$A_0$	( $m^2$ )	section d'un diaphragme dans une conduite
$A_1$	( $m^2$ )	section courante d'une conduite
$b$	(m)	largeur du seuil
$B$	(m)	largeur du canal
$C_d$	(-)	coefficient de traînée
$C_p$	(-)	coefficient de pression
$D$	(m)	diamètre d'une conduite
$D_h$	(m)	diamètre hydraulique d'une conduite
$e$	(-)	coefficient d'espacement des blocs
$f$	(-)	coefficient de frottement
$f_0$	(-)	facteur de forme
$F$	(-)	nombre de Froude
$F_b$	(N)	force exercée sur les blocs
$F_c$	(N)	force équivalente du ressaut classique
$g$	( $m/s^2$ )	accélération gravitationnelle
$h$	(m)	hauteur d'eau
$h_b$	(m)	hauteur d'eau avec blocs [03]
$h_c$	(m)	hauteur critique d'eau
$h'$	(-)	pente de l'écoulement - courbe de remous
$H$	(m)	charge
$\Delta H$	(m)	perte de charge
$J_f$	(-)	pente de frottement
$J_s$	(-)	pente du canal
$k_s$	(mm)	rugosité équivalente de sable
$K$	(-)	facteur de position [41]
$l$	(m)	longueur du diaphragme
$L$	(m)	longueur en général
$m$	(-)	coordonnée longitudinale [39]
$n$	(-)	coordonnée verticale [39]

p	(N/m <sup>2</sup> )	pression
q	(m <sup>2</sup> /s)	débit spécifique par unité de largeur
Q	(m <sup>3</sup> /s)	débit
R	(-)	nombre de Reynolds
R	(m)	rayon de conduite
R <sub>h</sub>	(m)	rayon hydraulique
s	(m)	hauteur du seuil
S	(-)	hauteur relative du seuil
V	(m/s)	vitesse
x	(m)	coordonnée longitudinale
$\tilde{x}$	(-)	coordonnée adimensionnelle [39]
y	(m)	coordonnée transversale
$\tilde{y}$	(-)	coordonnée adimensionnelle [39]
Y	(-)	rapport des hauteurs conjuguées
$\Delta Y$	(-)	diminution du rapport Y
z	(m)	coordonnée verticale
$\alpha$	(-)	coefficient dépendant du type de ressaut
$\beta$	(-)	idem
$\gamma$	(N/m <sup>3</sup> )	poïds spécifique
$\delta$	(-)	pente moyenne
$\Delta$	(-)	différence
$\zeta$	(-)	coefficient de correction
$\eta$	(-)	efficacité
$\theta$	(-)	angle dans le plan horizontal
$\kappa$	(-)	rapport de longueur du diaphragme
$\lambda$	(-)	longueur relative
$\Lambda$	(-)	facteur caractérisant l'écoulement
$\nu$	(m <sup>2</sup> /s)	viscosité cinématique
$\rho$	(kg/m <sup>3</sup> )	masse volumique
$\sigma$	(-)	vitesse relative unitaire
$\tau$	(-)	coordonnée relative unitaire
$\phi$	(-)	angle dans le plan vertical
$\chi$	(-)	coordonnée longitudinale relative
$\phi$	(-)	coefficient de correction
$\omega$	(-)	rapport hauteur/largeur

Indices

-----

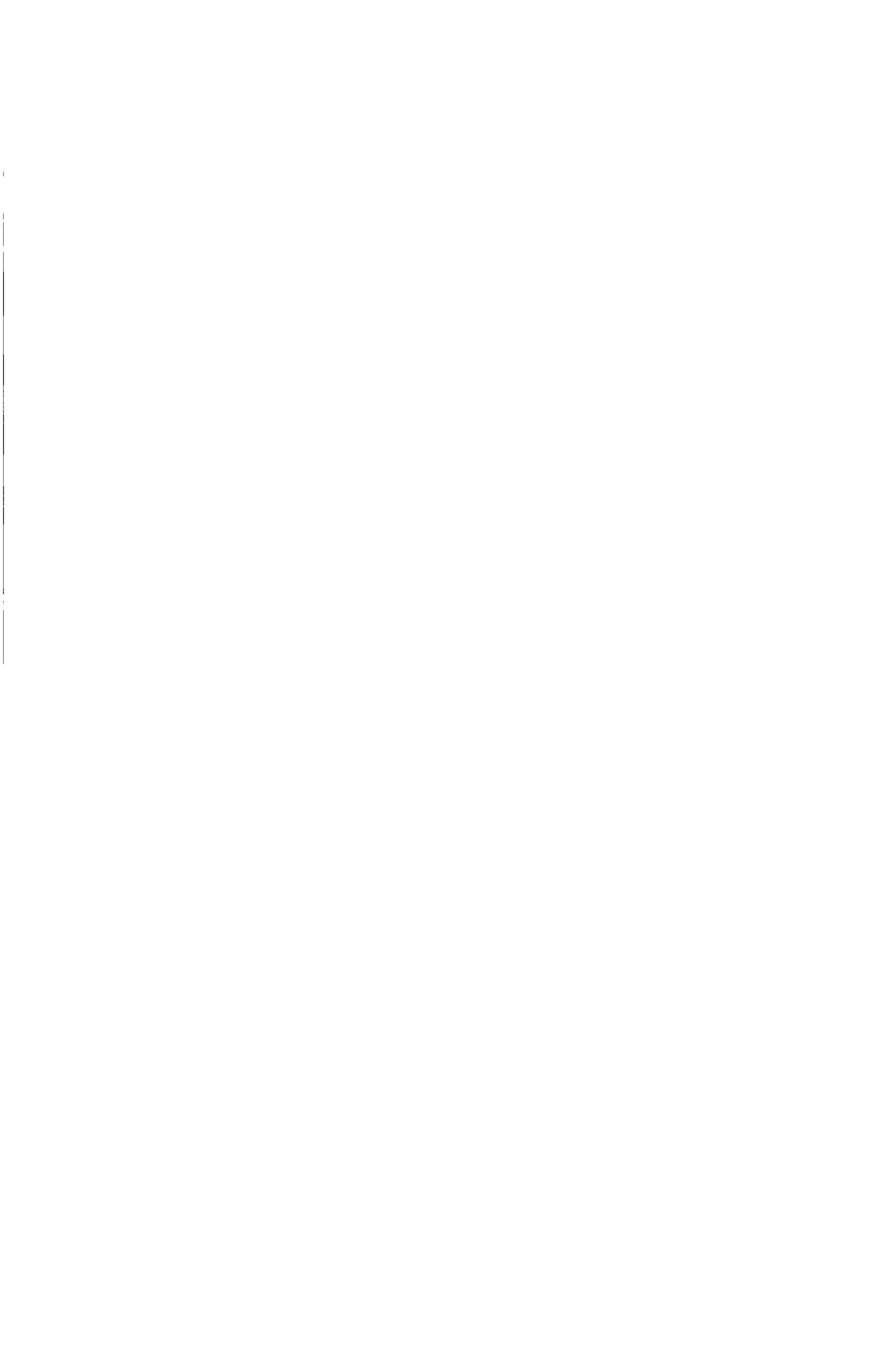
A	ressaut type A
B	ressaut type B
B	bassin (longueur)
B <sub>min</sub>	ressaut type B <sub>min</sub>
c	critique
f	frottement
i	quelconque
l	limite
max	maximum
min	minimum
r, R	rouleau
RC	ressaut classique
rf, RF	rouleau de fond
RFs	ressaut forcé par seuil
s, S	seuil
v	vanne
0	section de référence
1	section à l'amont du ressaut
2	section à l'aval du ressaut

.

# RESSAUT HYDRAULIQUE FORCE PAR SEUIL

## CHAPITRE 1

### INTRODUCTION



# CHAPITRE 1

-----

## INTRODUCTION

Dans le domaine des constructions hydrauliques, il est très souvent question de restituer l'eau à un cours d'eau. La Figure 1.1 en présente un exemple typique. Un barrage sur un cours d'eau crée une retenue; il est muni d'un déversoir pour laisser passer les débits de crues que la retenue ne peut accumuler. Au pied du déversoir se situe le bassin amortisseur proprement dit, conçu pour que la dissipation d'énergie ait lieu à l'intérieur. Un changement de régime de l'écoulement intervient dans le dissipateur : à son entrée, le régime est torrentiel, à sa sortie il est fluvial: cette transition s'appelle ressaut hydraulique et est le siège de la dissipation d'énergie. Pour en stabiliser la position dans le bassin, un seuil peut être présent. A l'aval du dissipateur, la rivière coule à nouveau sur son lit naturel: il importe donc que la restitution soit réalisée dans de bonnes conditions, i.e. en évitant l'érosion du fond ou du moins de la contrôler.

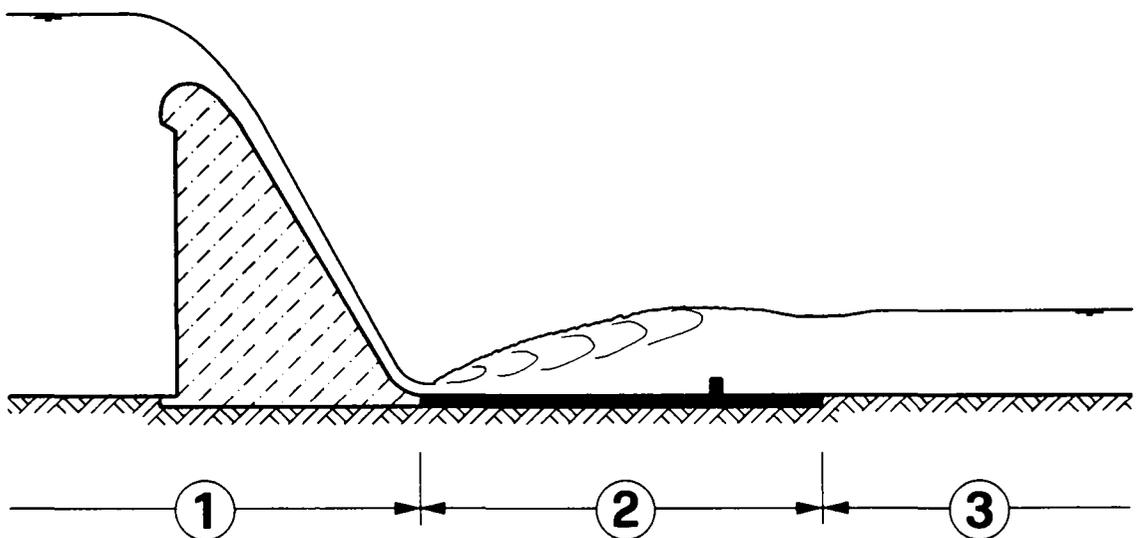


Figure 1.1 : Schéma typique de constructions hydrauliques. 1) barrage avec déversoir, 2) bassin amortisseur avec seuil, 3) lit naturel de la rivière.

Le bassin amortisseur est donc l'élément central de la dissipation d'énergie. Le seuil est le dispositif particulier lié à un tel ouvrage pour favoriser la formation du ressaut dans le bassin, rendre le dissipateur plus compact, améliorer la stabilité du processus sous des variations de paramètres et augmenter la capacité de dissipation. Le champ de la présente étude s'étend ainsi de la position où l'écoulement entre dans le bassin amortisseur, à l'endroit où il est restitué au cours d'eau, correspondant à la zone 2 de la Figure 1.1.

De plus, le domaine d'investigations se restreint au cas simple de bassin horizontal prismatique de section rectangulaire avec un seuil continu situé vers l'extrémité aval du bassin. De nombreuses autres configurations sont possibles (cf. par exemple Figure 2.3); mais, pour les deux objectifs visés énoncés ci-dessous, la recherche se limitera à ce cas simple. D'autres points intervenant dans la pratique des constructions hydrauliques sont laissés de côté, comme les incertitudes sur les débits de dimensionnement, la nature du lit du cours d'eau et les conditions de fondations, les problèmes constructifs relatifs au béton, la gestion d'un ensemble d'aménagements en cascade.

Pour être étudié sur modèle en laboratoire, le ressaut forcé par seuil est donc ramené à la configuration la plus simple : canal horizontal prismatique de section rectangulaire, hydrauliquement lisse et muni d'un seuil transversal continu. Dans l'intention de ne pas s'éloigner de la réalité physique du phénomène du ressaut, ce travail est basé avant tout sur une recherche expérimentale : de nombreux essais sont exécutés en laboratoire pour apporter une contribution aux constructions hydrauliques. L'exploitation des mesures par le calcul et la réflexion ont abouti à une conception nouvelle du ressaut forcé par seuil. Les essais en laboratoire font ressortir la première caractéristique du ressaut hydraulique : les fluctuations inhérentes au phénomène; en effet, la transition entre les régimes torrentiel et fluvial est très turbulente, avec une recirculation d'eau d'aval en amont dans le rouleau de surface et des variations momentanées importantes de toutes les grandeurs dans toutes les directions. Toutefois l'intérêt

est porté principalement sur la structure grossière du ressaut hydraulique : c'est-à-dire sur l'allure générale, les conditions aux extrémités et les profils moyens des diverses grandeurs mesurées.

De nombreuses recherches ont déjà été consacrées au ressaut hydraulique; mais quelques aspects sont restés inexploités comme il ressort de la revue de la littérature, notamment en ce qui concerne le ressaut forcé par seuil. Dans l'idée de combler cette lacune, notre recherche a deux objectifs principaux :

- 1) essayer de mieux comprendre et connaître le ressaut forcé par seuil continu en tant que phénomène hydraulique, et
- 2) établir des principes de dimensionnement pour un bassin dissipateur avec seuil.

Le premier objectif est poursuivi pour approcher le ressaut forcé par seuil avec des moyens simples mais efficaces. Les profils de surface, de vitesses, de pressions et de lignes de courant sont élaborés pour mettre en évidence l'écoulement interne du phénomène, montrer ce qui s'y passe et le décrire. Le deuxième répond à un besoin d'utilité pratique de la recherche, c'est pourquoi des bases de dimensionnement sont proposées pour ce type d'ouvrage. Les résultats portent sur les hauteurs d'eau aux extrémités du bassin, les longueurs et l'efficacité d'une telle construction : ce sont les éléments importants dans sa conception.

L'étude s'organise comme suit :

Dans le chapitre 2, une revue de la littérature présente les recherches déjà effectuées et signifie la voie à suivre pour atteindre les objectifs mentionnés. Le chapitre 3 décrit en détail les installations expérimentales ainsi que les instruments de mesures utilisés; il présente également les essais préliminaires touchant le ressaut classique. Une première

approche du ressaut forcé par seuil est proposée au chapitre 4. Une classification des différents types de ressaut forcé selon sa structure et son impact sur le cours d'eau à l'aval, est établie et une analyse globale des caractéristiques d'écoulement est présentée. De cette classification, trois types de ressaut forcé par seuil sont retenus. Au chapitre 5, une deuxième approche détaille ces trois types particuliers de ressaut forcé par seuil : les profils de surface, de vitesses, de lignes de courant et de pressions sont analysés. Une description des effets de l'érosion complète ce chapitre. Des principes de dimensionnement sont présentés au chapitre 6 pour les trois types de ressaut forcé; ils concernent les hauteurs conjuguées, l'efficacité du dissipateur, la longueur du bassin et la position du seuil à l'intérieur. Les principaux résultats obtenus sont rappelés au chapitre 7.

RESSAUT HYDRAULIQUE  
FORCE PAR SEUIL

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTERATURE



## C H A P I T R E 2

-----

### REVUE DE LA LITTERATURE

#### 2.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, une revue de la littérature est proposée. Précédant la discussion des articles, le ressaut hydraulique classique et le ressaut forcé par seuil sont présentés pour permettre une meilleure compréhension des éléments exposés dans cette revue. Celle-ci se divise en trois parties : tout d'abord un rappel historique évoquant les premiers balbutiements de la recherche dans ce domaine jusqu'à l'aube du 20<sup>e</sup> siècle; puis les développements nouveaux au sujet du ressaut classique jusqu'à la 2<sup>e</sup> Guerre Mondiale; et enfin les travaux récents portant particulièrement sur le ressaut forcé par différents dispositifs. Pour conclure, une orientation est donnée sur les recherches entreprises dans le présent travail, en indiquant les points essentiels à développer et en y fixant les objectifs.

#### 2.2 DESCRIPTION DU RESSAUT HYDRAULIQUE

##### 2.21 Ressaut classique

Le ressaut classique (cf. Figure 2.1) est défini comme la transition d'un écoulement torrentiel à un écoulement fluvial dans un canal prismatique presque horizontal de section rectangulaire, sans obstacle ni chicane. Cette transition est caractérisée par une zone d'eau "saine" et un rouleau de surface avec une forte turbulence et un entraînement d'air, et est le siège d'une dissipation d'énergie considérable. C'est ce dernier aspect qui est important et qui est exploité dans les constructions hydrauliques.

D'autres appellations existent encore pour définir ce phénomène : ressaut libre, ressaut naturel ou ressaut normal. Dans

cette étude, seul le terme ressaut classique sera utilisé en se référant à la définition donnée ci-dessus.



Figure 2.1 : Le ressaut hydraulique classique ( $F_1=5.85$ ).

La Figure 2.2 définit les différents termes du ressaut classique pour un débit  $q$  par unité de largeur. La vitesse moyenne de l'écoulement est  $V=q/h$ , avec  $h$  la hauteur d'eau. Une quantité adimensionnelle caractérise cet écoulement : le nombre de Froude  $F$  défini par

$$(2.1) \quad F = V/\sqrt{gh}$$

où  $g$  est l'accélération gravitationnelle.

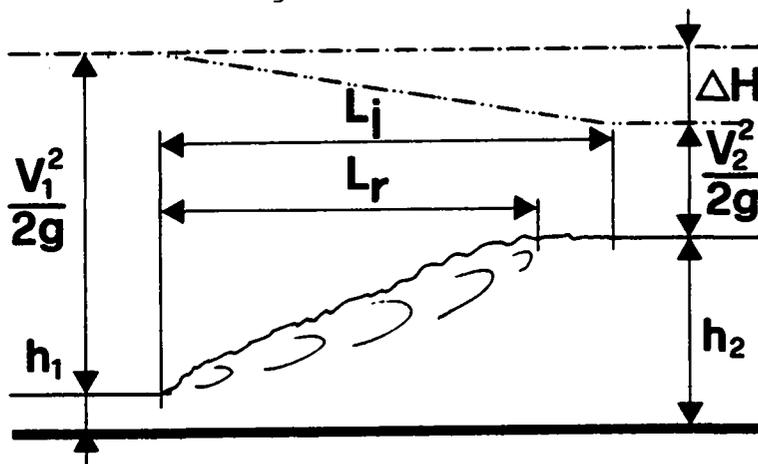


Figure 2.2 : Définition des termes pour le ressaut classique. Sections (1) amont et (2) aval, hauteur d'eau  $h$ , hauteur cinétique  $V^2/2g$ , perte de charge  $\Delta H$  et longueurs du rouleau  $L_r$  et du ressaut  $L_j$ , (-.-) ligne de référence, (-.-.-) ligne de charge simplifiée.

Dans les sections limitant le ressaut à l'amont (indice 1) et à l'aval (indice 2), les hauteurs d'eau respectivement  $h_1$  et  $h_2$  sont appelées hauteurs conjuguées. Elles sont reliées au nombre de Froude  $F_1$  au pied du ressaut par l'équation de Bélanger obtenue par l'application de l'équation de la quantité

de mouvement en négligeant le frottement entre les deux sections :

$$(2.2) \quad Y = h_2/h_1 = (\sqrt{1+8 F_1^2} - 1)/2.$$

Pour des nombres de Froude assez grands, cette équation peut également être simplifiée comme suit [20] :

$$(2.3) \quad Y = \sqrt{2} \cdot F_1 - 0.5, \quad F_1 > 3.$$

La longueur du rouleau  $L_r$  est la distance entre le pied amont du ressaut et l'endroit à l'aval où la composante horizontale de la vitesse superficielle est nulle. La longueur du ressaut  $L_j$  est par contre une grandeur difficile à définir car la fin du ressaut n'est pas connue a priori et son évaluation est subjective et varie d'un chercheur à l'autre. C'est pourquoi la longueur du rouleau  $L_r$  est préférée à celle du ressaut  $L_j$ ; il en sera encore autrement pour le ressaut forcé par seuil.

L'efficacité  $\eta$  d'un ressaut hydraulique de dissiper l'énergie mécanique est définie comme le rapport entre la perte de charge  $\Delta H$  et la charge amont  $H_1$  (cf. Figure 2.2) :

$$(2.4) \quad \eta = \Delta H/H_1 = (h_2 - h_1)^3 / (4h_1h_2), \text{ avec } 0 < \eta < 1,$$

où la charge amont  $H_1$  est donnée par l'équation de Bernoulli :

$$(2.5) \quad H_1 = h_1 + (V_1^2/2g).$$

Les désavantages du ressaut classique sont notamment la hauteur  $h_2$  considérable requise à l'aval pour sa formation, sa longueur et surtout son instabilité à rester en une position fixe pour de faibles variations de  $Q$ ,  $h_1$  et/ou  $h_2$ . En effet, par exemple, la moindre variation du niveau aval  $\Delta h_2$  suffit à faire avancer ou reculer le ressaut de sa position initiale. C'est pourquoi des dispositions constructives sont adoptées pour pallier à ces inconvénients.

## 2.22 Ressaut forcé

Etant donnés les désavantages du ressaut classique, divers dispositifs particuliers sont utilisés pour stabiliser l'apparition du ressaut hydraulique dans des conditions d'écoulement quelconques à un endroit précis (le bassin amortisseur), en essayant d'optimiser les performances, i.e. avoir le maximum d'efficacité, une hauteur d'eau aval et une longueur de bassin minimales. Pour cette raison, le ressaut est dit **forcé**. Les types les plus simples et les plus courants sont présentés à la Figure 2.3 : a) le seuil continu, obstacle monolithique occupant toute la largeur du radier sur un fond horizontal; b1) et b2) les marches négative et positive, le radier horizontal possède deux niveaux, le second étant inférieur resp. supérieur au premier; c) les blocs (ou aussi seuil denté), éléments de forme simple ou élaborée, disposés en une ou plusieurs rangées en travers du radier, y laissant un certain passage libre contrairement au seuil continu; d1) et d2) les combinaisons des trois types précédents.

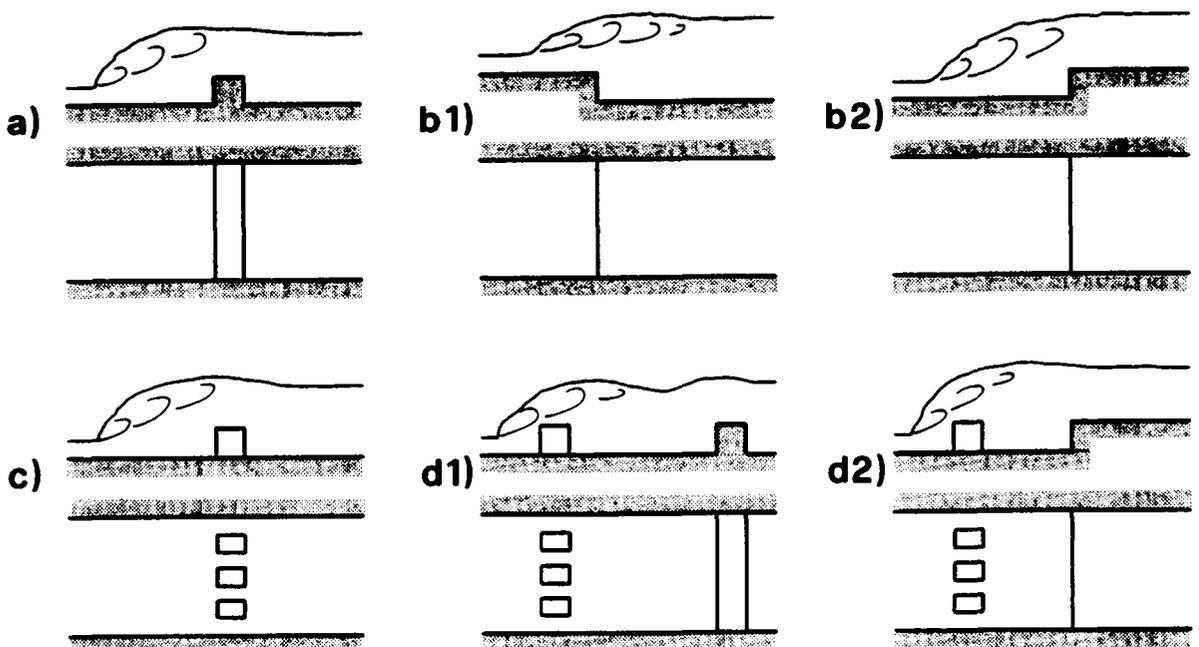


Figure 2.3 : Dispositifs courants provoquant le ressaut forcé : a) seuil continu, b1) marche négative, b2) marche positive, c) rangée de blocs, d1) combinaison rangée de blocs et seuil, d2) combinaison rangée de blocs et marche positive [36].

De nombreuses configurations sont ainsi possibles en utilisant l'un ou l'autre de ces dispositifs et en les combinant entre eux. D'autres types plus élaborés et sophistiqués de dissipateurs d'énergie sont répertoriés dans [63].

La Figure 2.4 présente les termes de hauteurs et de longueurs pour le ressaut forcé par seuil continu de section carrée, en comparaison avec ceux du ressaut classique. Différents cas d'écoulement sont possibles qui font intervenir principalement quatre paramètres : les niveaux d'eau amont  $h_1$  et aval  $h_2$ , la hauteur du seuil  $s$  et le nombre de Froude  $F_1$ .

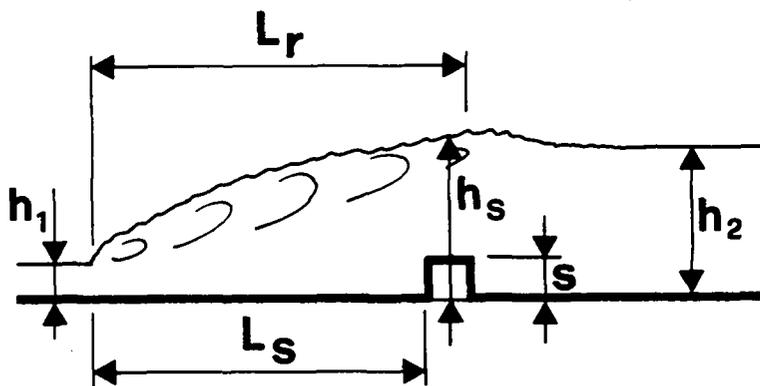


Figure 2.4 : Définition des termes pour le ressaut forcé par seuil :  $h_1$  hauteur amont,  $h_2$  hauteur aval,  $h_s$  hauteur au droit du seuil,  $s$  hauteur du seuil,  $L_r$  longueur du rouleau,  $L_s$  position du seuil par rapport au pied du ressaut.

## 2.3 REVUE DE LA LITTERATURE

### 2.31 Rappel historique jusqu'à 1900

Rouse et Ince [49] ont écrit un livre sur l'histoire de l'hydraulique. Ci-après en sont cités les principaux auteurs qui ont traité le ressaut hydraulique.

Léonard de Vinci (1452-1519) est le premier à avoir observé et décrit le ressaut hydraulique [in 49], sans analyser le phénomène de manière théorique. Trois siècles plus tard, un autre Italien, Venturi (1746-1822), fait mention [in 49] du phénomène comme moyen pour gagner de la hauteur de charge en vue de

l'irrigation. Quelques années plus tard, son compatriote Bidone (1781-1839) est le premier à s'être occupé systématiquement et à avoir analysé le ressaut [in 49] dont il est considéré comme le "père", le ressaut s'appelant du reste "salto di Bidone" en italien. Ses expériences datent de 1818 et concernent des écoulements avec des nombres de Froude autour de 2, i.e. dans des conditions proches de celles critiques, avec un ressaut faible. Dans ses hypothèses du théorème de la quantité de mouvement, il suppose la charge constante dans le ressaut hydraulique; ceci peut être admis pour des nombres de Froude proches de 2, mais n'est pas admissible de façon générale pour d'autres valeurs plus élevées du nombre de Froude.

Bélanger [in 49] (1789-1874) utilise correctement le théorème de la quantité de mouvement et obtient la formule bien connue qui porte son nom (cf. équ. 2.2) et que Bresse [07] (1822-1883) a révélé dans son "Cours de mécanique appliquée". Pour cette raison, la formule est parfois attribuée à Bresse. Bélanger semble être le premier à avoir utilisé la quantité adimensionnelle  $V^2/2gh$  comme un paramètre caractéristique de l'écoulement. D'autre part Bresse a aussi établi l'expression de la dissipation d'énergie due au ressaut en termes de hauteurs (cf. équ. 2.4), qui ne semble pas avoir attiré l'attention des chercheurs suivants, ceux-ci rejetant a priori une telle dissipation car leur champ d'investigations est limité à de faibles nombres de Froude.

Sur le continent américain, Merriman [in 49] (1848-1925) établit, suite à des essais en laboratoire, une formule empirique simple pour les hauteurs conjuguées. Au tournant du 20<sup>e</sup> siècle, l'application du théorème de la quantité de mouvement semble s'oublier au profit de celui de l'énergie (Bernoulli) et l'idée d'une dissipation d'énergie par le ressaut est pratiquement exclue.

### 2.32 Développement jusqu'à la 2<sup>e</sup> Guerre Mondiale

En Grande-Bretagne, Gibson [14] réalise des essais avec des écoulements dont le nombre de Froude atteint 8.6, et confirme la validité de l'équation de Bélanger et partant l'application

du théorème de la quantité de mouvement pour la détermination des hauteurs conjuguées. De plus, il introduit un facteur de correction pour les vitesses à cause de leur distribution non-uniforme.

Aux USA, Kennison [28] attire l'attention de ses contemporains sur le ressaut en l'analysant avec l'équation d'énergie. Dans la discussion de son papier en 1916, cette approche est critiquée et dans sa clôture, Kennison reconnaît son erreur, i.e. l'utilisation de l'équation de la conservation d'énergie pour déterminer les hauteurs conjuguées; il présente en conclusion sur un diagramme pour la première fois en termes adimensionnels le rapport des hauteurs conjuguées en fonction d'un paramètre qui s'appelle aujourd'hui nombre de Froude (cf. équ. 2.1). Ce type de diagramme est toujours utilisé grâce au caractère d'universalité des termes sans dimensions. L'approche de Bélanger et son équation (cf. équ. 2.2) sont définitivement acquises par les hydrauliciens. La dissipation d'énergie en termes de hauteurs est remise à jour par Stevens [62] en 1925 mais n'est pas vérifiée par des essais.

En Europe, Safranez [51] présente en 1927 les résultats des différentes recherches expérimentales connues à l'aide de diagrammes adimensionnels. Dans son article [52] de 1929, il cherche à déterminer les propriétés du ressaut quant à la longueur et à la dissipation d'énergie. Son domaine des nombres de Froude s'étend de 1.72 jusqu'à 19.1, soit plus du double des valeurs atteintes par ses prédécesseurs. Ses mesures confirment la validité de l'équation de Bélanger (cf. équ. 2.2). Safranez établit une formule empirique simple exprimant la longueur du ressaut rapportée à la hauteur d'eau à l'aval. Ses recherches sur la dissipation d'énergie de 1930 [53] ont une approche étrange : Safranez propose comme caractéristique la puissance dissipée rapportée au volume du ressaut! En 1933, Safranez [54] établit une équation empirique pour la longueur du rouleau de surface du ressaut classique :

$$(2.6) \quad L_R = 4.5 \cdot h_2,$$

où  $L_R$  et  $h_2$  sont définis à la Figure 2.2.

Bakhmeteff et Matzke [02] en 1936 essaient de présenter une théorie consistante sur le ressaut, en introduisant un facteur d'écoulement cinétique correspondant au carré du nombre de Froude et en définissant clairement les différents termes, notamment pour les longueurs. Leurs essais dans un canal étroit (150 mm de largeur) apportent comme nouveauté les profils de surface adimensionnels du ressaut. Par contre rien n'est dit sur la dissipation d'énergie, ni sur l'écoulement interne du ressaut classique.

Le mémoire de Citrini [10] en 1939 est une récapitulation critique des expériences réalisées jusqu'alors, des interprétations théoriques et des principales applications techniques concernant le ressaut hydraulique. Il s'agit d'une revue bibliographique intéressante et riche, présentant quantité de diagrammes résultant d'essais et une longue liste de formules empiriques pour les longueurs établies par divers auteurs. Son but est de faire le point sur les connaissances de son époque sur le phénomène du ressaut : 1) le principe de la quantité de mouvement est définitivement acquis pour déterminer les hauteurs conjuguées; 2) aucune solution analytique ne se vérifie pour calculer la longueur du rouleau (préférée à la longueur du ressaut car plus facilement déterminable) et des formules empiriques basées sur des expériences comblent cette lacune; 3) le concept de dissipation d'énergie fait péniblement son apparition et une solution théorique pour la quantifier existe mais ne semble pas être exploitée, le concept cité plus haut étant peut-être trop récent.

### 2.33 Travaux récents

Ce paragraphe est divisé en quatre parties traitant 1) le ressaut classique et les bassins amortisseurs, 2) les marches positives et négatives, 3) les blocs et 4) les seuils. Pour chacun de ces points, les principaux résultats obtenus depuis la 2<sup>e</sup> Guerre Mondiale sont présentés, discutés et illustrés à l'aide de figures.

#### 1) Ressaut classique et bassins amortisseurs

Bradley et Peterka, dans leur publication de 1957 [06], poursuivent les objectifs suivants : 1) déterminer l'applicabilité de la formule du ressaut pour toutes les configurations de bassins possibles rencontrées dans la pratique, 2) déterminer la longueur du ressaut et 3) observer, cataloguer et évaluer les différentes formes du ressaut. Ils ont effectué un travail impressionnant et leurs résultats ont fait l'objet d'une monographie du 'United States Bureau of Reclamation', monographie répandue et appliquée dans le monde entier. En ce qui concerne la longueur du ressaut  $L_j$ , ils recommandent leur courbe moyenne (cf. Figure 2.5) des essais qui croît pour  $2 < F_1 < 5$  puis reste à une valeur presque constante  $L_j/h_2 = 6$  pour  $5 < F_1 < 14$ , et enfin décroît légèrement au-delà. Quatre formes de ressaut sont distinguées et sont présentées à la Figure 2.6.

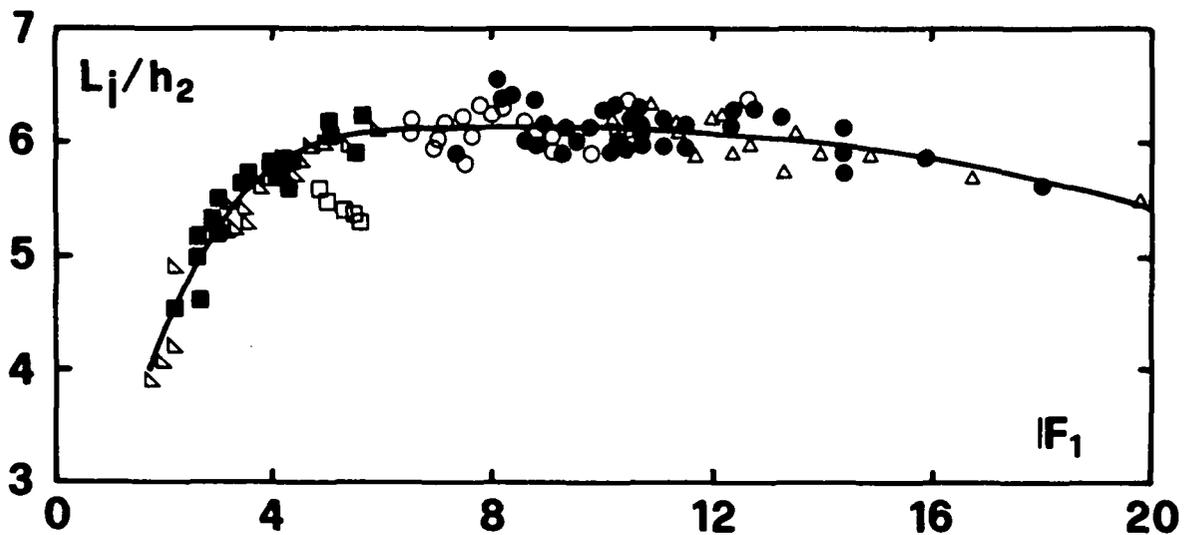


Figure 2.5 : Longueur adimensionnelle  $L_j/h_2$  du ressaut selon [06], les points correspondent aux divers canaux d'essais.

Berryhill [04] en 1957 relate les expériences du 'Corps of Engineers' dans le domaine des bassins amortisseurs. Une vingtaine de constructions réalisées sont présentées et analysées quant à leur fonctionnement et les problèmes causés lors de passages de crues sont discutés. Peterka dit de ce travail "an excellent summary of 'how things have worked out'". Des enseignements et recommandations sont tirés de ces expériences, en particulier sur les raisons de l'érosion et la longueur du bassin avec chicanes.

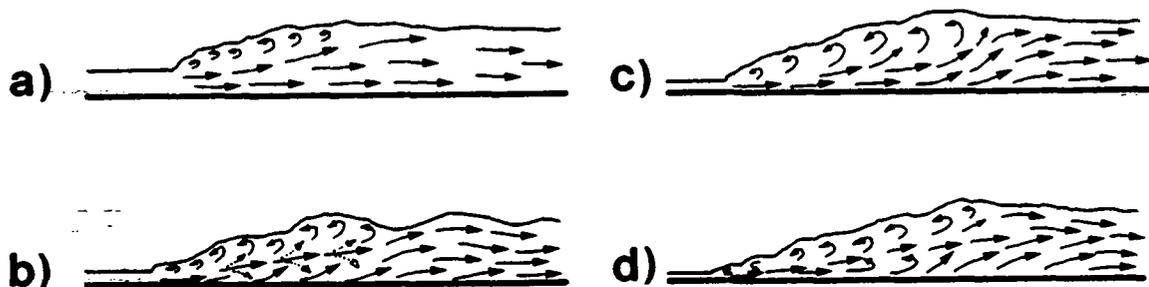


Figure 2.6 : Formes du ressaut classique avec 1) le ressaut faible ou pré-ressaut avec  $1.7 < F_1 < 2.5$ , 2) le ressaut oscillant avec  $2.5 < F_1 < 4.5$ , 3) le ressaut stable ou "bon" ressaut avec  $4.5 < F_1 < 9$  et 4) le ressaut fort  $F_1 > 9$ .

Pour contourner les difficultés que représente le mélange eau-air pour les mesures de turbulence notamment, Rouse et al. [50] proposent une nouvelle approche : ils utilisent une soufflerie avec de l'air seulement, en imposant au conduit la forme du ressaut classique. Des mesures de vitesses, de turbulence et de tensions de Reynolds sont exécutées. Trois phases sont distinguées dans le phénomène de turbulence : la production, la convection et la dissipation. Les résultats obtenus tentent d'expliquer la mécanique interne du ressaut, mais la réalité de la similarité entre l'air et le mélange eau-air n'est pas évidente.

Dans le chapitre 15 de son livre "Open-channel hydraulics" de 1959 [09], Chow fait une présentation complète, claire et concise du ressaut hydraulique, en faisant appel aux derniers progrès réalisés dans le domaine. Son ouvrage sert de référence pour les hydrauliciens encore actuellement. Mais aucune explication n'est fournie sur l'écoulement à l'intérieur du ressaut hydraulique.

La même année 1959, Elevatorsky [12] traite des dissipateurs d'énergie hydraulique. Après un rappel des bases de l'hydraulique des canaux découverts et du ressaut, il présente une revue détaillée et étendue sur les différents types de bassins amortisseurs et d'ouvrages de dissipation d'énergie tels qu'é-

vacuateurs de crues, sauts de ski, coursiers, marches et déflecteurs. Le domaine des dissipateurs d'énergie est décrit exhaustivement et illustré par de nombreux exemples réalisés.

Schröder [56] présente un excellent travail sur le ressaut classique. De très nombreux essais ont été réalisés et l'auteur donne une explication convaincante du phénomène de la dissipation d'énergie. Celle-ci a lieu principalement à l'interface entre le rouleau de surface et le courant principal sous-jacent, là où le gradient de vitesse est le plus grand, i.e. surtout dans la zone du pied du ressaut, comme le montrent les lignes de charge de ses essais. D'autre part, il établit des profils de transport d'air, de vitesses, de densité et de pression statique. La connaissance du ressaut et sa dynamique interne a beaucoup progressé par les travaux de Schröder.

Le 'Committee on Hydraulics Structures' [11] sous la présidence de Berryhill présente en 1964 un rapport sur les dissipateurs d'énergie. Aucune recherche nouvelle n'est proposée. Les différents types de dissipateurs sont discutés et des suggestions pour des recherches futures sont faites. Ce rapport vaut surtout pour son impressionnante liste de références bibliographiques qui est donnée à la fin, couvrant le domaine du ressaut hydraulique et des ouvrages de dissipation.

En appliquant le théorème de la quantité de mouvement, Silvester [59] détermine en 1964 les hauteurs conjuguées et l'énergie dissipée pour des ressauts hydrauliques dans des canaux horizontaux à profils rectangulaires, triangulaires, paraboliques, circulaires et trapézoïdaux, en fonction du nombre de Froude. Le canal triangulaire s'est avéré le plus efficace, i.e. pour  $F_1$  donné il requiert moins de hauteur  $h_2$ . Une formule pour la longueur du ressaut est proposée mais elle contient une constante qui doit être déterminée expérimentalement, car elle dépend des proportions générales du bassin.

Rajaratnam [37] fait le tour du sujet touchant le ressaut hydraulique en 1967. Divers types de ressauts possibles sont

analysés : le ressaut classique, le ressaut noyé, le ressaut forcé, le ressaut sur pente, le ressaut préentraîné, le ressaut dans des canaux non rectangulaires, le ressaut dans les conduites, le ressaut dans des canaux non prismatiques, le ressaut dans des écoulements stratifiés et le ressaut dans les fluides rotationnels. De nombreux aspects particuliers du ressaut sont abordés et il est fait état des connaissances dans le domaine.

Rajaratnam et Subramanya en 1968 [39] analysent les données de plusieurs auteurs concernant le profil de surface du ressaut. Ils proposent une représentation adimensionnelle de ce profil en utilisant de nouvelles coordonnées  $m$  et  $n$ , où la coordonnée verticale  $n=h/\tilde{Y}$  avec  $\tilde{Y}=0.75(h_2-h_1)$  et la coordonnée longitudinale  $m=x/\tilde{X}$  avec  $\tilde{X}$  la distance entre le pied du ressaut et l'endroit où  $h=\tilde{Y}$ . Le coefficient 0.75 a été déterminé après plusieurs tentatives pour obtenir un profil unifié pour tous les ressauts. Sur la Figure 2.7 sont représentés les points expérimentaux de 8 essais et la courbe du profil moyen ainsi obtenue.

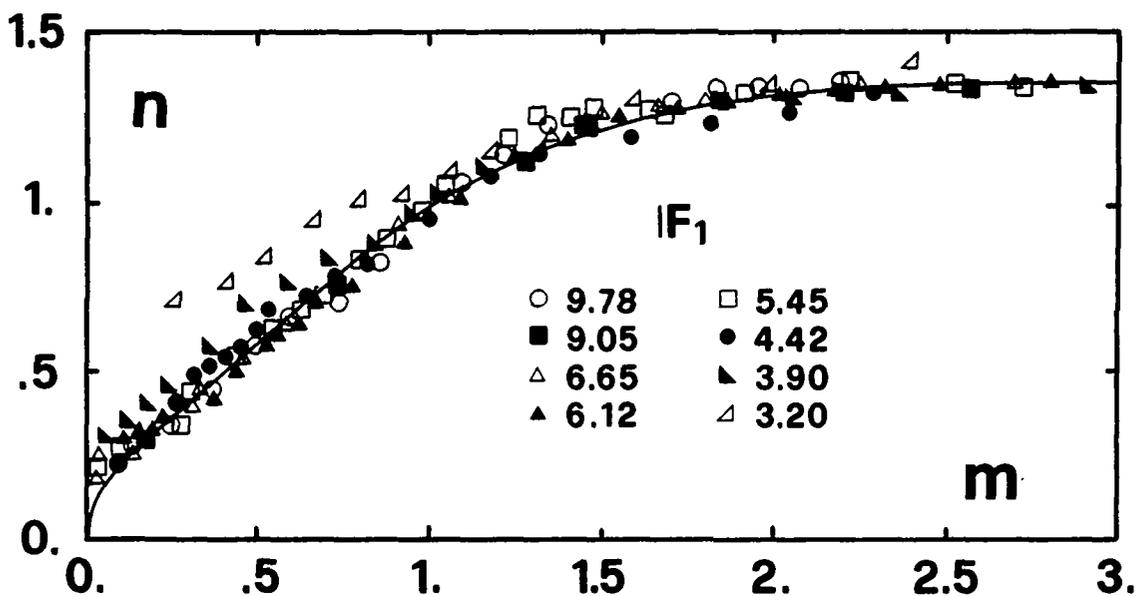


Figure 2.7 : Profils de surface adimensionnels du ressaut rapportés aux coordonnées relatives  $n=h/\tilde{Y}$  où  $\tilde{Y}=0.75(h_2-h_1)$  et  $m=x/\tilde{X}$  où  $\tilde{X}=x(h=\tilde{Y})$ , selon [39]. Points expérimentaux pour divers nombres de Froude  $F_1$ .

Des recherches ont sans cesse lieu sur le ressaut hydraulique et les bassins amortisseurs. Mentionnons encore les publications suivantes : Rajaratnam [38] en 1968 étudie le ressaut dans les canaux rugueux; en 1969, Herbrand [23] étudie le ressaut classique sous l'influence du mélange d'air et ses essais ont montré que l'effet de l'air contenu dans l'écoulement à l'amont du ressaut est négligeable sur les hauteurs conjuguées et que le ressaut se forme normalement; en 1971 [47] et 1972 [48], Resch et Leutheusser effectuent des mesures de turbulence, de tensions de Reynolds et soulèvent le problème biphase de l'écoulement; en 1974, Khader et Elango [29] procèdent à des mesures de pressions dynamiques sur le fond du bassin.

## 2) Marches positives et négatives

Forster et Skrinde [13] analysent en 1950 les écoulements sur une marche positive et sur un seuil sans considération sur les conditions à l'aval, i.e. l'écoulement est libre au-delà du seuil (cf. point 4)). En adoptant une répartition hydrostatique des pressions sur la marche dans l'application du théorème de la quantité de mouvement, ils obtiennent une relation entre  $Y=h_2/h_1$ ,  $S=s/h_1$  et  $F_1$ . Sur la Figure 2.8, la courbe

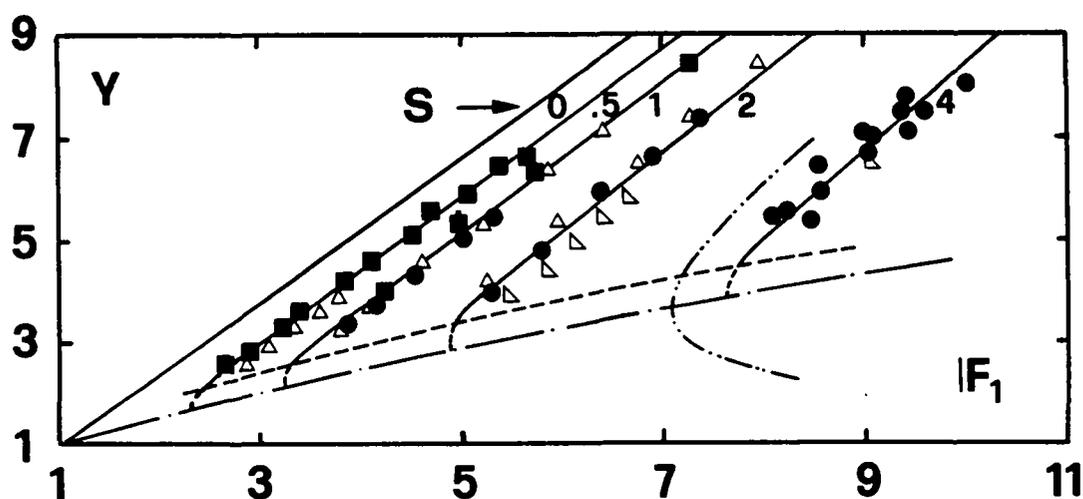


Figure 2.8 : Résultats expérimentaux de [13] sur les hauteurs conjuguées pour une marche positive de différentes hauteurs  $s$  (■) 23.8 mm, ( $\Delta$ ) 36.6 mm, (●) 53.9 mm et ( $\nabla$ ) 7.9 mm. (-·-·-) courbe théorique pour  $S=4$ , (---) limite inférieure des essais et (-·-·-) limite théorique.

théorique pour  $S=4$  est représentée de même que les points expérimentaux pour  $S=0.5, 1, 2$  et  $4$ . Les points des essais sont sur des courbes parallèles à celles théoriques mais décalées, et plus  $S$  est grand, plus l'écart augmente, i.e. pour un même  $F_1$ , la valeur expérimentale est inférieure à celle théorique (cf. Figure 2.8).

Les bassins amortisseurs avec une marche négative étaient connus et utilisés bien avant que Moore et Morgan [32] ne leur consacrent une étude fondamentale en 1959. Dans leur article, ils distinguent quatre types possibles de ressaut (cf. Figure 2.9) : 1) le ressaut type A (avec la pression sur la marche correspondant à  $h_2$ ), 2) l'onde (particularité de l'écoulement sur une marche négative), 3) le ressaut type B (avec le pied du ressaut au droit de la marche et donc avec la pression sur la marche correspondant à  $h_1+s$ ) et 4) le ressaut type B minimum (le pied du ressaut situé au-delà de la marche et pression minimale sur celle-ci).

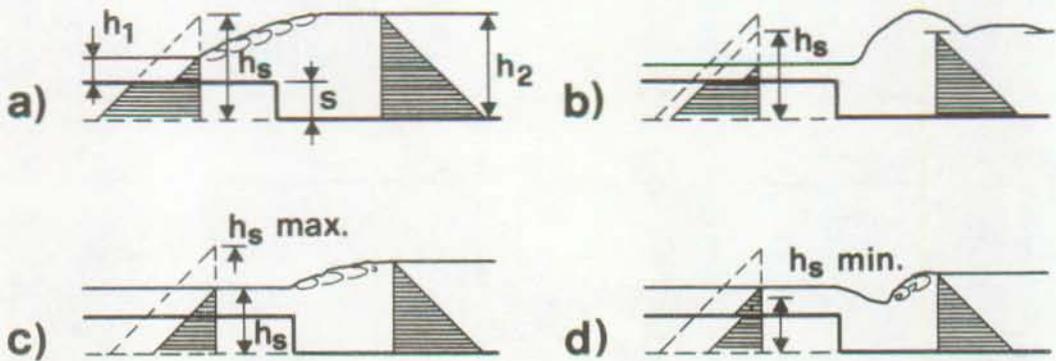


Figure 2.9 : Différentes formes du ressaut et répartitions de pressions correspondantes selon [32] : a) ressaut type A, b) onde, c) ressaut type B et d) ressaut type B minimum.

Une équation générale est établie et exprime  $F_1$  en fonction de  $Y=h_2/h_1$ ,  $S=s/h_1$  et  $h_s/h_1$ , où  $h_s$  est la hauteur piézométrique sur la marche et  $h_s=f(h_1,h_2,s)$ . Pour les cas des ressauts types A et B respectivement, ces équations s'écrivent :

$$(2.7) \quad F_1^2 = \{Y[(Y-S)^2-1]\}/[2(1-Y)],$$

$$(2.8) \quad F_1^2 = \{Y[Y^2 - (1+S)^2]\} / [2(1-Y)].$$

Les résultats de leurs essais montrent que, pour  $F_1$  donné, le rapport des hauteurs conjuguées  $Y=h_2/h_1$  peut varier sur un domaine couvrant les quatre cas décrits plus haut, le domaine étant d'autant plus grand que  $S$  est élevé, comme indiqué à la Figure 2.10. Ceci signifie qu'un bassin amortisseur avec une marche négative est efficace pour stabiliser le ressaut pour de grandes variations de  $Y$ .

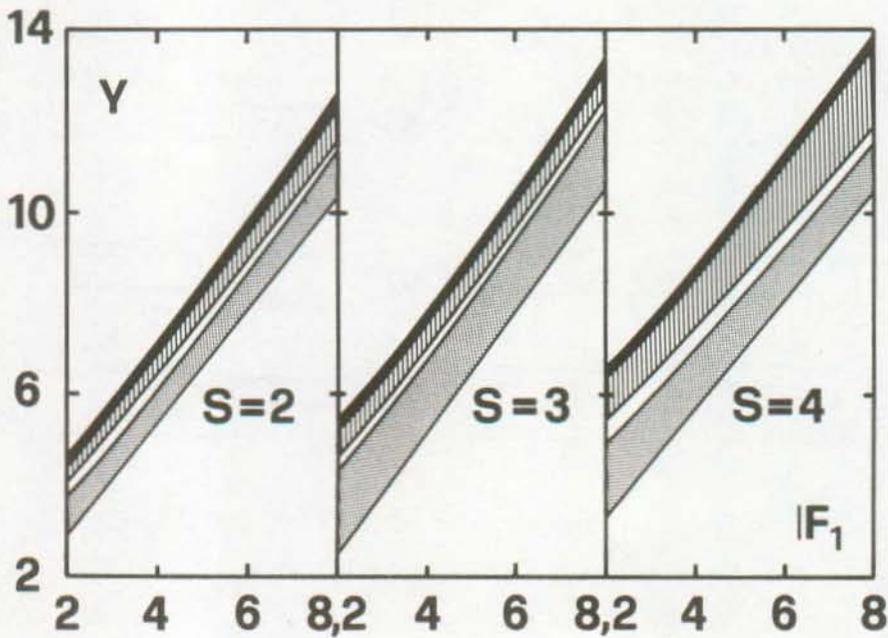


Figure 2.10 : Hauteurs conjuguées  $Y=h_2/h_1$  pour une marche négative en fonction de  $F_1$  pour les domaines respectifs du ressaut type A (■), de l'onde (▨) et du ressaut type B (▤) et pour  $S=2, 3$  et  $4$ , selon [32].

D'autre part, l'analyse des vitesses sur le fond à partir de la marche indique que le ressaut type B présente les plus grandes valeurs (jusqu'à six fois  $V_2$ ), que le ressaut type A et l'onde ont des vitesses négatives (rouleau de fond) sur un premier tronçon puis celles-ci redeviennent positives et atteignent une valeur uniforme au-delà du ressaut. Ceci sert de critère de dimensionnement pour la protection aval du bassin contre l'érosion.

Sharp [57] en 1974 s'est occupé à observer le ressaut sur des marches négatives. Les cas possibles d'écoulement sont détaill-

lés au nombre de six contre quatre pour Moore et Morgan (cf. Figure 2.11) : a) ressaut type A, le rouleau se termine au droit de la marche; b) onde apparaissant en abaissant le niveau d'eau nécessaire au ressaut type A, cette position est très sensible aux variations de hauteur; c) onde aplatie avec un long rouleau sur le fond; d) écoulement quasi horizontal avec petites oscillations de surface et rouleau de fond encore plus grand; e) jet recourbé vers le bas et apparition d'un ressaut à quelque distance de la marche et f) ressaut type B minimum.

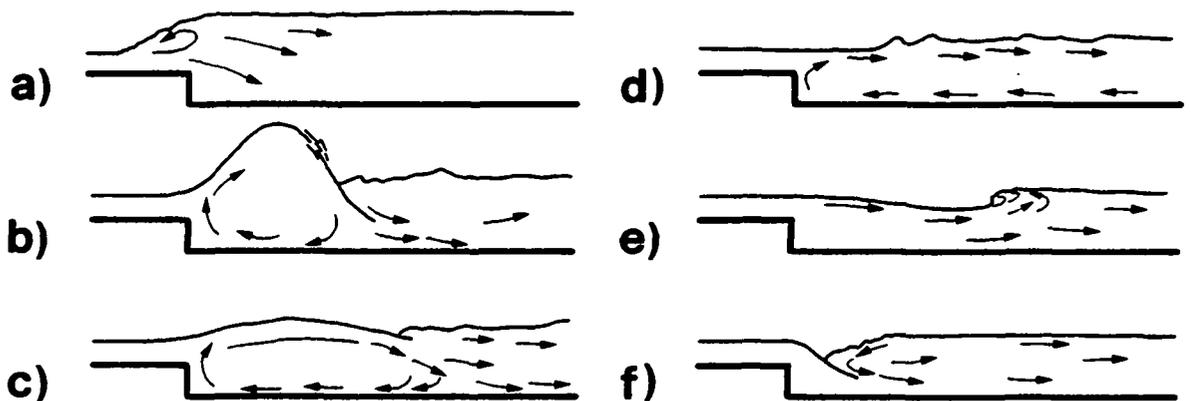


Figure 2.11 : Cas d'écoulements décrits par [57] sur une marche négative : a) ressaut type A, b) onde, c) onde aplatie, d) écoulement horizontal oscillant, e) jet recourbé vers le bas et f) ressaut type B minimum.

Dans ses essais, Sharp a utilisé aussi une marche négative avec l'extrémité arrondie; celle-ci rend la surface de l'écoulement moins turbulente et supprime la formation de l'onde. Les résultats obtenus pour  $Y=f(F_1)$  sont analogues à ceux de Moore et Morgan, mais étant donné l'effet de l'arrondi, il y a un léger décalage, i.e. pour des nombres de Froude élevés, le rapport  $Y$  correspondant est plus faible avec l'arrondi qu'avec l'angle droit. L'inconvénient de l'arrondi est le fait qu'il dirige les grandes vitesses sur le fond avec le risque d'une érosion possible, mais le ressaut est bien localisé au pied de la marche.

En 1985 Hager [15] traite du ressaut type B sur marche négative en adoptant une distribution appropriée de la pression sur la marche, à savoir la pression hydrostatique correspondant à

la hauteur de la marche. Le résultat ainsi obtenu

$$(2.9) \quad F_1^2 = [Y(1+S^2-Y^2)]/[2(1-Y)]$$

approche mieux les valeurs expérimentales que l'équation traditionnelle de Moore et Morgan.

La même année Hager et Sinniger [20] se sont attachés à l'étude des caractéristiques d'écoulement dans des dissipateurs avec une marche positive. Comme hypothèse de la pression sur la marche, une distribution uniforme est admise égale à la valeur  $(h_2+s)$ , où  $h_2$  est la hauteur d'eau aval sur la marche et l'équation suivante est obtenue :

$$(2.10) \quad F_1^2 = [Y(Y^2+2SY+2S^2-1)]/[2(1-Y)].$$

Les courbes correspondantes montrent une bonne concordance avec les essais de Forster et Skrinde (cf. Figure 2.12).

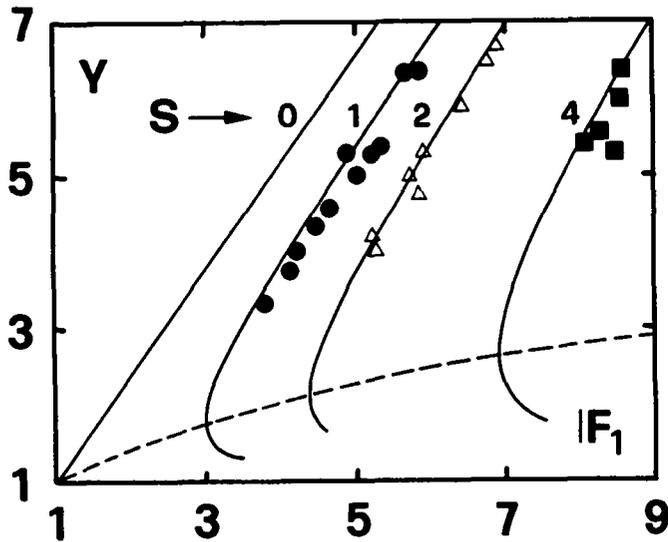


Figure 2.12 : Hauteurs conjuguées  $Y=f(F_1, S)$  pour marche positive : (—) courbes théoriques pour divers  $S$  selon [20]; points expérimentaux de [13], (---) limite théorique.

Une formule simplifiée est développée pour la dissipation d'énergie relative à la charge amont :

$$(2.11) \quad \eta = \Delta H/H_1 = [1-(\sqrt{2}/F_1)]^2, \text{ pour } F_1 > 1.5.$$

Il faut dire que  $\eta$  est indépendant de  $S$  et correspond donc au cas  $S=0$ .

Hager et Bretz [18] en 1986 proposent une analyse complète du ressaut hydraulique sur des marches positive et négative. Pour les deux cas, les différents types d'écoulement sont présentés et les ressauts types A et B sont discutés en détail. Une comparaison est faite entre les valeurs de nombres de Froude obtenus par la théorie et ceux par les essais. Aucune tendance ne se dessine pour les longueurs des rouleaux, seule une valeur moyenne peut être tirée. Les auteurs ont réunis sur un même diagramme les valeurs des hauteurs conjuguées  $Y=f(F_1)$  pour les deux cas (cf. Figure 2.13) des marches positive et négative.

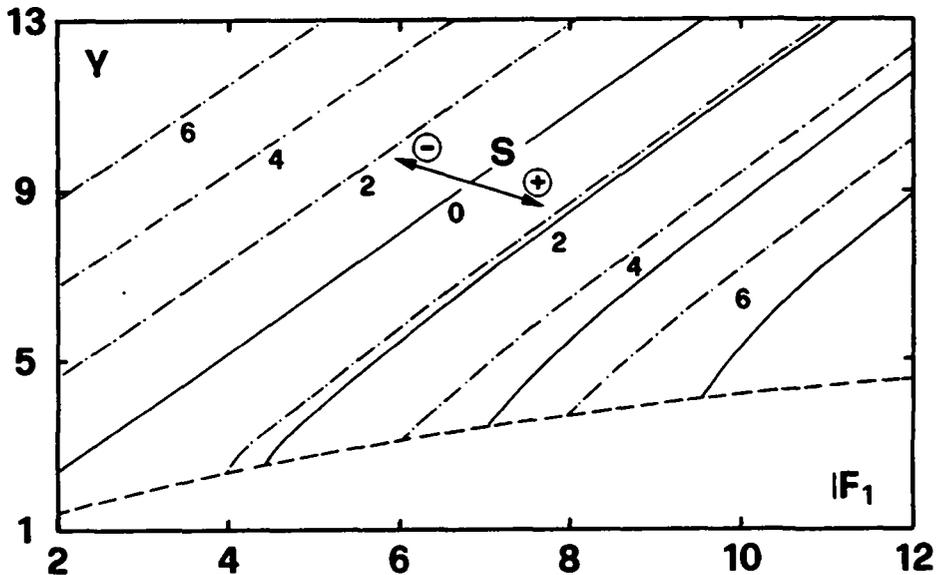


Figure 2.13 : Hauteurs conjuguées  $Y=f(F_1, S)$  pour marches positive (+) et négative (-) selon [18]; (—) ressaut type A, (-.-) ressauts types B et B minimum, (---) limite inférieure.

Trois thèmes sont abordés dans la comparaison globale des marches positive et négative : la stabilité du ressaut, son efficacité et sa compacité. La marche négative se révèle être un dissipateur d'énergie flexible, i.e. de grandes variations de  $h_2$  n'influencent que peu sa stabilité et son efficacité est plus élevée que pour la marche positive. Par contre cette dernière offre une meilleure compacité, i.e. la zone de dissipation est plus courte.

### 3) Blocs - seuils dentés

Harleman [22] en 1955 exprime la force exercée sur les blocs par rapport à la pression hydrostatique à l'aval du ressaut classique en fonction de  $h_2$  (ressaut classique),  $h_b$  (hauteur aval pour ressaut forcé par blocs) et le nombre de Froude  $F_1$ . Un dispositif dans le canal d'essais lui permet de mesurer directement cette force sur les blocs utilisés qui sont de deux types : 1) blocs en forme de coin ou de podium à deux marches et 2) blocs profilés "sans cavitation" (cf. schéma sur Figure 2.14). Les blocs ont une hauteur  $s$ , une position  $L_s$  par rapport au pied du ressaut et leur coefficient d'espacement  $e$  vaut 0.5, i. leur espacement est tel la moitié de la section de passage est libre. L'auteur fait remarquer que plus le bloc est profilé, moins il est sujet aux dégâts dus à la cavitation de haute vitesse mais aussi plus son efficacité diminue. La réduction de la hauteur aval  $h_b$  comparée à celle du ressaut classique  $h_2$  peut atteindre 14 % lorsque les blocs sont suffisamment près du pied du ressaut (cf. Figure 2.14), celle de la longueur 30 % par rapport au ressaut classique; le maximum de force obtenue sur les blocs correspond à env. 20 % de la pression hydrostatique  $\rho g b h_2^2 / 2$ .

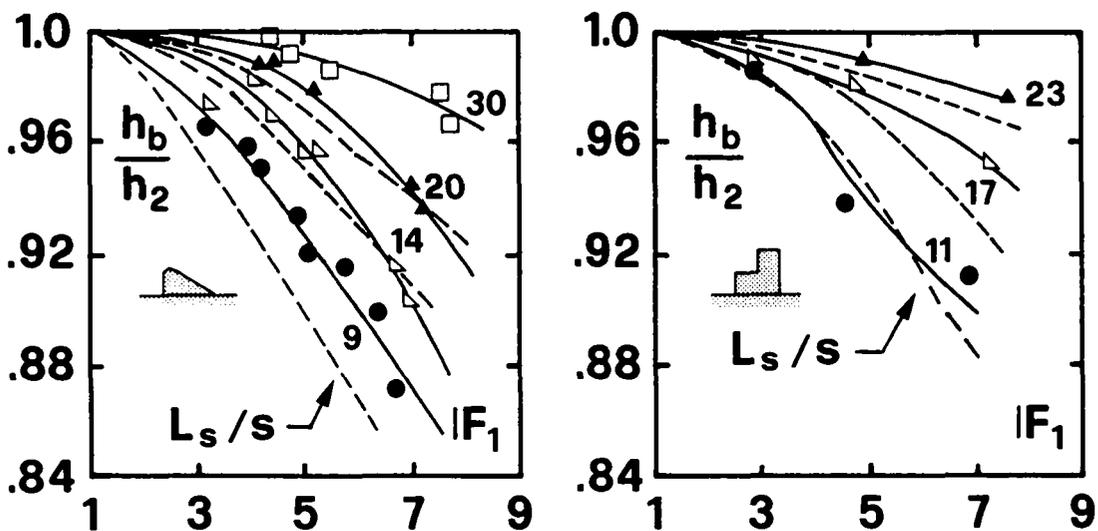


Figure 2.14 : Réduction de la hauteur aval relative  $h_b/h_2$  en fonction de  $F_1$  et de la position des blocs  $L_s/s$  selon [22]. (—) réduction mesurée, (---) réduction calculée.

Pillai et Unny [35] en 1964 ont testé plusieurs types de blocs se différenciant par leur angle d'ouverture dans le sens de l'écoulement (cf. Figure 2.15), pour  $e=0.5$ .

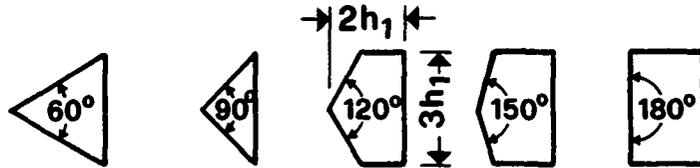


Figure 2.15 : Différents types de blocs analysés par [35], angle d'ouverture et dimensions rapportées à  $h_1$ .

Des mesures de vitesses sont effectuées dans plusieurs sections pour les différents blocs (cf. Figure 2.16) et la dissipation d'énergie correspondante est calculée avec l'équation (2.5) en tenant compte d'un coefficient de répartition de vitesses déterminé graphiquement à partir des mesures. La longueur du ressaut est définie comme la distance entre le pied

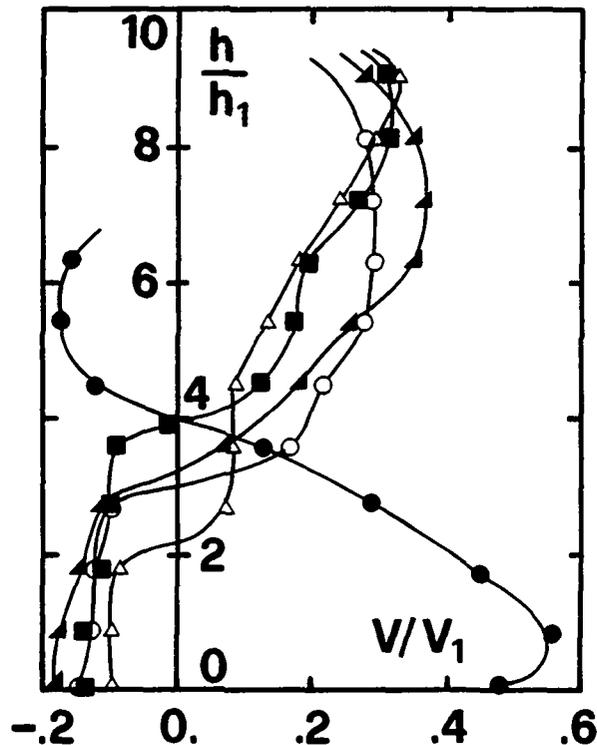


Figure 2.16 : Mesures de vitesses relatives  $V/V_1$  pour les blocs d'angle (▲)  $60^\circ$ , (■)  $90^\circ$ , ( $\Delta$ )  $120^\circ$  et (○)  $180^\circ$ , à une distance  $L_s/h_1=18$  du pied du ressaut, selon [35]; (●) ressaut classique.  $V_1$  et  $h_1$  sont mesurées au pied du ressaut.

du ressaut et l'endroit où les vitesses sur le fond sont nulles à l'aval des blocs, i.e. là où se termine le rouleau de fond. L'utilisation de blocs a pour effet de diminuer la hauteur d'eau aval. Le bloc le plus efficace est celui avec un angle d'ouverture de  $120^\circ$ .

En 1966, Rand [43] étend ses travaux précédents [41, 42] sur les seuils aux rangées de blocs qu'il appelle "seuil denté". Il étudie le cas avec  $e=0.5$ , cas intermédiaire entre le ressaut classique ( $e=0$ ) et le ressaut forcé par seuil continu ( $e=1$ ). Les mêmes considérations sont appliquées que celles de son article sur les seuils de 1965 (cf. infra point 4). De la comparaison des deux types de chicanes, il résulte que le seuil continu est plus efficace que le seuil denté.

Basco [03] présente en 1971 un résumé condensé de sa thèse intitulée "Etude expérimentale des forces de traînée et autres critères de performances des blocs dans les ressauts hydrauliques". Pour le calcul du coefficient de traînée, aucune vitesse de référence n'est trouvée; pour cette raison, la force de traînée  $F_b$  engendrée par le bloc est rapportée à la force  $F_c$  de pression hydrostatique du ressaut classique correspondant à la hauteur d'eau aval  $h_2$ . Le rapport  $F_b/F_c$  est représenté sur un diagramme en fonction de la hauteur relative du bloc  $S=s/h_1$  et de son emplacement  $L_s/h_2$  par rapport au pied du ressaut pour un nombre de Froude donné; puis sur un seul graphique avec trois dimensions sont rassemblés les résultats pour  $3 < F_1 < 10$ .

Suite aux observations, le profil du ressaut forcé peut être divisé en 4 types : 1) ressaut similaire au ressaut classique, blocs quasiment sans effet, 2) ressaut forcé, hauteur d'eau maximale jusqu'à 10-15 % supérieure à la hauteur aval, 3) idem mais la hauteur maximale dépasse de 15 % la hauteur aval et apparition d'un deuxième ressaut, 4) ressaut "pauvre", à la limite du jet, avec de grandes ondulations à l'aval des blocs. Basco reporte sur un diagramme  $F_b/F_c=f(S, L_s/h_2)$  ces quatre zones et définit comme optimum de dimensionnement le maximum de la transition entre les types 2) et 3) comme indiqué à la Figure 2.17.

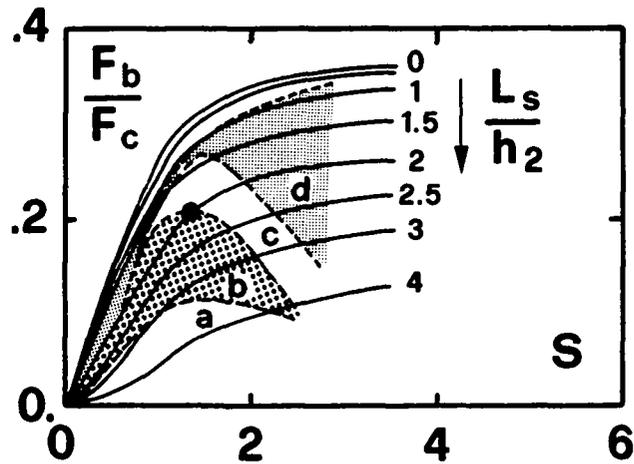


Figure 2.17 : Rapport de la force  $F_b$  exercée par les blocs à la pression hydrostatique aval  $F_c$  du ressaut classique exprimé en fonction de  $S$  pour différents  $L_s/h_2$  et  $F_1=6$ . Classification du ressaut forcé en quatre types a), b), c) et d). (●) optimum de dimensionnement selon [03].

Ranga Raju et al. [46] en 1980 cherchent à obtenir les informations suivantes en analysant les données existantes sur le ressaut forcé par blocs : 1) détermination de la grandeur, de la configuration et de la position des chicanes dans le bassin pour les débits de dimensionnement pour provoquer le ressaut à l'endroit voulu, 2) position du ressaut pour les autres débits, et 3) force de traînée sur les chicanes pour n'importe quels débits. Deux paramètres  $\phi_1$  et  $\phi_2$  interviennent comme facteurs de correction pour la force de traînée afin de pouvoir comparer les différents cas entre eux. Le premier paramètre est une fonction de  $S$ , le second du coefficient d'espacement  $e$ . Une courbe unique permet ainsi d'exprimer la force de traînée relative comme fonction de la position des blocs :  $\phi_1\phi_2F_b/F_c=f(L_s/h_1)$  où  $L_s$  est la distance entre la face amont des blocs et le pied du ressaut (cf. Figure 2.18). Plus la rangée de blocs est proche du pied du ressaut, plus la force de traînée est grande. Cette courbe s'avère être aussi une bonne moyenne pour le cas de deux rangées de blocs. Les résultats ne sont cependant pas directement transposables aux seuils continus. Dans leurs mesures considérées, le coefficient d'espacement  $e$  a varié entre 0.3 et 0.65. Dans le chapitre 6 sera présentée une extension de leur approche.

Un modus operandi est donné pour permettre le dimensionnement d'un bassin amortisseur avec une rangée de blocs, mais l'emplacement des blocs dans le bassin est choisi a priori !

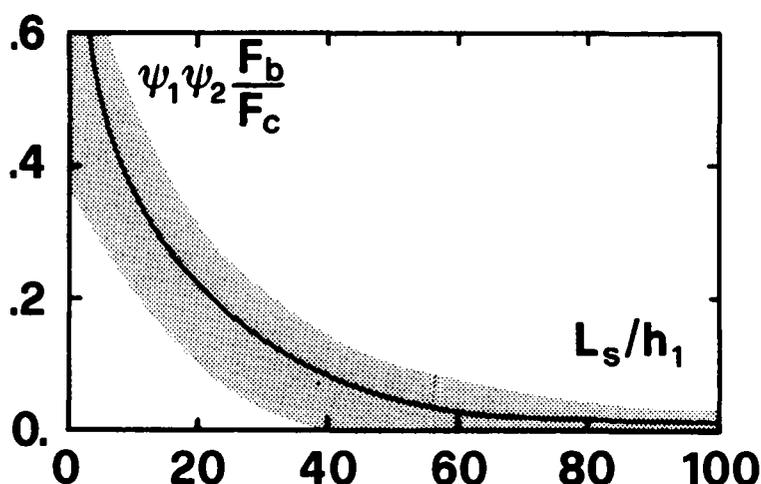


Figure 2.18 : Force de traînée relative  $\psi_1\psi_2(F_b/F_c)$  en fonction de la position des blocs  $L_s/h_1$  selon [46]; (—) courbe moyenne des valeurs expérimentales (zone hachurée).

#### 4) Seuils continus

Les premiers à avoir analysé le ressaut forcé par seuil continu de façon fondamentale sont Forster et Skrinde [13] en 1950. Ils ont étudié le seuil à paroi mince pour contrôler le ressaut et fixer sa position dans le canal, afin d'éviter une érosion du lit de la rivière au-delà du bassin amortisseur. Ils se sont limités au cas où l'écoulement est libre à l'aval du seuil, i.e. le niveau d'eau à l'aval n'a aucune influence sur la formation du ressaut. Ce dernier est pratiquement terminé au droit du seuil qui fonctionne alors comme un déversoir. Les auteurs ont développé une équation intrinsèque pour déterminer les hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude amont  $F_1$  et de la hauteur relative du seuil  $S=s/h_1$ , comportant des coefficients tirés de la théorie des déversoirs; cette formulation est peu pratique à l'utilisation.

En admettant une répartition hydrostatique des pressions et une distribution uniforme des vitesses dans les sections de part et d'autre du ressaut et en fixant la position du seuil à

une distance  $5(h_2+s)$  du pied du ressaut, ils établissent un diagramme exprimant les hauteurs relatives du seuil  $S=s/h_1$  en fonction de  $F_1$  pour différents  $L_s/h_2$  (cf. Figure 2.19).

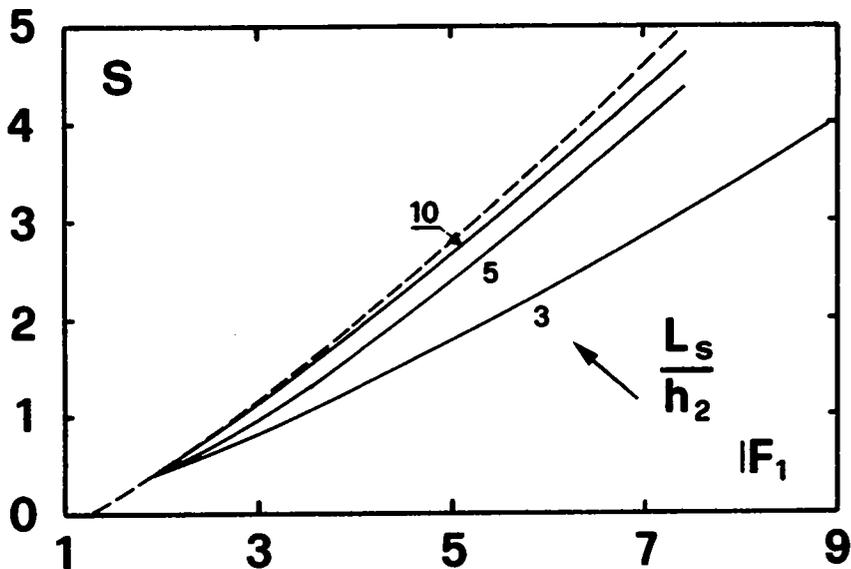


Figure 2.19 : Hauteurs relatives du seuil  $S$  (à paroi mince) en fonction de  $F_1$  selon [13]; (--) théorie, (—) valeurs expérimentales pour différents  $L_s/h_2$ ; seuil dénoyé.

Leurs essais ont montré globalement une bonne concordance avec leur théorie : pour le seuil, plus le ressaut est long, plus les points expérimentaux s'approchent de la courbe théorique. Mais aucune analyse de l'écoulement interne du ressaut hydraulique n'est entreprise et des principes de dimensionnement (hauteurs conjuguées, longueurs) font aussi défaut. Weaver, dans la discussion de [13], a conduit des essais analogues et a mesuré la force sur le seuil en fonction de sa position dans le ressaut. La force est maximale lorsque le seuil est placé au pied du ressaut, puis décroît à un minimum correspondant à la fin du rouleau et finalement augmente à nouveau pour atteindre une valeur constante. Ses résultats montrent qu'un seuil placé à la fin du ressaut provoque une réduction de la hauteur d'eau à l'aval requise pour former un ressaut classique et que cette réduction est due à un changement de la distribution des vitesses; ce qui infirme l'hypothèse de répartition uniforme des vitesses dans le ressaut telle qu'admise pour simplification par Forster et Skrinde.

Lorsque la hauteur d'eau aval est plus grande que celle requise pour obtenir le ressaut classique, ce dernier est repoussé vers l'amont en direction de la pente, d'un évacuateur, d'une vanne ou d'un dispositif similaire, et peut devenir un ressaut noyé, i.e. l'entraînement d'air et la turbulence diminue et le phénomène peut se ramener au cas d'un jet de fond entrant dans un bassin.

L'efficacité des bassins avec seuils utilisés dans ce cas d'écoulement noyé est présentée et discutée par Shukry [58] en 1957 qui prend comme critère de performance la distribution des vitesses en aval du seuil. Son travail est plutôt descriptif et qualitatif, et manque de rigueur. En conclusion, Shukry propose de placer le seuil au milieu du bassin, tout en reconnaissant le peu d'efficacité du ressaut noyé.

La même année 1957, Rand [41] se propose d'établir certains standards pour les bassins avec seuil continu à son extrémité. Il est le premier à avoir classifié le ressaut forcé par seuil en 10 cas typiques, se rapportant aux effets de la hauteur du seuil et de sa position, le ressaut classique servant de cas de référence.

Les cas peuvent se grouper en trois classes se distinguant par la position du seuil par rapport au pied du ressaut (cf. Figure 2.20) : 1) position minimale en amont  $L_{s,min}$ , 2) position intermédiaire  $L_s$  et 3) position maximale en amont  $L_{s,max}$ .

Quatre types d'écoulement se présentent pour la classe 1) : 1.1) le seuil est placé le plus près possible du pied du ressaut et l'écoulement torrentiel à l'aval n'a aucune influence sur la formation du ressaut; le seuil a une hauteur critique  $s_c$ , i.e. il a la hauteur minimale pour que le ressaut se produise; pour  $s < s_c$ , l'écoulement se transforme en jet, pour  $s > s_c$ , le ressaut se déplace en amont; 1.2) type identique à 1.1) mais avec un niveau d'eau aval supérieur et en présence d'un deuxième ressaut; le niveau d'eau aval est encore sans influence sur la formation du ressaut; 1.3) le seuil a une hauteur  $s < s_c$ , le ressaut disparaît et fait place au jet,

avec ou sans un deuxième ressaut à l'aval du seuil; 1.4) similaire à 1.3) mais le niveau aval est élevé et tend vers la hauteur  $h_2$  du ressaut classique, le ressaut a toujours la longueur  $L_{s,min}$ .

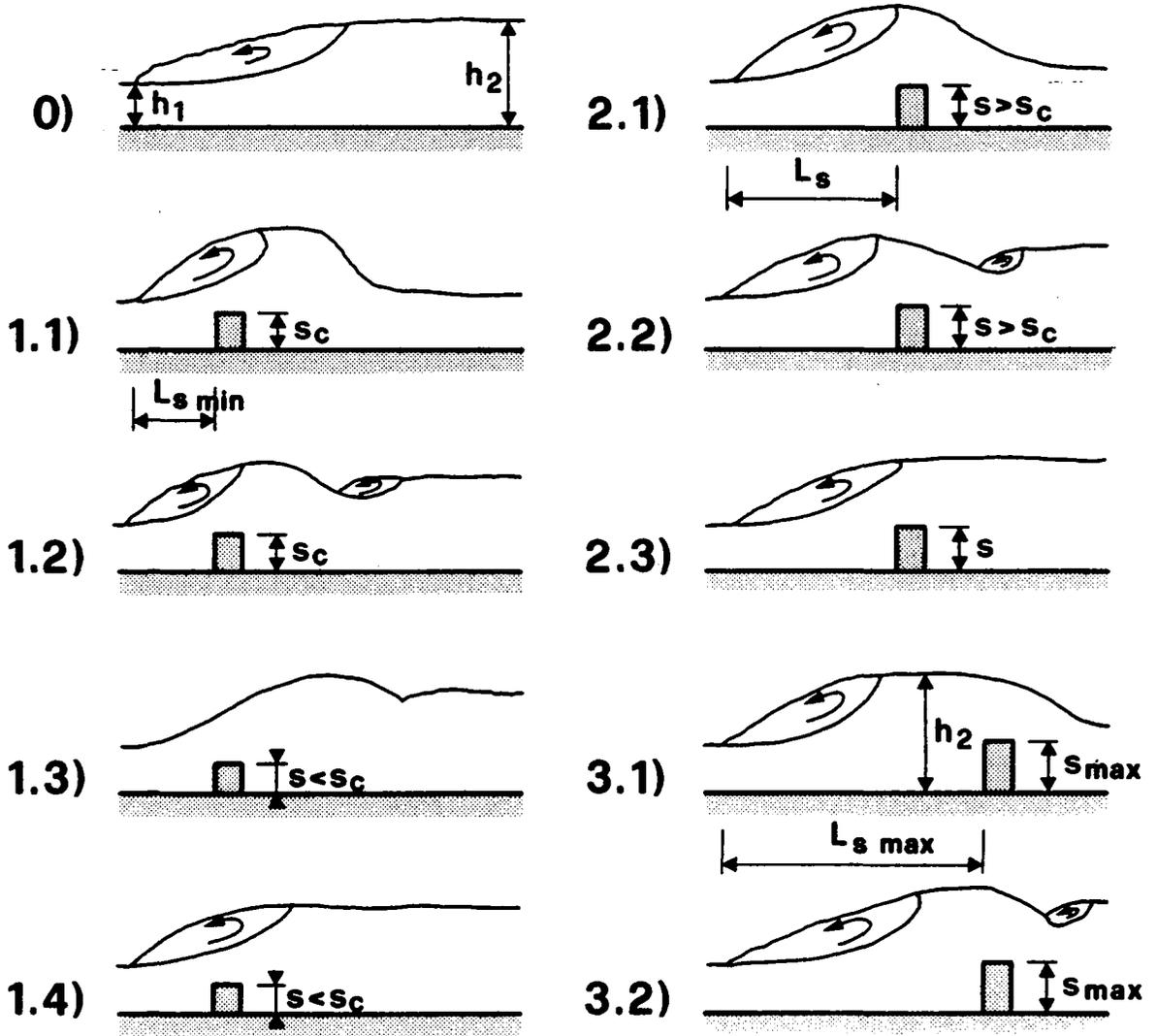


Figure 2.20 : Différents cas possibles d'écoulement avec seuil [41] : 0) ressaut classique, référence; 3 classes : 1) position minimale en amont du seuil par rapport au pied du ressaut, 2) position intermédiaire et 3) position maximale en aval.  $h_1$  et  $h_2$  hauteurs conjuguées du ressaut classique,  $s$  hauteur du seuil,  $s_c$  hauteur critique du seuil,  $L_s$  position du seuil par rapport au pied du ressaut.

La classe 2) comprend 3 types : 2.1) le seuil a une hauteur  $s > s_c$  et l'écoulement à l'aval est torrentiel; le rouleau se termine au droit du seuil (cas analysé par [13]); 2.2) type identique au précédent mais en présence d'un deuxième ressaut à l'aval suite à l'élévation du niveau d'eau qui reste sans

influence sur la formation du ressaut à l'amont; 2.3) similaire à 2.2), mais avec submersion depuis l'aval, le plan d'eau au-delà du seuil est presque horizontal.

Deux types d'écoulement appartiennent à la troisième classe : 3.1) le seuil a la hauteur  $s_{max}$  pour maintenir le ressaut dans cette position et agit comme un déversoir; la hauteur d'eau juste à l'amont du seuil est égale à celle du ressaut classique; l'écoulement à l'aval est torrentiel; 3.2) type identique à 3.1) mais avec la présence d'un deuxième ressaut à l'aval suite à l'élévation du plan d'eau et sans submersion.

Afin de décrire tous ces cas, Rand définit un facteur de position :

$$(2.12) \quad K = \frac{(L_s/h_1) - (L_s/h_1)_{min}}{(L_s/h_1)_{max} - (L_s/h_1)_{min}}$$

variant entre  $K=0$  pour le seuil dans la position minimale et  $K=1$  pour la position maximale. Rand a ainsi établi des diagrammes exprimant  $Y=h_2/h_1$  en fonction de  $F_1$  pour différents  $S=s/h_1$  et ceci pour 5 valeurs de  $K$ . La Figure 2.21 montre un tel diagramme et fait ressortir que la diminution des hauteurs conjuguées est d'autant plus importante que  $S$  est élevé et que l'effet du seuil tend à disparaître lorsque  $F_1$  augmente, ce qui pourrait signifier que, pour  $F_1$  très grand, le seuil est inutile ! Ceci est difficilement admissible quand on connaît l'influence d'un tel seuil sur l'écoulement. Comme recommandation, Rand donne  $0.2 < K < 0.7$ , tout en précisant la difficulté de fixer une longueur a priori;  $K=0.2$  est la limite inférieure correspondant à un bassin très court et dont le fond doit être résistant à l'érosion à cause des grandes vitesses de l'écoulement; la limite supérieure  $K=0.7$  est dictée par des raisons d'efficacité, car pour  $K>0.7$ , la longueur du bassin se rapproche de celle du cas du ressaut classique et l'efficacité en est réduite. La limite inférieure indiquée sur la Figure 2.21 correspond au niveau d'eau au-dessous duquel la position du ressaut devient indépendante de la hauteur d'eau aval. En se fixant une valeur de  $K$  pour la longueur du bassin et en connaissant les caractéristiques de l'écoulement  $F_1$  et  $h_2/h_1$ ,

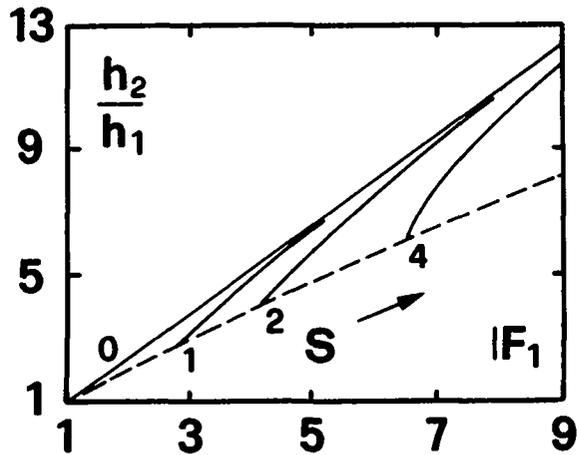


Figure 2.21 : Hauteurs conjuguées du ressaut forcé par seuil  $h_2/h_1=f(F_1,S)$  pour  $K=0.7$  selon [41]. (--) limite d'influence de l'aval sur l'amont.

la hauteur du seuil nécessaire à la formation d'un ressaut préconisé peut être tirée de ces diagrammes. Rand propose d'augmenter de 10 % la hauteur du seuil pour des raisons de sécurité résultant de l'incertitude sur les débits de dimensionnement. Aucune hypothèse ni mesures ne sont faites pour les vitesses ni pour les pressions. Rien n'est dit sur l'écoulement interne du ressaut, mais Rand propose pour la première fois une classification des divers cas possibles de ressaut forcé par seuil et des diagrammes permettant le dimensionnement de bassins. Son étude sur le ressaut forcé par seuil est liée à celle d'une structure avec chute brusque; la détermination de la hauteur d'eau  $h_1$  n'est pas expliquée et cette valeur peut donc être mise en doute. D'autre part, seules les valeurs adimensionnelles sont données.

Dans son papier suivant [42] en 1965, Rand reprend ces diagrammes en les présentant sous une autre forme; les installations expérimentales est un canal avec vanne plane : la détermination de  $h_1$  est donc précise dans ce cas. Un diagramme pour une valeur de  $F_1$  est dressé exprimant  $Y=h_2/h_1$  en fonction de  $S=s/h_1$  pour les diverses valeurs de  $K$ , arrangement plus pratique à utiliser pour le dimensionnement (cf. Figure 2.22) mais avec l'inconvénient qu'il faut un diagramme pour chaque nombre de Froude. Dans sa définition des termes du ressaut forcé par seuil, Rand mentionne le rouleau de fond à l'aval du

seuil mais ne lui consacre aucune attention. Son article de 1966 [43] traite du ressaut forcé par des blocs (ou seuil denté) en appliquant les mêmes considérations; de ses recherches ressort que le seuil continu est plus efficace que le seuil denté pour stabiliser le ressaut forcé. La hauteur d'eau aval requise et la longueur de transition sont ainsi réduites. En 1967 Rand [44] étudie les problèmes d'efficacité du ressaut forcé et de la dissipation d'énergie; une comparaison entre seuils continu et denté est présentée, sorte de synthèse sur ses travaux. Le problème de l'érosion à l'aval du seuil est finalement étudié dans sa publication de 1970 [45].

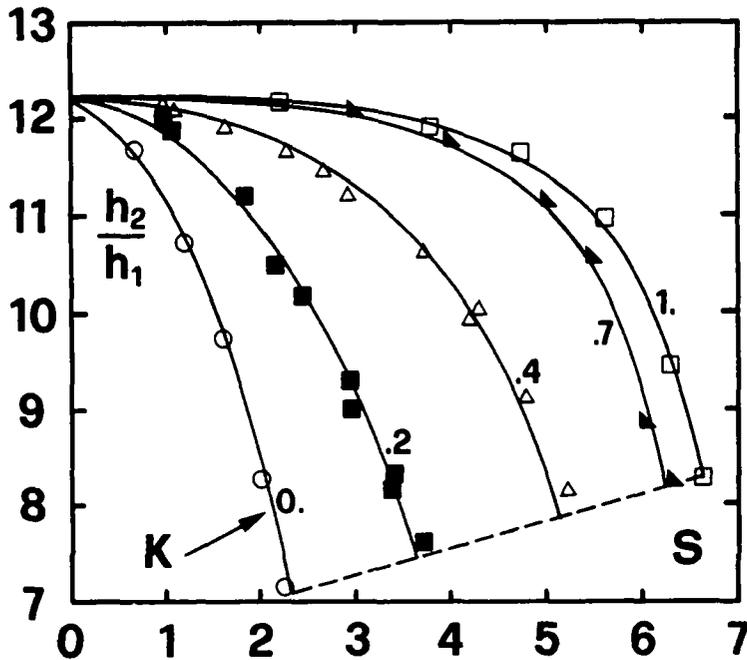


Figure 2.22 : Hauteurs conjuguées  $h_2/h_1=f(S,K)$  pour  $F_1=9$  [42]. Valeurs et courbes expérimentales; (---) limite d'influence de l'aval sur l'amont.

Macha [30] en 1963 vise deux objectifs : 1) dissipation suffisante (efficacité) et 2) protection contre "Ausblasen", i.e. le fait que le ressaut soit chassé hors du bassin. Quatre types de seuils continus et dentés sont utilisés pour forcer le ressaut : type I, seuil de section carrée; type II, section triangulaire, face amont verticale, face aval à  $45^\circ$ ; type III, section triangulaire, les deux faces à  $45^\circ$ ; type IV, section spéciale, face amont concave, face aval à  $45^\circ$  (voir croquis sur Figure 2.23). Les hauteurs conjuguées sont mesurées pour différents  $S \leq 2.5$  (limite pratique) en fonction de  $F_1$  et trois

positions des seuils par rapport au pied du ressaut. De façon analogue, les hauteurs conjuguées critiques sont aussi relevées; la hauteur aval critique  $h_{2,c}$  correspond à la hauteur limite pour laquelle le ressaut est encore localisé dans le bassin; pour une hauteur inférieure, le ressaut est chassé au-dehors. Des diagrammes sont ainsi établis pour chaque type de seuils en fixant leur position dans le bassin. La Figure 2.23 montre les hauteurs conjuguées pour le seuil type IV; pour les autres types de seuils, l'allure est analogue à celle de la Figure 2.23. L'effet du seuil augmente avec  $F_1$  et l'écart entre les diverses courbes  $S$  : la tendance est donc contraire à celle des résultats de Rand (cf. Figure 2.21). L'efficacité des seuils continus, i.e. leur capacité à réduire le niveau aval, est la plus grande pour le seuil type IV; les types I et II viennent ensuite et en dernier le type III. L'ordre des seuils dentés est identique et le seuil denté type IV est même plus efficace que les seuils continus types II et III.

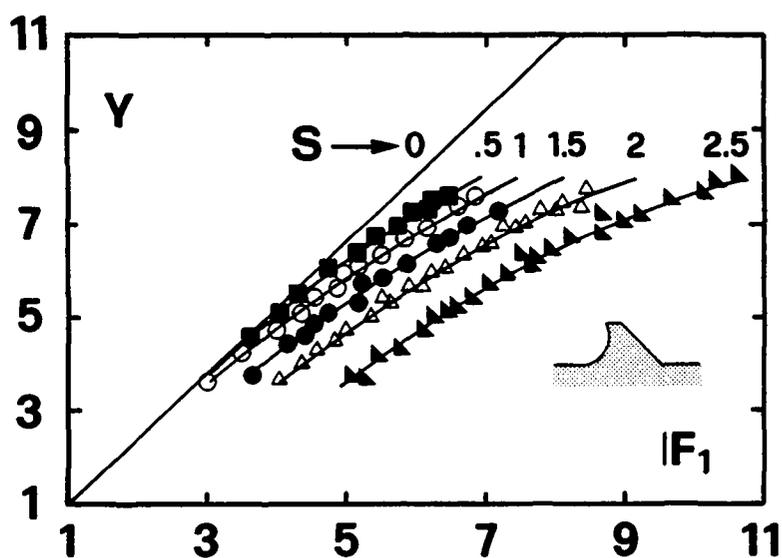


Figure 2.23 : Hauteurs conjuguées  $Y=f(F_1, S)$  du seuil continu du type IV pour  $L_s/s=11$ ; valeurs et courbes expérimentales de [30].

Macha définit le rapport  $h_2/h_{2,c}$  comme facteur de sécurité. Ses essais montrent que, pour différents types de seuils en une position donnée dans l'écoulement, le rapport  $h_2/h_{2,c}$  diminue avec  $F_1$  croissant et qu'il est d'autant plus élevé que

$S=s/h_1$  est grand. La sécurité est proportionnelle à  $S$  et inversement proportionnelle à  $F_1$ . Par contre les résultats concernant l'influence de la position relative du seuil  $L_S/s$  n'indiquent pas une tendance précise; la sécurité telle que définie par Macha ne semble dépendre que peu de cette position.

Les remarques suivantes sont à faire sur ses travaux : 1) pour le ressaut classique, le rapport des hauteurs conjuguées est plus élevé que celui donné par la courbe de Bélanger : il s'agit probablement d'une erreur sur  $h_1$ , analogue à celle remarquée dans les essais préliminaires (cf. Figure 6.2), 2) aucune limite inférieure n'est donnée pour les divers  $S$ , 3) l'effet du frottement sur la pente du radier entre la vanne et le pied du ressaut est négligé, 4) les distances entre le pied du ressaut et le seuil sont imposées et par conséquent 5) il n'y a pas de distinction entre les différents types d'écoulement. De plus, les données fournies en annexe sont sous forme adimensionnelle, si bien qu'il est impossible de connaître les valeurs absolues  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $s$ ,  $L$  et  $Q$ . Ses résultats sont donc sujets à caution.

Rajaratnam [36] en 1964 présente une théorie générale pour le ressaut forcé par seuil. Il décrit des géométries de dissipateurs pour obtenir le ressaut forcé, plus particulièrement il traite en détail six cas typiques d'écoulement avec un seuil. Il rejoint par là la description de Rand. Il exprime le coefficient de traînée  $C_D$  en fonction de  $F_1$ , du rapport des hauteurs conjuguées  $Y=h_1/h_2$  et de la hauteur relative du seuil  $S=s/h_1$ . A la suite d'essais, il établit un diagramme de la variation de  $C_D$  avec  $L_S/L_R$ , où  $L_S$  est la position du seuil par rapport au pied du ressaut et  $L_R$  la longueur du rouleau (cf. Figure 2.24). Les points expérimentaux sont dispersés, mais Rajaratnam propose une courbe moyenne et divise le domaine de  $L_S/L_R$  en quatre zones choisies selon les cas typiques d'écoulement. Les mêmes considérations sont appliquées aux autres configurations (blocs, marches, combinaisons) provoquant un ressaut forcé. L'auteur ne s'est pas intéressé à la structure interne du ressaut.

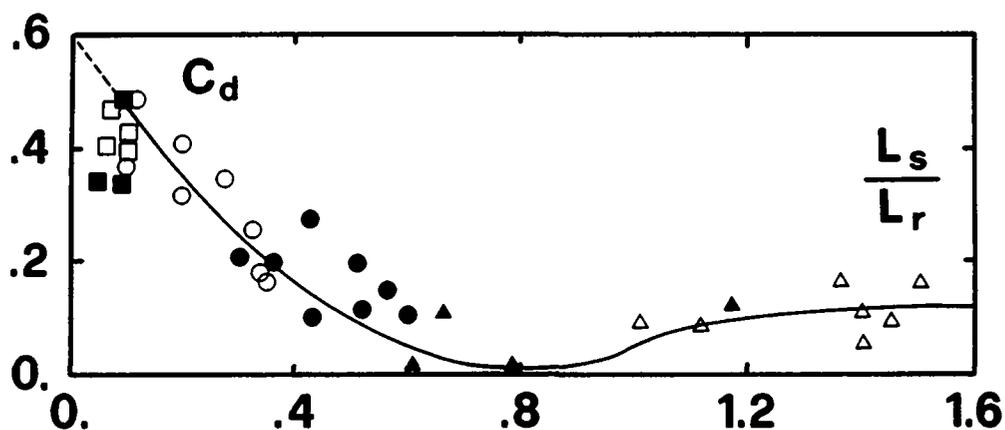


Figure 2.24 : Variation du coefficient de traînée  $C_d$  en fonction de la position relative du seuil  $L_s/L_r$  dans l'écoulement [36]; points expérimentaux et courbe moyenne.

Rajaratnam et Murahari [40] en 1971 ont poursuivi les recherches précédentes à la lumière des travaux de Rand. Le coefficient de traînée est rendu dépendant de  $S$ , contrairement à l'article de 1964. Ils ont aussi établi des diagrammes  $C_d = f(L_s/h_1)$  pour chaque valeur de  $S$ , puis les ont regroupés sur un seul avec  $C_d \cdot S = f(L_s/h_1)$  pour que les courbes ne se chevauchent pas. Les profils de surface et les vitesses sont mesurés. L'écoulement est analysé à l'aide du modèle du jet de paroi plan turbulent, mais les résultats présentent une forte dispersion. La couche limite et la répartition des vitesses sont étudiées en détail par analogie au jet libre courbé. Leur sonde à fil chaud ne leur a toutefois pas permis d'effectuer des mesures de vitesse à l'intérieur du rouleau de surface à cause de la présence d'air en grande quantité. La Figure 2.25 présente la répartition des vitesses dans le ressaut forcé par un seuil à paroi mince, tronquée dans la zone du rouleau de surface à l'amont du seuil.

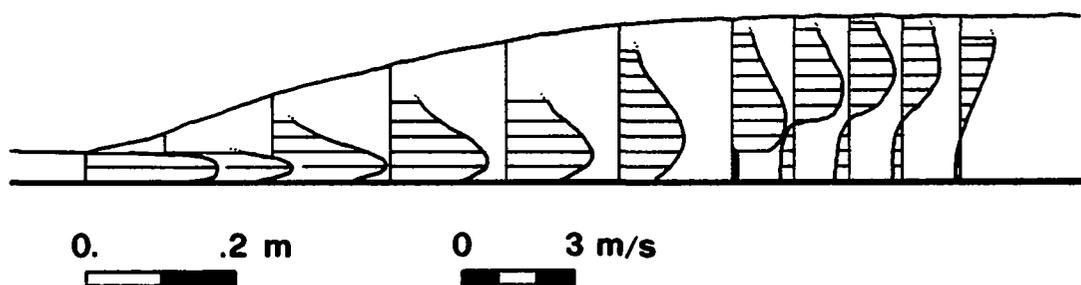


Figure 2.25 : Ressaut forcé par seuil à paroi mince : répartition des vitesses pour  $F_1 = 5.6$  et  $s = 50$  mm. [40].

Karki et al. [27] en 1972 ont analysé les écoulements entièrement torrentiels par-dessus des seuils aux conditions initiales de formation du ressaut, i.e. le niveau aval est libre et le ressaut ne peut pas se former. Leurs observations indiquent une condition de "splashing-over" pour la valeur  $S < 1.25$  et  $F_1 > 1.75$ . Si  $S > 1.25$ , le jet ne décolle plus mais l'écoulement reste torrentiel de part et d'autre du seuil; toutefois le nombre de Froude  $F_1 = 4$  n'est pas dépassé dans leurs essais. La répartition des pressions sur la face amont du seuil est quasiment uniforme pour les cas étudiés.

Deux formules sont d'autre part établies : la première exprimant  $S = f(h_c, h_1)$  avec  $h_c$  la hauteur de la lame d'eau à la section où l'onde est maximale à l'aval du seuil, et la seconde donnant la hauteur d'eau maximale  $h_{max}/h_c = f(h_1, h_c)$  en négligeant les pertes de charge car le ressaut n'est pas présent.

A la suite de cette publication, Karki [26] en 1976 a étudié le ressaut forcé par seuil en portant une attention particulière à l'analyse des pressions sur le fond et sur les faces verticales du seuil, sans submersion depuis l'aval. Il indique que le coefficient de pression sur la face amont du seuil décroît quand  $F_1$  croît et que le minimum se situe à un quart de la hauteur du seuil et le maximum aux trois quarts (cf. Figure 2.26 b). Sur la face aval, pour certains  $F_1$  et  $S$ , le coefficient de pression peut être négatif; sa répartition est presque linéaire dans tous les cas. La distribution des pressions sur le fond montre une forte augmentation à l'approche du seuil et une certaine uniformité des valeurs au-delà de la chicane (cf. Figure 2.26 a). Le coefficient de traînée est analysé sur la base des essais et dans la condition "non-splashing-over", il s'est révélé être indépendant de  $F_1$ .

Narayanan et Schizas [33] en 1980 ont mesuré directement à l'aide d'un capteur de pression la force exercée sur le seuil par l'écoulement dont trois cas caractéristiques sont retenus : 1) jet entièrement torrentiel, 2) le ressaut forcé et 3) le

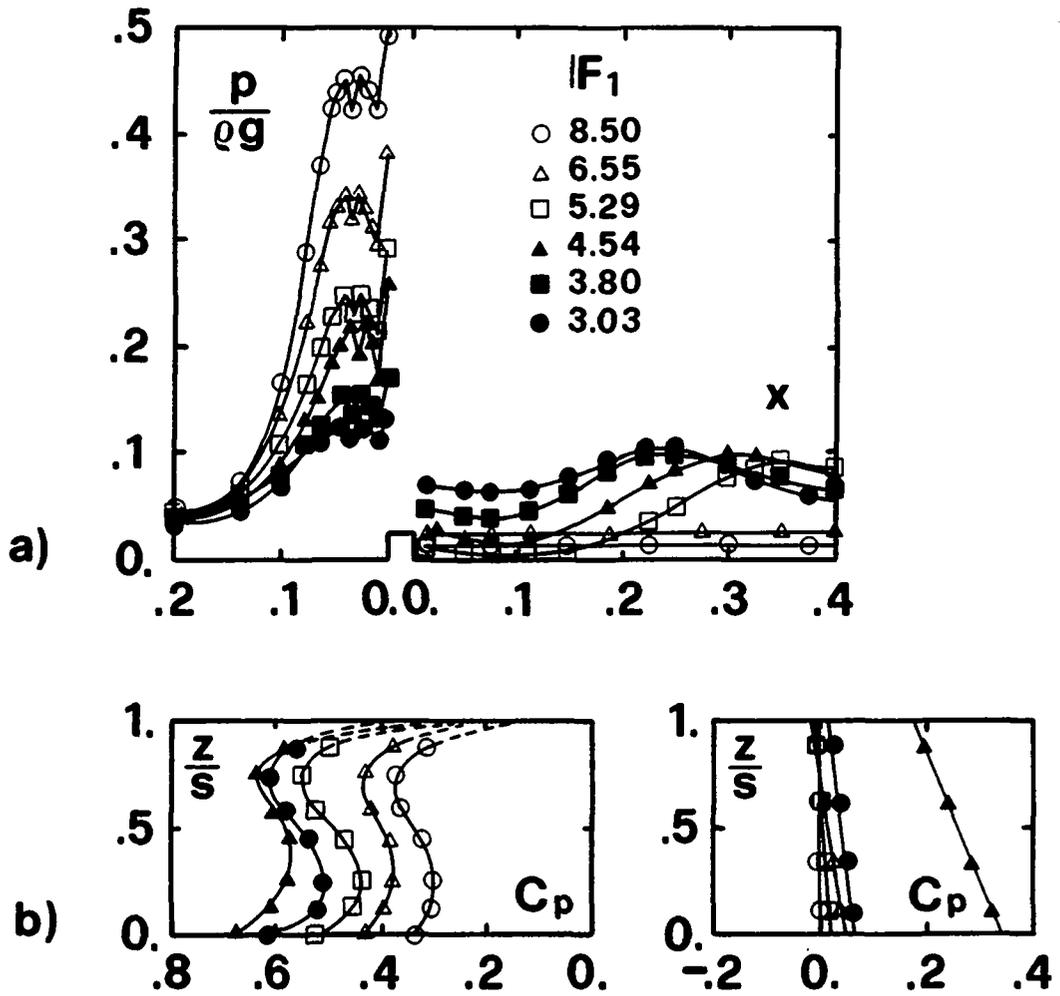


Figure 2.26 : Distribution des pressions pour le cas  $S=0.625$ . a) sur le fond du canal avec  $x$  la distance en m à partir du seuil et  $(p/\rho g)$  la pression en mce; b) sur les faces amont et aval du seuil avec  $C_p = p/(0.5\rho V_1^2)$  le coefficient de pression et  $z/s$  l'altitude relative des points de mesures; selon [26].

ressaut noyé. Les résultats obtenus pour le coefficient de la force de traînée  $C_D$  sont présentés à la Figure 2.27. Le cas du ressaut noyé est approché en détail avec la théorie du jet à la paroi. Deux diagrammes donnent la relation entre  $h_2/h_1$  et  $L_s/h_1$  pour  $S=1$  et  $S=2$ , mais une proposition pour le dimensionnement fait défaut.

Ohtsu [34] traite dans son article de 1981 du ressaut forcé par un seuil en paroi mince. Trois types sont distingués : 1) type I avec influence de l'aval sur l'amont, 2) type II sans cette influence et 3) jet sans formation de ressaut. Les hauteurs conjuguées sont exprimées par  $Y=f(F_1, S, \lambda, \chi)$  où

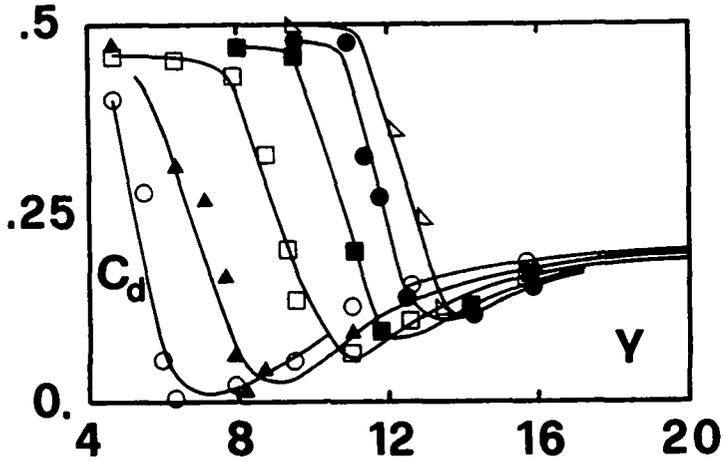


Figure 2.27 : Variation du coefficient de la force de traînée  $C_d$  en fonction de  $Y$  [33], avec les nombres de Froude  $F_1$  : (○) 3.99, (▲) 5.11, (□) 6.54, (■) 7.84, (●) 8.37 et (△) 9.09.

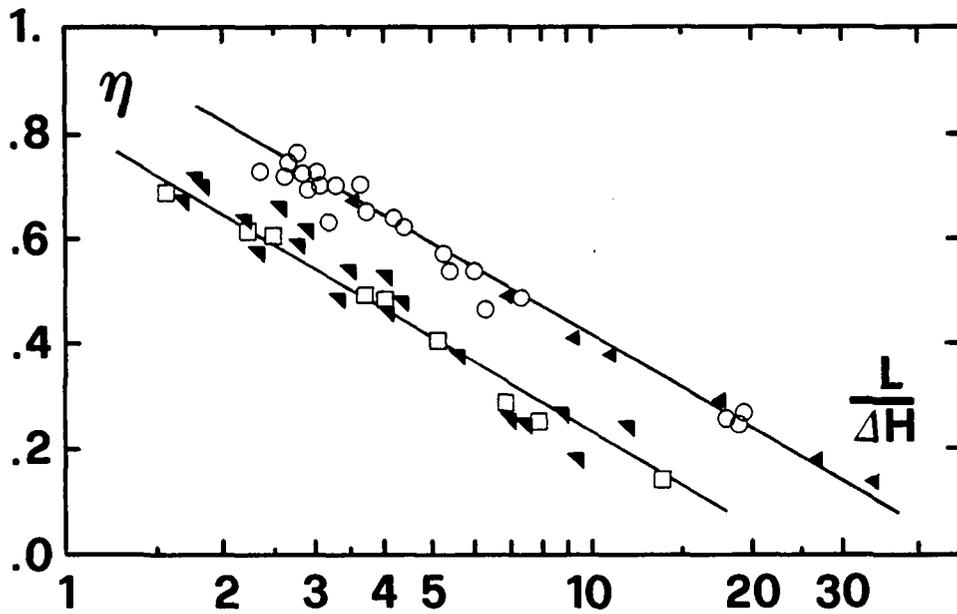


Figure 2.28 : Longueurs relatives à la perte de charge  $L/\Delta H=f(\eta)$ . Notations : (○) longueur d'écoulement non-uniforme, (◄) idem pour  $S=0$ , (□) longueur de la zone de séparation, (▼) idem pour  $S=0$ , selon [34].

$\lambda=L/h_2$  et  $\chi=x_s/L$ . Les longueurs de l'écoulement non-uniforme et de la zone de séparation (correspondant au rouleau de fond) sont présentées de manière originale : elles sont relatives à la perte de charge  $\Delta H$  et fonction de l'efficacité, avec une échelle logarithmique. La Figure 2.28 montre cette fonction

$L/\Delta H=f(\eta)$  pour les deux différentes longueurs mesurées; mais rien de plus n'est présenté sur la structure interne du ressaut.

Plus récemment, divers auteurs ont abordé quelques thèmes particuliers liés au ressaut forcé par seuil. Stein [61] en 1982 et Scheuer [55] en 1985 traitent du problème de la cavitation sur les seuils continus engendrée par les grandes vitesses. Ce phénomène se passe lorsque la lame d'eau animée d'une vitesse très élevée franchit l'obstacle sans décoller, i.e. l'écoulement reste torrentiel de part et d'autre. Le ressaut n'est donc pas présent. C'est un cas extrême hors du sujet de ce travail. Arandjelovic [01] en 1984 exécute des mesures dynamiques de pressions sur les seuils et présente quatre cas de figures comprenant les moyennes des valeurs mesurées sur chaque face du seuil, même si pour certaines faces seul un point de mesure existe ! Il s'agit plus d'une analyse statistique qu'hydraulique.

## 2.4 DIRECTIONS

Bien que de très nombreuses recherches aient été consacrées au ressaut hydraulique sous les plus divers aspects, le sujet semble ne pas être épuisé et il sera certainement l'objet d'autres travaux ces prochaines années. Mais les principales caractéristiques en sont acquises (hauteurs conjuguées, énergie dissipée). Il en va de même pour le ressaut forcé par marches positives ou négatives. Le ressaut forcé par blocs a également subi une multitude d'études et la variété des configurations et formes possibles en font un sujet de prédilection pour des recherches expérimentales.

En ce qui concerne le ressaut forcé par seuil, auquel ce travail est consacré, la littérature est moins fournie et le phénomène offre encore des possibilités d'analyses, notamment sur la connaissance du ressaut dans son écoulement interne et sur les principes de dimensionnement. Ceci correspond aux deux objectifs énoncés au premier chapitre.

A la suite de cette revue de la littérature concernant le ressaut hydraulique, deux articles principaux ressortent : celui de Rand [41] et celui de Macha [30]; leurs résultats concernant le dimensionnement sont contradictoires et seront comparés au chapitre 6 à ceux de la présente recherche.

Pour atteindre les objectifs visés, les aspects décrits ci-dessous seront abordés dans les chapitres suivants. Dans le chapitre 4, les différents types d'écoulement sont étudiés. A l'instar de Rand, une description détaillée et une classification des différents types d'écoulement du ressaut forcé par seuil sont élaborées. Ces premières observations doivent permettre de distinguer certaines limites pour la formation du ressaut. Trois paramètres sont étudiés, d'abord indépendamment les uns des autres, puis en combinaisons : le nombre de Froude amont  $F_1$ , le niveau aval  $h_2$  et la hauteur du seuil  $s$ . D'une part, l'attention est portée sur les hauteurs conjuguées caractérisant le ressaut forcé par seuil et les profils de surface. D'autre part, l'analyse des éléments longitudinaux est d'un intérêt particulier car une définition claire fait encore défaut. Ensuite l'influence de la largeur du seuil sur les hauteurs conjuguées  $y$  est analysée.

Enfin, les vitesses et les pressions sont l'objet d'une attention spéciale. En effet, peu d'informations existent sur la distribution des pressions, sauf sur le fond des canaux, et aucune mesure de vitesse axiale ou directionnelle à l'intérieur du ressaut n'a été entreprise de façon systématique à ce jour.

Dans ce chapitre 4, une proposition pour une nouvelle classification est fournie et trois types de ressaut forcé par seuil sont retenus pour une étude détaillée au chapitre 5 : ils ne sont pas seulement analysés dans la section médiane mais aussi dans quatre autres sections longitudinales. Ainsi les profils de surface, de vitesses, de lignes de courants et de pressions sont présentés. Ces mesures sont importantes dans la compréhension de l'écoulement interne du phénomène. Dans ce but, les directions des lignes de courant dans la zone du seuil sont l'objet d'une investigation spécifique. De plus les vitesses

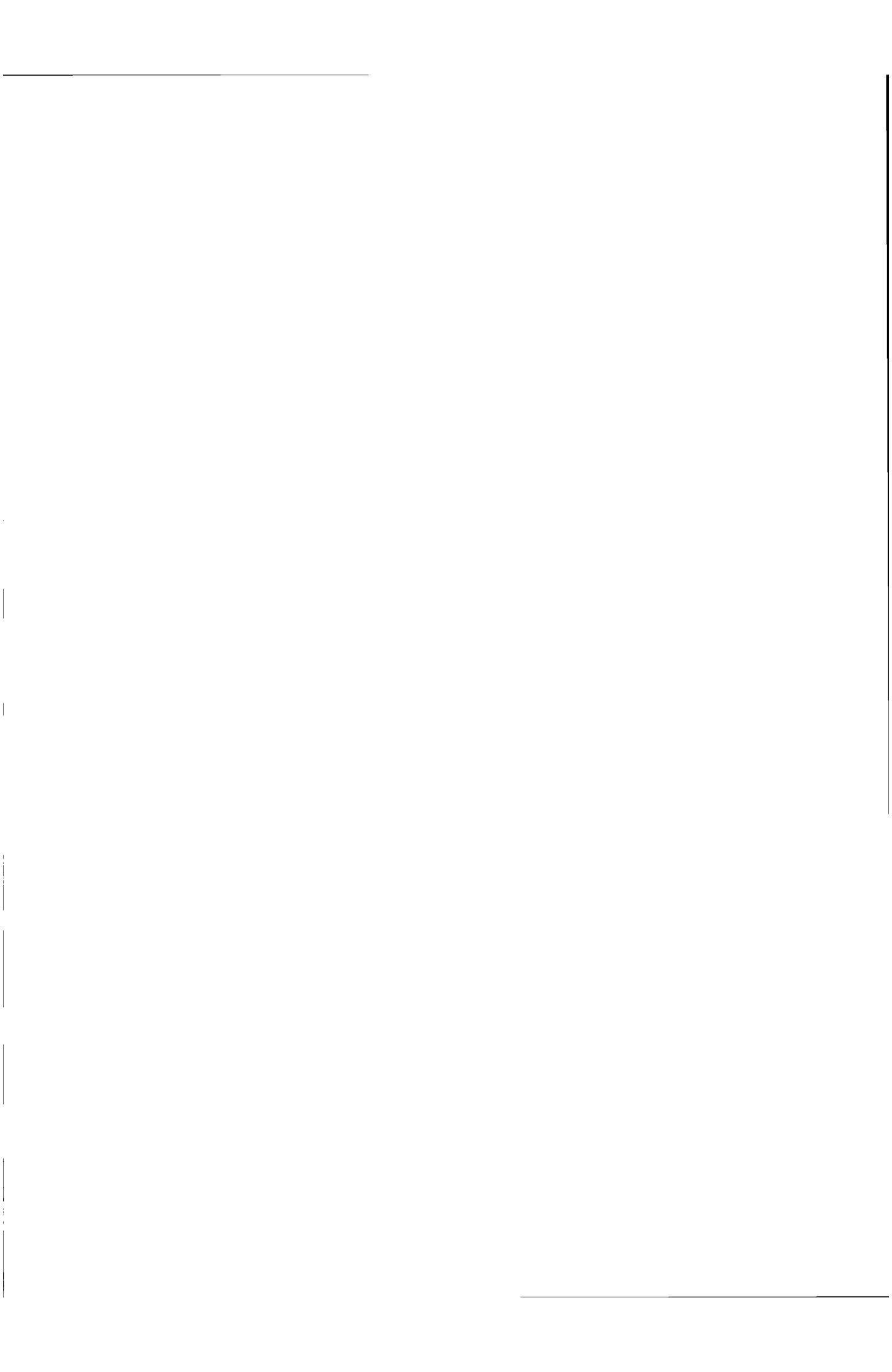
proches du fond peuvent servir de critère d'efficacité ou de protection contre l'érosion.

Le chapitre 6 traite du dimensionnement des dissipateurs à seuil. Avec l'étude des hauteurs conjuguées, des longueurs et de l'efficacité du ressaut forcé par seuil, des critères de choix et des principes de dimensionnement peuvent être tirés qui permettent de réaliser des ouvrages de dissipation efficaces et économiques.

RESSAUT HYDRAULIQUE  
FORCE PAR SEUIL

CHAPITRE 3

INSTALLATIONS EXPERIMENTALES  
ESSAIS PRELIMINAIRES  
DU RESSAUT CLASSIQUE



## C H A P I T R E 3

-----

### INSTALLATIONS EXPERIMENTALES ESSAIS PRELIMINAIRES DU RESSAUT CLASSIQUE

#### 3.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente d'une part les installations expérimentales en détail (installations fixes, seuils et instruments de mesures) qui sont utilisées pour le déroulement des essais, et d'autre part les essais préliminaires concernant la détermination des caractéristiques du canal de mesures et l'étude du ressaut hydraulique classique, i.e. dans un canal horizontal de section prismatique rectangulaire sans chicane, pour les deux configurations du canal utilisées.

#### 3.2 DESCRIPTION DES INSTALLATIONS FIXES

##### 3.21 Généralités

Les installations fixes sont constituées par le bassin d'alimentation, le canal de mesures, le canal de fuite et le système de circulation de l'eau. Elles se trouvent au sous-sol de la halle du Laboratoire d'Hydraulique de l'EPF-L et sont représentées sur la Figure 3.1.

##### 3.22 Bassin d'alimentation

Le bassin d'alimentation (cf. Figure 3.2) a une surface de  $10 \text{ m}^2$  et un volume de  $17 \text{ m}^3$ . Il est construit en plots de béton ( $280 \times 125 \times 175 \text{ mm}$ ) liés entre eux par du mortier traditionnel, le tout reposant sur un radier en béton de  $0.1 \text{ m}$  d'épaisseur. L'intérieur du bassin est crépi et une couche de peinture spéciale assure l'étanchéité. Les 2 conduites d'amenée de diamètre  $\emptyset = 300 \text{ mm}$  traversent le mur postérieur et se terminent par une crépine à l'intérieur du bassin.

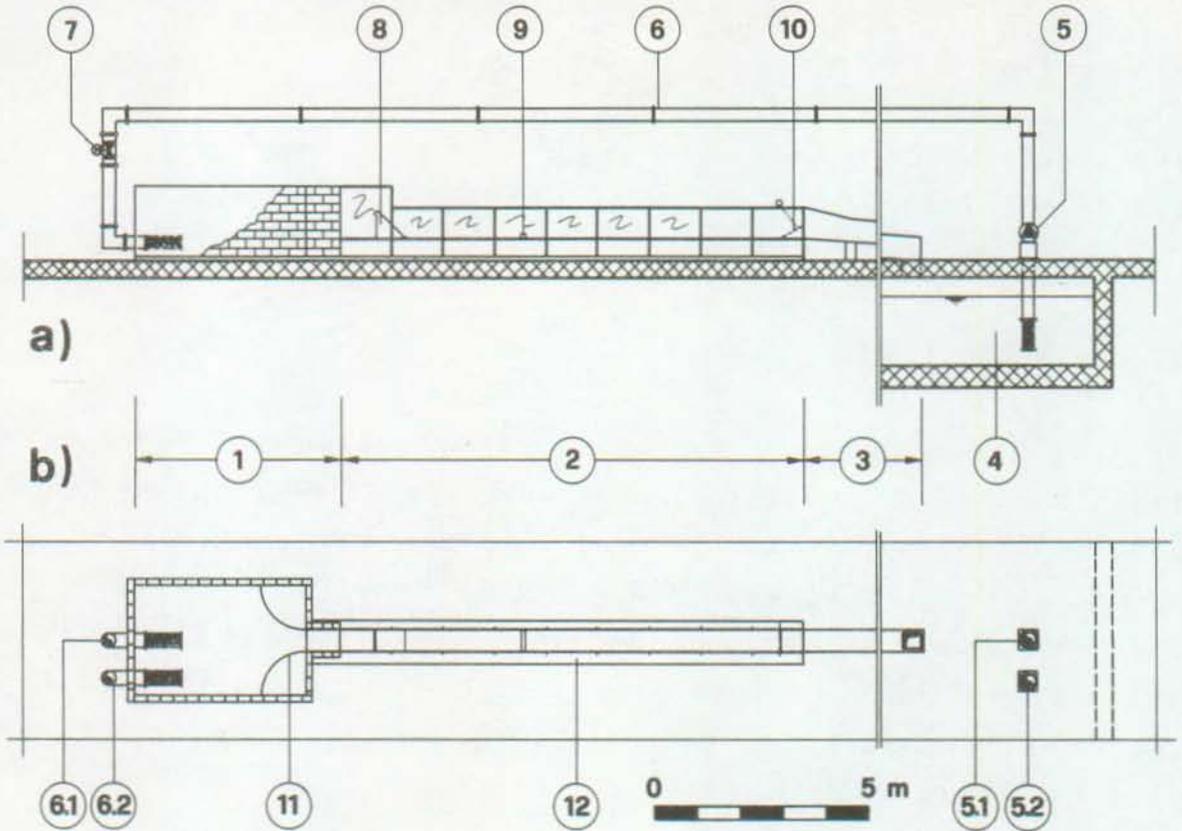


Figure 3.1 : a) vue latérale et b) vue en plan des installations, avec 1) bassin d'alimentation, 2) canal vitré de mesures, 3) canal de fuite, 4) bassin tampon, 5) pompe et débitmètre (5.1 pompe 30-250 l/s et 5.2 pompe 10-125 l/s), 6) conduites d'amenée  $\varnothing=300$  mm), 7) vanne avec servo-moteur, 8) déversoir standard hauteur 0.7 m, 9) emplacement fixe des seuils, 10) clapet de réglage de niveau, 11) guideaux du bassin d'alimentation et 12) radier.

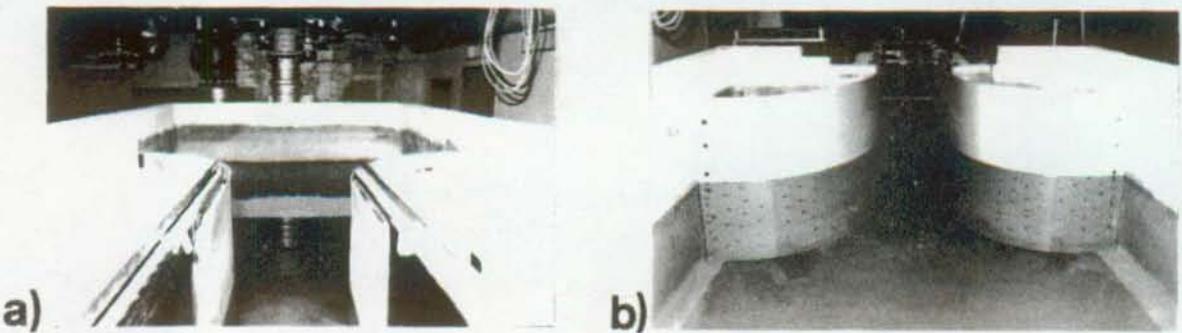


Figure 3.2 : Bassin d'alimentation ; a) vue depuis l'aval : arrivée des conduites et mur, et b) vue depuis l'amont : guideaux perforés en PVC et entrée du canal.

Le bassin est ouvert en direction du canal sur une largeur de 0.60 m et le premier tronçon de ce dernier est aussi construit avec des plots en béton. Deux guideaux en PVC régularisent l'écoulement pour la transition entre le bassin et le canal; des trous y sont présents pour avoir un niveau d'eau égal des 2 côtés des guideaux (cf. Figure 3.2 b).

### 3.23 Canal de mesures

Le canal de mesures (cf. Figure 3.3) est composé de 9 tronçons de 1.20 m de longueur (total = 10.80 m). Le premier tronçon à l'amont a une hauteur de 1.20 m et tous les autres 0.70 m.

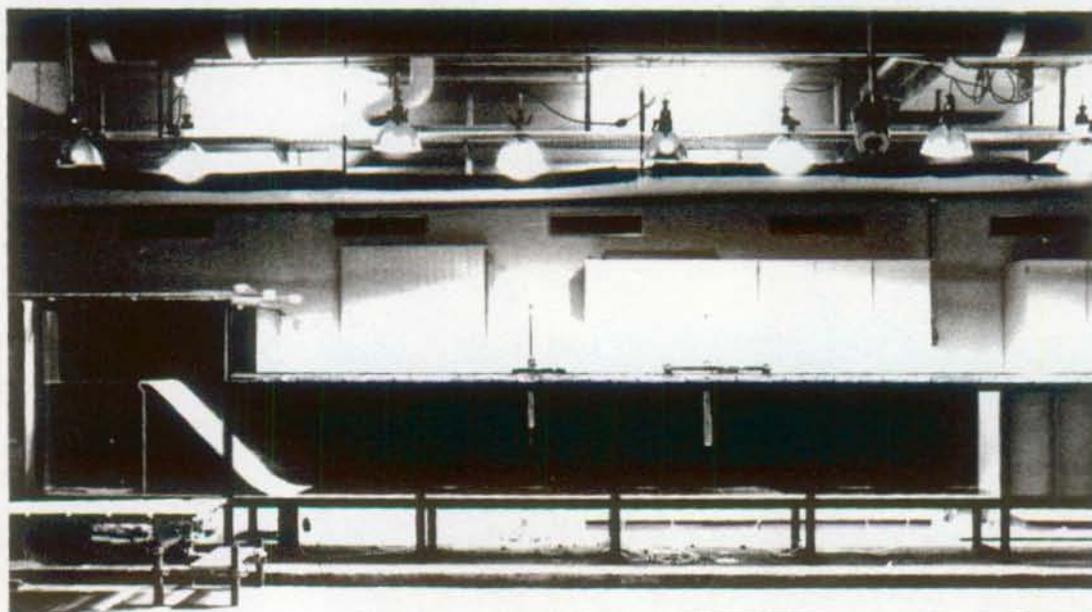


Figure 3.3 : Canal de mesures - tronçon vitré, avec le déversoir standard, les chariots avec le limnimètre et le moulinet, la rampe d'éclairage pour prises de vue.

Le châssis du canal est construit avec des profilés T en acier soudés. Le fond du canal, situé à 0.40 m du radier, et la paroi rive gauche sont en PVC noir soudé de 10 mm d'épaisseur; l'autre paroi est en verre de 15 mm pour permettre les observations et les prises de vue. La largeur intérieure aux parois est de 500 mm  $\pm$  1 mm. Les joints entre les plaques de verre sont réalisés avec du caoutchouc silicone, de même qu'entre le verre et le fond du canal. Ces principales dimensions sont représentées sur la Figure 3.4.

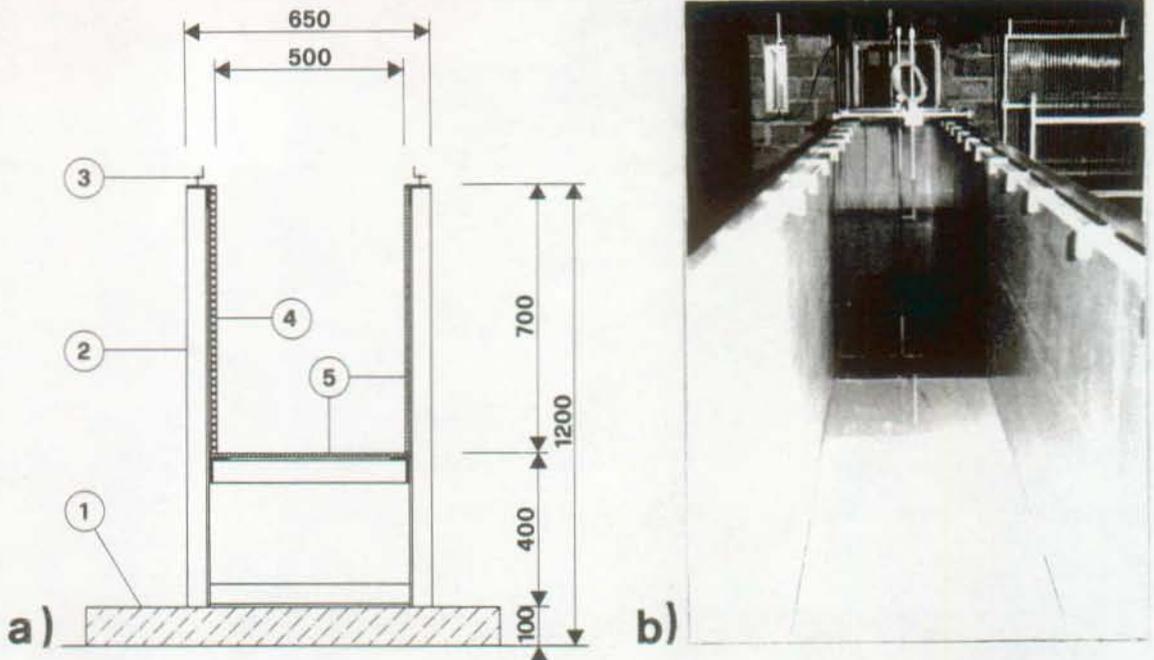


Figure 3.4 : Canal de mesures - tronçon vitré avec a) section type (cotes en mm) : 1) radier béton, 2) charpente métallique, 3) cornière servant de rail, 4) paroi en verre épais 15 mm et 5) fond et paroi en PVC épais 10 mm; et b) photographie dans l'axe du canal vers l'amont.

Le fond et la paroi en PVC sont renforcés tous les 0.30 m par des raidisseurs. Deux cornières en laiton fixées sur les bords supérieurs du canal font office de rails pour les chariots porte-instruments. Un ruban métrique est collé sur une des cornières et sert de référence pour l'axe longitudinal.

A l'entrée du canal, un déversoir standard est fixé sur le fond; il a 0.70 m de hauteur, une hauteur de dimensionnement  $H_D=0.10$  m et une pente aval de  $45^\circ$ . Il provoque la mise en vitesse de l'écoulement. Cette configuration est utilisée aux chapitres 4 et 5 pour les essais concernant le premier objectif. L'inconvénient de cette configuration est la dépendance directe entre le débit et la hauteur d'eau  $h_1$ . Pour le deuxième objectif traité au chapitre 6, cette première configuration s'est avérée restreignante et une autre configuration est ainsi adoptée. Elle est présentée au §3.27; elle permet donc de varier indépendamment la hauteur d'eau amont  $h_1$  et le débit.

A l'autre extrémité, un clapet en PVC permet de régler le niveau d'eau à l'intérieur du canal; il est manipulé par un enrouleur à 2 câbles (cf. Figure 3.5).

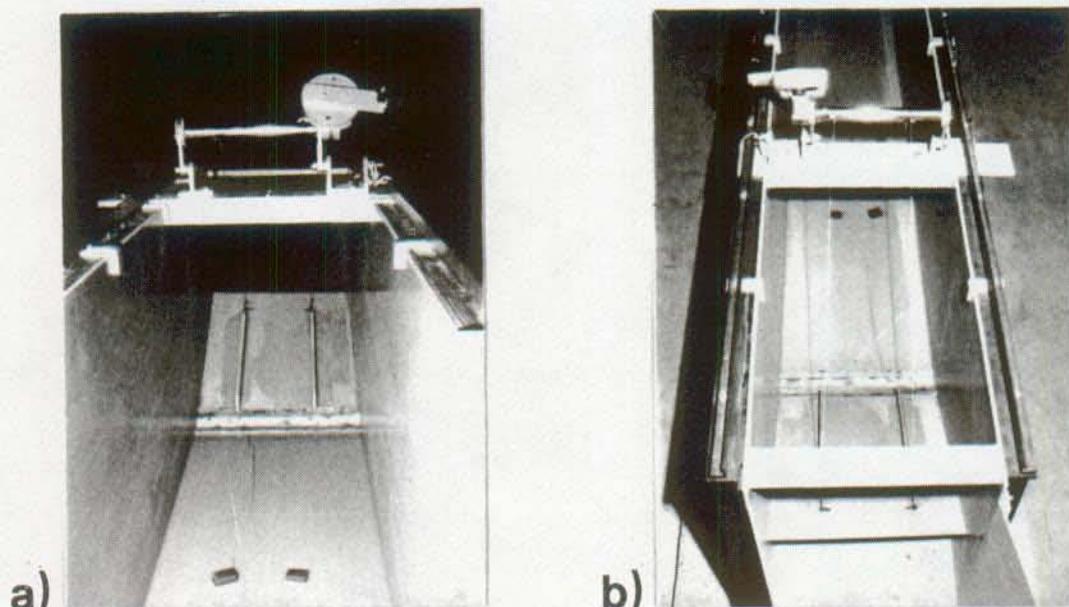


Figure 3.5 : Clapet de réglage du niveau avec enrouleur manuel à deux câbles : a) vue de l'amont et b) vue de l'aval.

Les axes de coordonnées sont définis à la Figure 3.6 comme suit :

1) l'axe  $x$  -coordonnée longitudinale- correspond à l'axe du canal ; le zéro est placé arbitrairement à l'intérieur du bassin d'alimentation ; l'écoulement se fait dans la direction de l'axe  $x$  ;

2) l'axe  $y$  -coordonnée transversale- parcourt la largeur du canal de droite à gauche, par rapport à l'écoulement, et le zéro correspond au plan de la paroi vitrée (rive droite) ;

3) l'axe  $z$  -coordonnée verticale- possède son zéro sur le fond horizontal du canal et est dirigé du bas vers le haut.

Ainsi un point quelconque à l'intérieur du canal est donné par ces 3 coordonnées  $(x,y,z)$  qui sont toujours positives par rapport au référentiel choisi.

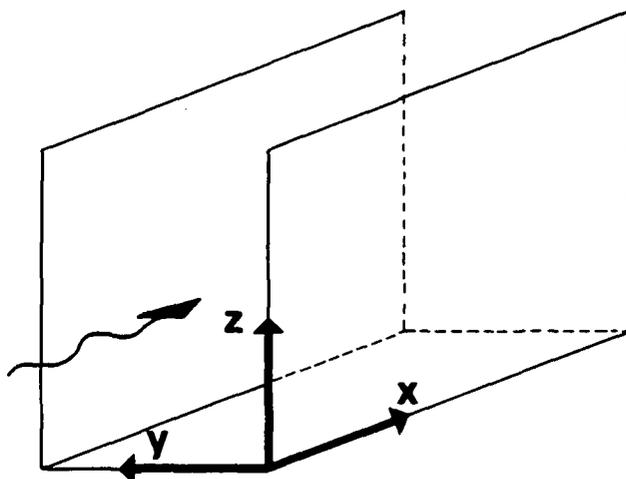


Figure 3.6 : Référentiel adopté pour le canal de mesures : x axe longitudinal, y axe transversal et z axe vertical.

### 3.24 Canal de fuite

Le canal de fuite réalisé entièrement en PVC gris soudé conduit par gravité l'eau du canal de mesures au grand bassin tampon. Il a une pente constante et un tracé polygonal; sa section est prismatique rectangulaire.

### 3.25 Circulation d'eau

Le schéma de la circulation d'eau est indiqué à la Figure 3.1. L'eau est pompée du grand bassin (capacité env. 800 m<sup>3</sup>) dans les conduites d'alimentation en aluminium  $\varnothing=300$  mm. Deux circuits sont à disposition : 1) avec une pompe débitant 30-250 l/s, et 2) avec pompe de 10-125 l/s. Les pompes sont montrées à la Figure 3.7/a+b. Les deux circuits sont indépendants et peuvent être utilisés simultanément. A la sortie des pompes, un débitmètre électromagnétique est installé qui permet de contrôler le débit d'eau en circulation. Les débits sont obtenus à partir de pupitres de télécommande (un par circuit) placés à proximité du canal; ils sont reliés au pupitre général de commande et à l'ordinateur de service situés dans la salle de commande centrale (cf. Figure 3.7/c+d). Les pompes sont étalonnées par tarage volumétrique, ce qui garantit la précision des débits. Lors des étalonnages, l'écart sur les débits a toujours été inférieur au 1% donné par le constructeur, se rapprochant même de 0% pour la pompe 2).

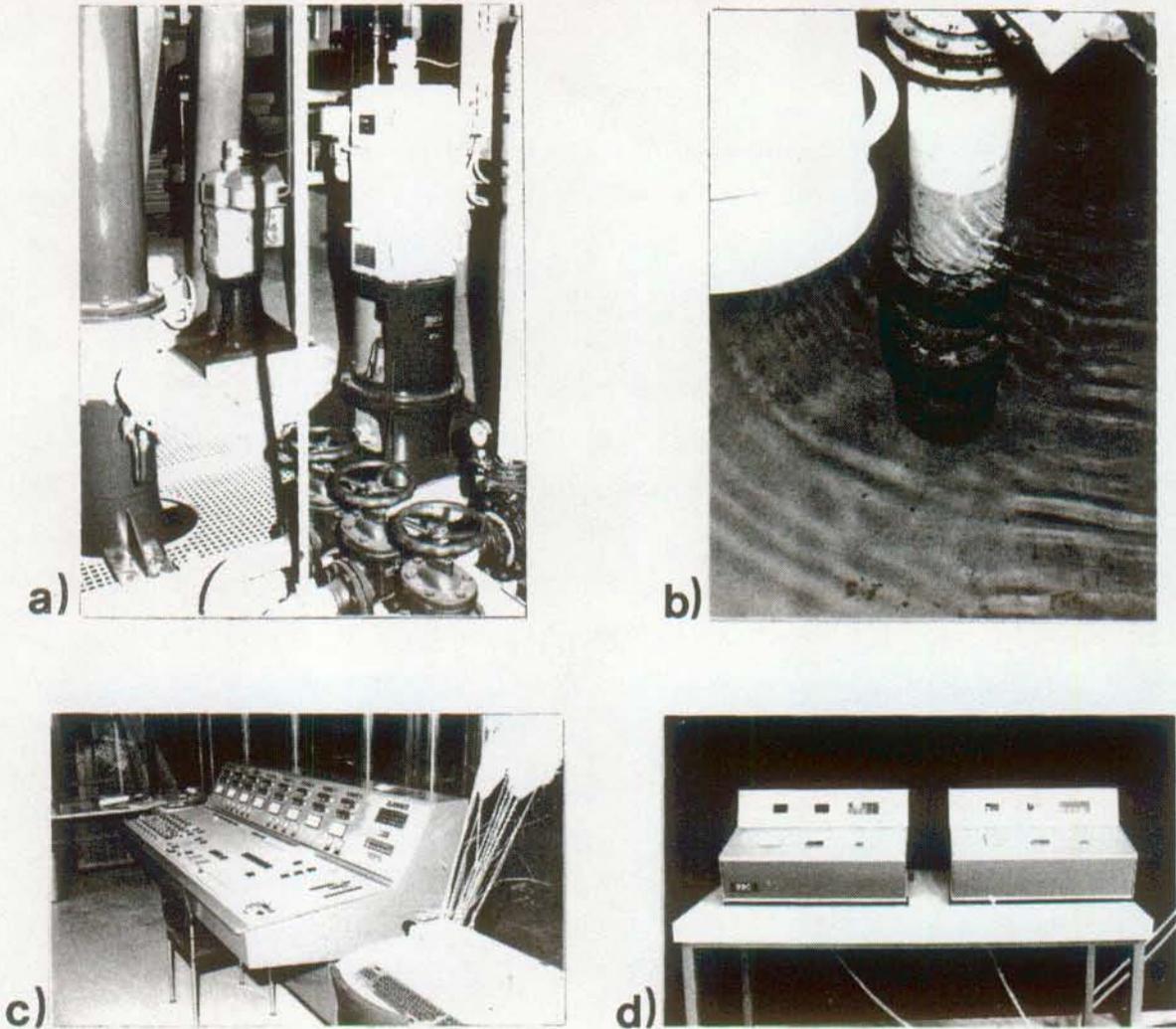


Figure 3.7 : a) Le local des pompes avec les pompes des circuits 1) (30-250 l/s, à droite sur la photo) et 2) (10-125 l/s), et b) tuyau avec crépine de la pompe immergé dans le bassin; c) pupitre général de commande des débits dans la salle de commande centrale et d) pupitres de télécommande, situés à côté du canal.

Les deux conduites ont à leur extrémité une vanne-papillon équipée d'un servo-moteur (cf. Figures 3.1 et 3.2). Le circuit 2) possède une vanne de régulation dont l'ouverture est programmée en fonction du débit pour avoir toujours une charge minimale de 10 m dans la conduite. Le circuit 1) n'a qu'une vanne simple ouverte-fermée; pour garantir la charge et éviter l'introduction d'air dans le réseau (la partie supérieure se met en dépression), la vanne doit être réglée manuellement à une certaine ouverture.

### 3.26 Seuils

Deux ensembles de seuils continus ont été utilisés, un par configuration du canal de mesures (cf. §3.23). Pour la première, les seuils sont au nombre de 12 (3 séries de 4) comme représentés sur la Figure 3.8. Ils ont les hauteurs  $s = 50, 75$  et  $100$  mm (cf. Figure 3.9). Les largeurs  $b$  sont dans les rapports  $b/s = 1/4 - 1/2 - 1 - 2$  de la hauteur. Sur les Figures 3.10 et 3.11 les seuils sont montrés en détail. Ils sont réalisés sous forme de caissons en PVC soudé. Des trous  $\emptyset = 2$  mm pour la mesure de la pression sont percés sur les 3 faces en contact avec l'eau. Les 6 trous se trouvent à proximité de la section médiane du seuil et sont disposés tels qu'indiqué sur le seuil no 2 de la Figure 3.8. Sur le fond du canal, les trous sont alignés entre ceux de fixation du seuil (cf. Figure 3.12). Des tuyaux flexibles les relient à l'intérieur du seuil sur la face du fond à de petits tubes en PVC rigide qui traversent le seuil et le plancher du canal à la section  $x=7.55$  m.

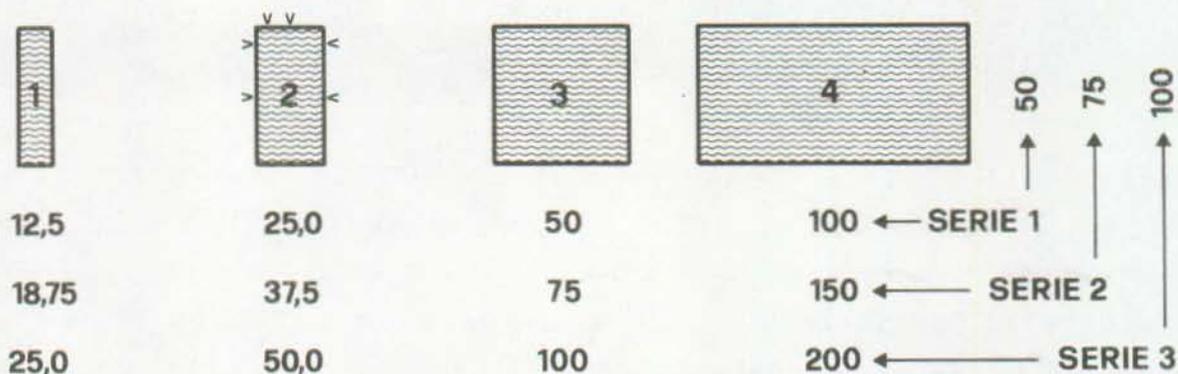


Figure 3.8 : Les 3 séries de 4 seuils avec cotes en mm; sur le seuil no 2, indication de la position des prises de pression.

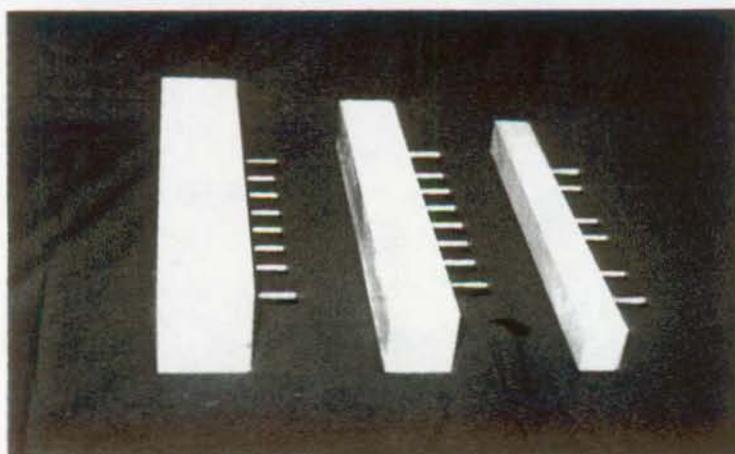


Figure 3.9 : Les seuils carrés de côté 100, 75 et 50 mm.

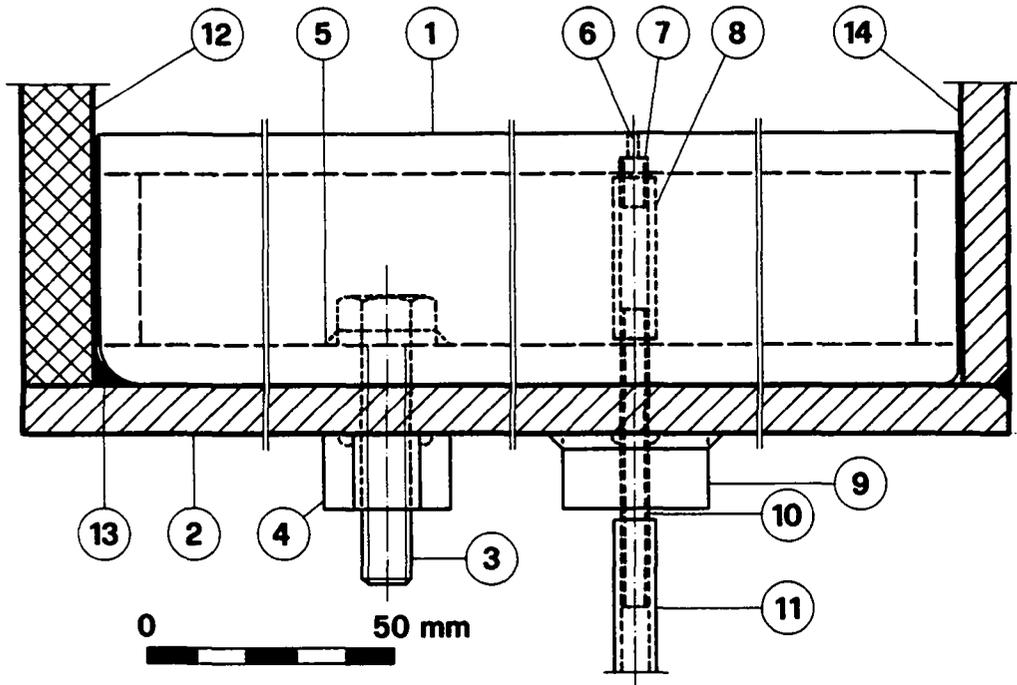


Figure 3.10 : Détail d'un seuil dans la section du canal avec 1) seuil en PVC soudé, 2) fond du canal en PVC, 3) boulon de fixation du seuil M10x50, 4) écrou spécial M22 à O-ring incorporé, 5) soudure plastique pour blocage du boulon, 6) prise de pression  $\varnothing=2$  mm, 7) manchon PVC  $\varnothing=6$  mm, 8) tuyau flexible de connexion  $\varnothing=9$  mm extérieur et  $\varnothing=6$  mm intérieur, 9) douille PVC avec O-ring incorporé, 10) tube PVC rigide  $\varnothing=6$  mm, 11) tuyau de raccordement à la batterie de piézomètres (identique à 8), 12) paroi vitrée de 15 mm, 13) joint caoutchouc-silicone et 14) paroi PVC 10 mm.

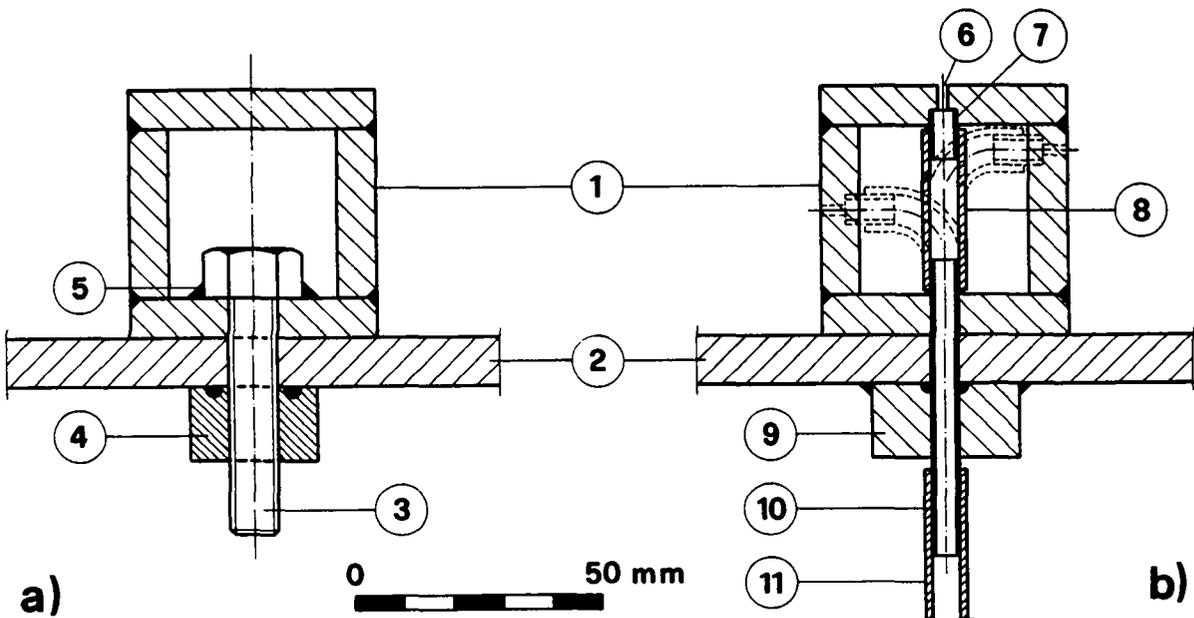


Figure 3.11 : Détail d'un seuil : a) section de fixation et b) section de prise de pression. Notations comme Figure 3.10.

Des cylindres en PVC  $\varnothing = 30$  mm et épaisseur 15 mm soudés sous le fond du canal assurent l'étanchéité des tubes par des O-ring. Des tuyaux flexibles les connectent à la batterie piézométrique. Les seuils sont montés avec 2 boulons M10x60 fixés à l'intérieur; les écrous spéciaux M22 avec O-ring incorporé garantissent la stabilité et l'étanchéité. Lorsqu'il n'y a pas de seuil dans le canal, les trous de fixation sont bouchés par de la plastiline et ceux de mesures de pression sont obturés par des chevilles en laiton  $\varnothing = 6$  mm et de 70 mm de longueur. La Figure 3.12 montre le système de fixation du seuil sur le fond du canal et de connexion des prises de pression.

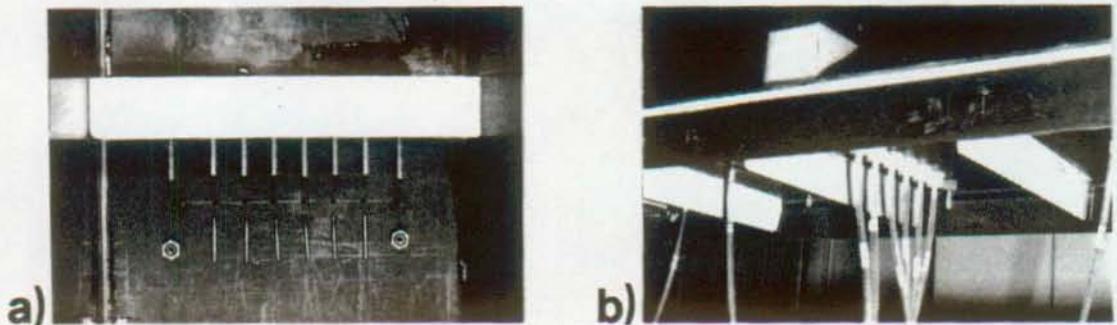


Figure 3.12 : Le seuil et son emplacement dans le canal; a) le seuil couché, le fond perforé, les écrous à O-ring incorporés et les chevilles d'obturation; b) le seuil en place et le raccordement des tuyaux flexibles sur les prises de pression traversant le fond du canal.

Pour la deuxième configuration, des seuils supplémentaires ont été utilisés en relation avec les hauteurs d'eau  $h_1$  plus faibles obtenues avec la vanne plane mobile décrite au §3.27. Ces nouveaux seuils sont en PVC massif et dépourvus de prises de pressions; ils sont fixés sur le fond du canal par deux boulons M8. Ils ont les dimensions suivantes  $s \times b$  (hauteur  $\times$  largeur) : 12.5  $\times$  12.5 mm, 25  $\times$  25 mm, 38  $\times$  15 mm et 50  $\times$  12 mm. Ils n'ont servi qu'aux mesures pour le chapitre 6 concernant les principes de dimensionnement.

### 3.27 Vanne plane mobile

Après les essais effectués pour mieux comprendre le ressaut forcé par seuil, il est apparu que les installations sont limitées dans le sens que hauteur d'eau et débit sont direc-

tement dépendants avec le déversoir. Dans cette configuration, il n'est pas possible d'avoir plusieurs débits pour une même hauteur. Ceci limite considérablement les cas exploitables. Pour pallier à cet inconvénient et afin d'obtenir des nombres de Froude amont plus élevés et des hauteurs d'eau indépendantes des débits, une vanne plane est montée à l'intérieur du canal, comme indiqué à la Figure 3.13. Cette deuxième configuration est utilisée pour les besoins du chapitre 6, correspondant au deuxième objectif. La structure soutenant la vanne repose sur les rails et y est fixée à l'aide de 4 dispositifs de blocage spéciaux. La vanne coulisse à l'intérieur de glissières latérales et contre 2 raidisseurs triangulaires montés en aval pour empêcher une déformation et un déplacement trop grands de la vanne. Une tige filetée avec 2 écrous à ailettes aux extrémités permet de maintenir la vanne en position par pression latérale sur les glissières. Le réglage de la vanne se fait par un volant sur la tige duquel sont fixées 2 roues dentées agissant sur 2 tronçons de crémaillères solidaires de la vanne.

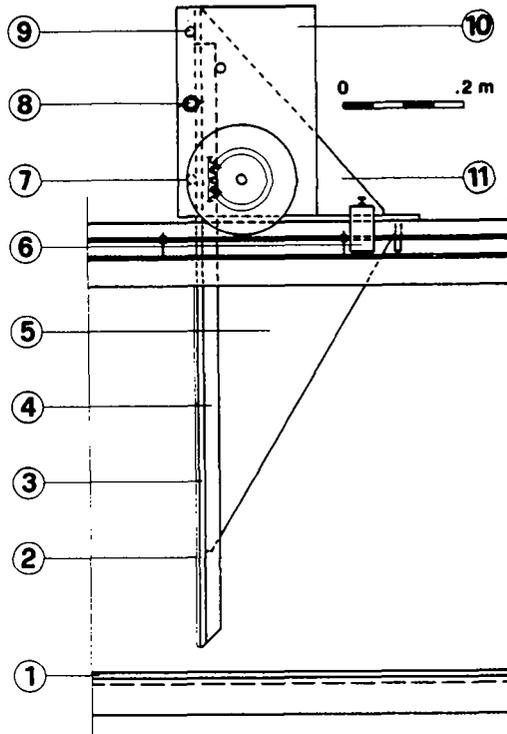


Figure 3.13 : Vanne plane avec 1) plancher du canal, 2) joint latéral, 3) vanne plane, 4) crémaillère, 5) raidisseur-glissière, 6) dispositif de blocage, 7) volant de manoeuvre, 8) tige filetée de serrage avec écrous à ailettes, 9) tige d'appui, 10) structure de support, 11) raidisseur.

L'étanchéité entre la vanne et les parois du canal est assurée par un joint du type à lèvre, composé d'un ruban adhésif sur la moitié de sa largeur fixé sur les bords de la vanne; la partie non-adhésive du ruban est appuyée sur les parois par la pression de l'eau. Ce dispositif permet de manoeuvrer la vanne sans aucune difficulté, tout en garantissant l'étanchéité.

### 3.3 INSTRUMENTS DE MESURES

#### 3.31 Généralités

Les instruments de mesures sont le limnimètre, les moulinets, les prises de pression et la batterie piézométrique, les sondes de directions verticale et horizontale, la sonde de pression. Les instruments sont insérés dans des boîtiers et posés sur des chariots porte-instruments. Tous ces instruments sont des prototypes, i.e. ils sont développés pour les besoins spécifiques de ces travaux de recherche. Les chariots et les boîtiers ont été réalisés par l'Ecole Technique de Ste-Croix et les instruments de mesures ont été fournis par Schiltnknecht SA à Gossau.

#### 3.32 Chariots porte-instruments

Les deux chariots sont réalisés en acier et laiton chromés. Le premier sert à l'utilisation du limnimètre et est de construction légère; le second, servant à celle des moulinets et des sondes de direction, est de construction lourde car l'instrument qu'il porte pénètre dans l'eau et subit la force de l'écoulement. La Figure 3.14 (voir aussi la Figure 3.15) montre les chariots avec les instruments en place sur les rails du canal.

Le chariot se compose de 2 bras parallèles (un court et un long) munis de galets de roulement, reliés entre eux par 2 tiges circulaires parallèles. Sur celles-ci se déplace un plateau porte-instrument qui peut être bloqué à l'aide d'une vis à ailettes. Les galets sont au nombre de trois : deux à gorge sur le long bras dont un est blocable par une vis, et un sim-

ple sur le bras court. L'instrument est mis dans un boîtier qui se place sur le plateau dans un orifice circulaire ouvert et peut être bougé selon l'axe vertical et maintenu à n'importe quelle hauteur par pression sur sa tige à l'aide de 2 vis à ailettes. Une vis à ailettes peut bloquer le plateau dans n'importe quelle position transversale sur les tiges. Le chariot se déplace sur les cornières en laiton fixées au-dessus du canal, le long de l'axe longitudinal. Ainsi l'instrument peut être positionné dans chaque point de l'écoulement.

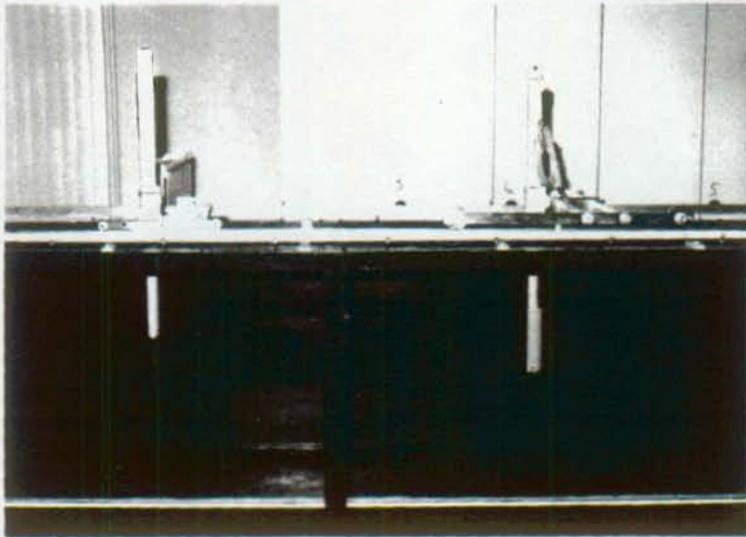


Figure 3.14 : Les deux chariots sur les rails du canal avec, à gauche, le chariot léger porte-limnimètre et, à droite, le chariot lourd porte-moulinet.

### 3.33 Limnimètre

Le limnimètre est composé d'un tube en aluminium de section ovale 30 x 15 mm et d'une longueur de 700 mm (cf. Figure 3.15 a). Un des 2 plats est usiné pour recevoir une réglette graduée autocollante; le zéro est fixé sur le fond du canal. La précision de lecture est le  $\frac{1}{2}$  mm, celle de mesure dépend des fluctuations de niveau et peut varier de  $\pm\frac{1}{2}$  mm à  $\pm 10$  mm. Le limnimètre possède une crémaillère sur un côté arrondi et prend place dans un boîtier en aluminium usiné avec éléments en PVC épousant le profil oval. Ce boîtier est mis sur le chariot léger. La lecture des hauteurs se fait sur la réglette au niveau du bord supérieur du boîtier qui sert de repère.

Trois pointes  $\emptyset = 6$  mm de différentes longueurs (70, 140 et 280 mm) peuvent être vissées sur un manchon fileté à l'extrémité du tube. Ce manchon possède un axe placé dans une sorte de pince en plastique permettant d'incliner la pointe de  $\pm 45^\circ$  et de la maintenir en position. Ce dispositif permet d'effectuer des mesures sur le déversoir dont la pente est de  $45^\circ$  et dans des endroits non atteignables par la verticale.

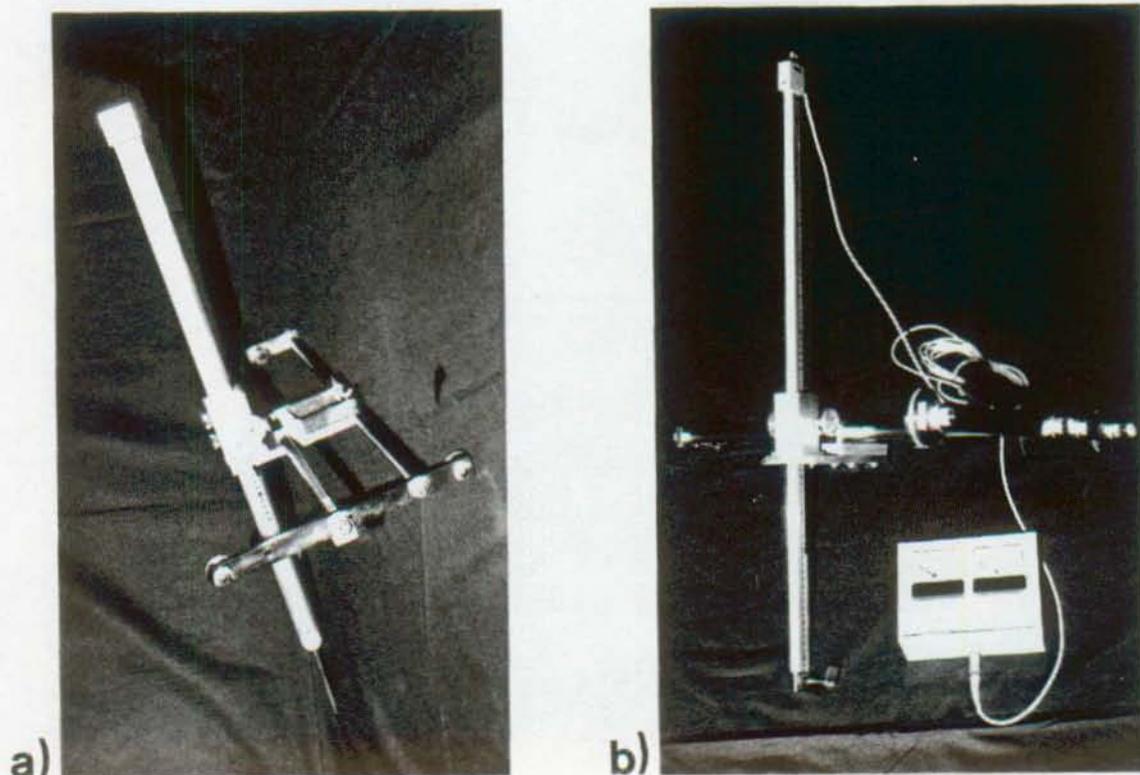


Figure 3.15 : a) le limnimètre en place sur le chariot léger et b) la sonde de direction verticale sur le chariot lourd avec le boîtier indicateur.

### 3.34 Moulinets

Les 2 moulinets Mini Mikro Water III sont du type à hélice. Ils sont composés d'un tube en aluminium identique à celui du limnimètre, à l'extrémité duquel une tige de section elliptique aplatie fixée perpendiculairement au tube porte l'hélice  $\emptyset = 10$  mm dans un anneau de protection. Sur un des deux instruments, cette tige est orientable de  $\pm 90^\circ$  par rapport à l'horizontale à l'aide d'une vis micrométrique placée en haut du tube. La Figure 3.16 présente le moulinet à tige non-orientable fixé sur le chariot lourd.

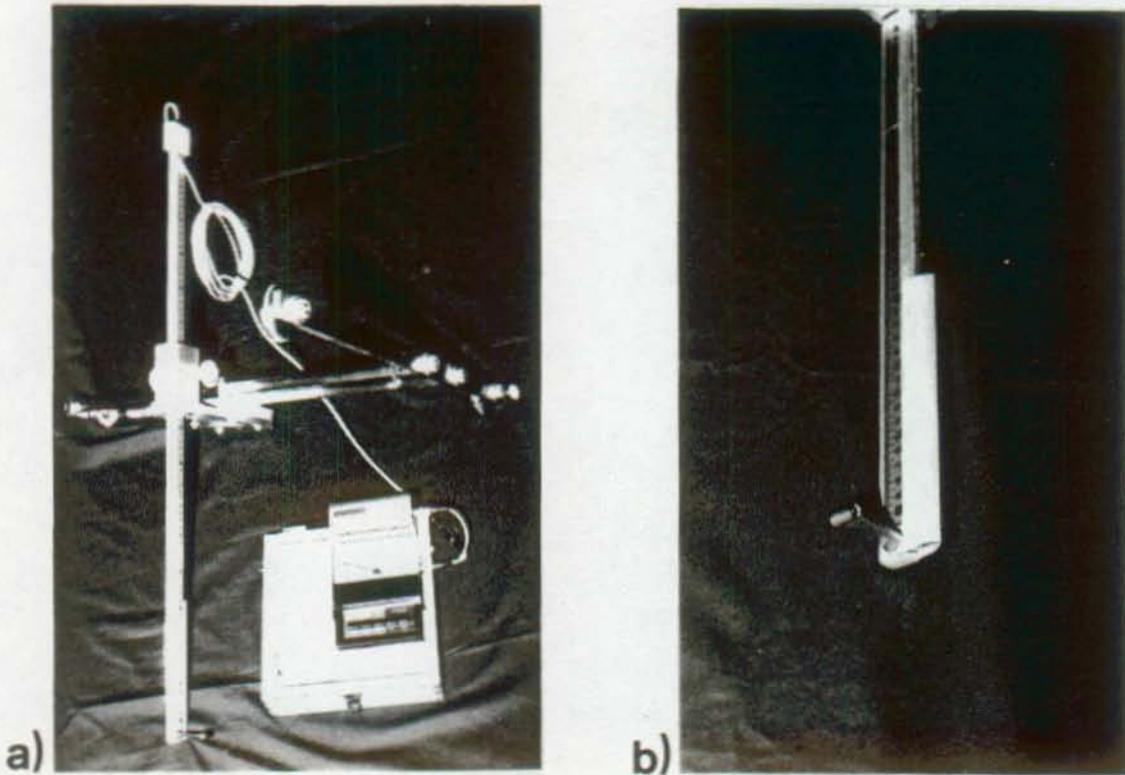


Figure 3.16 : a) le moulinet à tige non-orientable, en place sur le chariot lourd et avec le boîtier d'alimentation; b) détail de l'extrémité profilée du tube du moulinet.

Les derniers 200 mm du tube sont usinés sur un côté arrondi pour recevoir une pièce en PVC transformant le profil oval en profil du type aile d'avion (cf. Figure 3.16 b). De la sorte, l'écoulement est moins perturbé et le risque de complète aération du moulinet diminue fortement (voir l'étude détaillée de ces problèmes dans [19]). Particularité de ce moulinet : il est étalonné pour des mesures dans l'eau et dans l'air, ce qui le rend efficace dans le mélange biphasique du ressaut.

L'hélice en tournant actionne le système de mesure et les informations sont transmises par un câble à un boîtier d'alimentation par piles. Sur celui-ci, la vitesse est lue directement sur un indicateur tachymétrique à 3 gammes de vitesses : 0-0.5, 0-1.5 et 0-5 m/s; la précision de lecture est de 0.005, 0.01 et 0.05 m/s respectivement. La précision de mesure est <1% dans l'eau et <10% dans l'air : cette précision est suffisante pour les profils moyens de vitesses, avec l'avantage de pouvoir effectuer les mesures dans le mélange biphasique du

ressaut hydraulique. Un module enfichable donne digitalement par LCD la valeur moyenne de la vitesse en m/s avec 2 décimales par intégration sur un intervalle de 22 secondes. L'indicateur tachymétrique fournit la valeur instantanée de la vitesse de l'écoulement.

### 3.35 Sonde de direction verticale

La Figure 3.15 b) présente la sonde de direction verticale montée sur le chariot lourd, avec le boîtier d'alimentation. Cet appareil possède la même tige que les moulinets. A son extrémité se trouve un axe horizontal sur lequel se fixe une ailette en plastique équilibrée dans l'eau, i.e. l'ailette s'y maintient en n'importe quelle position quand la vitesse de l'écoulement est nulle. Deux modèles d'ailettes sont à disposition : une petite 16x25 mm pour les écoulements perturbés et une grande 32x50 mm pour les écoulements à petites vitesses et peu perturbés. La sonde est dite de direction verticale car elle mesure les angles dans un plan vertical. L'axe tourne dans un cylindre et par contact électrique indique la direction des filets d'eau au travers d'un boîtier d'alimentation et de lecture (avec 2 échelles :  $\pm 90^\circ$  et  $\pm 180^\circ$ ). La précision de lecture correspond à la moitié de la plus petite unité d'échelle :  $2.5^\circ$  et  $5^\circ$  respectivement. L'aiguille de lecture est solidaire d'un galvanomètre qui réagit aux impulsions de la sonde; ce système possède une certaine inertie et lorsque l'ailette oscille autour de  $180^\circ$ , l'aiguille le fait autour de  $0^\circ$  car elle n'a pas le temps de se déplacer d'une extrémité de l'échelle à l'autre. Hormis ce cas particulier, la précision de mesure est de  $\pm 5^\circ$  et  $\pm 10^\circ$  respectivement, dépendant de l'importance des fluctuations au point de mesure.

### 3.36 Sonde de direction horizontale

La Figure 3.17 a) présente la sonde de direction horizontale. Elle mesure l'angle des lignes de courant par rapport à l'axe longitudinal x dans un plan horizontal. L'instrument est composé de l'habituel tube oval en aluminium à l'intérieur duquel une tige rigide peut tourner. A l'extrémité inférieure de celle-ci est fixée une ailette; à l'autre extrémité, une

aiguille indique l'angle de déviation sur un rapporteur circulaire gradué en degrés. La précision de lecture est le  $\frac{1}{2}$  degré et celle de mesure est de  $\pm 5^\circ$ , étant données les fluctuations inhérentes au ressaut hydraulique. Contrairement à la sonde de direction verticale, cet instrument ne comporte aucune partie électrique et réagit spontanément à toutes les variations de direction du courant.

### 3.37 Prises de pression statique

Les prises de pression statique correspondent à des trous  $\emptyset = 2$  mm percés à l'axe et à 50 mm du bord gauche sur le fond du canal distants 0.30 m les uns des autres (cf. Figure 3.12). Les prises sont branchées par des tuyaux flexibles sur une batterie piézométrique (cf. Figure 3.17 b) composée de 2x20 tubes en verre montés sur un châssis métallique équipé d'un bras mobile de lecture avec fil et miroir, et d'une réglette graduée pour chaque côté. Le fil et le miroir assurent la lecture dans un plan horizontal tangent au ménisque de la surface de l'eau dans les tubes. La précision de la lecture est le  $\frac{1}{2}$  mm et celle de mesure de  $\pm 5$  mm, à cause des variations instantanées. Deux niveaux à bulle sont logés dans la base du châs-

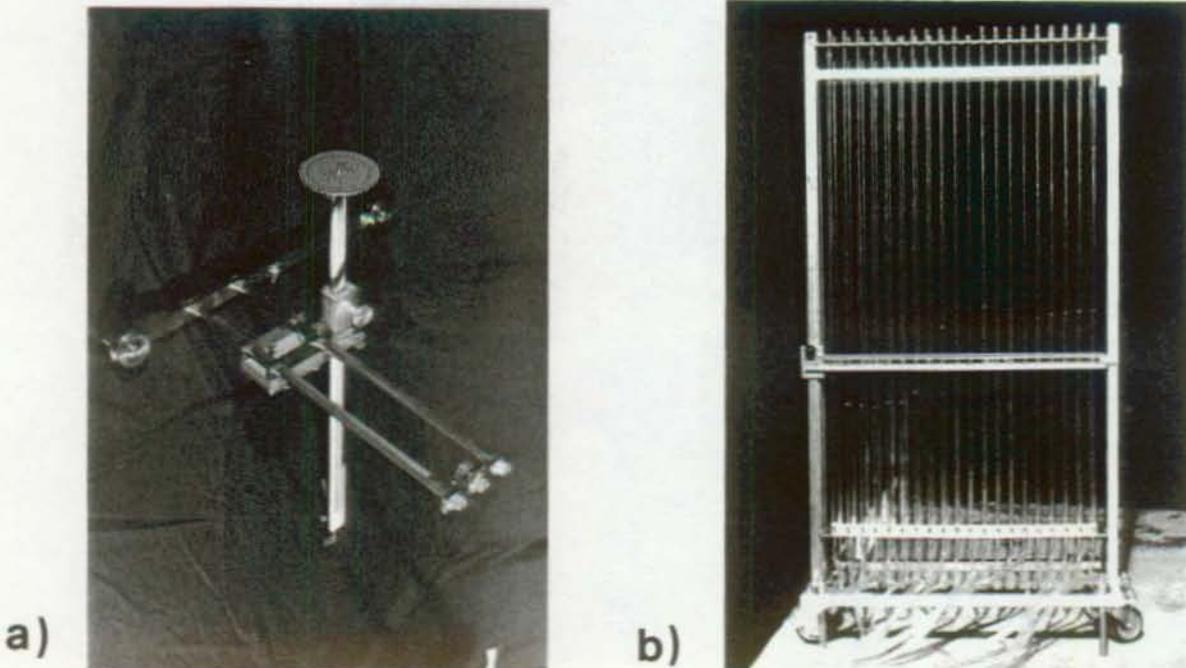


Figure 3.17 : a) sonde de direction horizontale sur le chariot lourd et b) batterie de piézomètres avec bras de lecture.

sis et quatre pieds réglables garantissent la stabilité de la batterie et sa verticalité.

### 3.38 Sonde de pression

Il s'agit d'un tube Prandtl adapté à notre système d'instruments, voir Figure 3.18. Il se compose d'une tige verticale en aluminium de section ovale avec une section profilée du type aile d'avion à son extrémité inférieure. Un petit tube circulaire  $\varnothing=5$  mm est fixé perpendiculairement au bout de la tige; la distance entre la pointe du tube et l'axe de la tige est de 150 mm. Le petit tube de mesure comporte les 2 prises de pression : 1) un trou  $\varnothing=2$  mm à son extrémité pour la pression dynamique (charge) et 2) 5 trous  $\varnothing=1$  mm répartis sur le périmètre à 20 mm de 1). Deux tuyaux flexibles en PVC raccordent la sonde à un châssis avec 2 tubes en verre permettant la lecture des valeurs de pression; cette construction est solidaire du chariot porte-instrument et se déplace avec lui. Le plateau tenant l'instrument et fixé au chariot peut être orienté dans

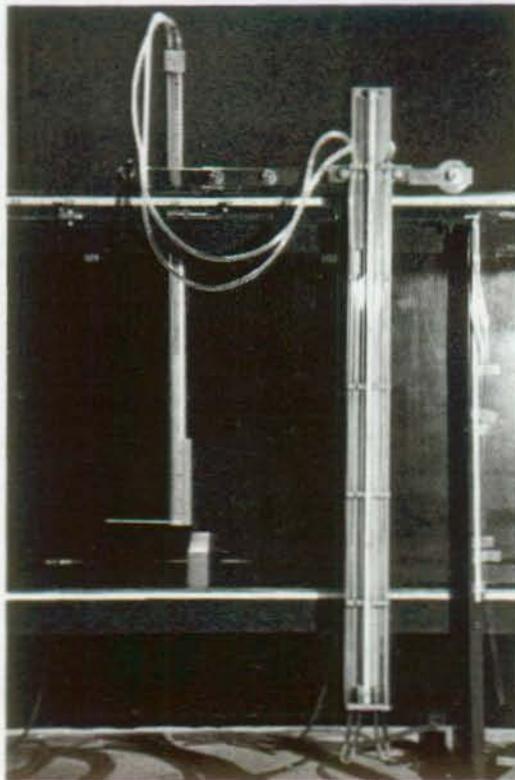


Figure 3.18 : Sonde de pression avec tube de mesure  $\varnothing=5$  mm, montée sur le chariot avec dispositif de lecture solidaire.

le plan vertical. La précision de la lecture est le  $1/2$  mm et celle de mesure est la même, les fluctuations dans les deux tubes étant pratiquement inexistantes.

Dans l'annexe 8.2, un étalonnage de cette sonde de pression est présenté et concerne l'influence sur les mesures de l'angle d'attaque de la sonde dans les plans horizontal et vertical par rapport à la direction principale de l'écoulement. Il en ressort que l'angle dans les deux plans peut varier de  $\pm 10^\circ$ ,  $\pm 20^\circ$  et  $\pm 30^\circ$  respectivement pour la pression, la charge et la vitesse (obtenue à partir de la pression et de la charge), sans que l'erreur de la mesure ne dépasse la tolérance de 5%, excepté pour les faibles vitesses ( $V < 1$  m/s).

### 3.4 ESSAIS PRELIMINAIRES DE BASE

#### 3.41 Généralités

Les essais préliminaires de base consistent à déterminer les caractéristiques du canal de mesures tel qu'installé avec un déversoir du type standard à son entrée. Il s'agit de définir le domaine hydraulique auquel appartient le canal d'une part et de déterminer la hauteur d'eau  $h_1$  dans la configuration du canal avec le déversoir standard et celle avec vanne plane, d'autre part.

#### 3.42 Frottement

L'intérieur du canal sur lequel l'eau coule, est constitué de verre et de PVC. Ces deux matériaux peuvent être considérés comme pratiquement lisses [24], c'est-à-dire que la rugosité équivalente de sable  $k_s$  est très faible ( $< 0.01$  mm).

Le nombre de Reynolds  $R$  caractérise l'état laminaire ou turbulent est défini, pour des écoulements dans des canaux découverts, par :

$$(3.1) \quad R = 4R_h \cdot v / \nu,$$

où  $R_h$  est le rayon hydraulique (rapport de la surface au périmètre mouillé),  $V$  la vitesse moyenne de l'écoulement et  $\nu$  la viscosité cinématique ( $\nu = 1.15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  pour de l'eau à  $15^\circ\text{C}$ ). Dans nos essais, le domaine est  $10^4 < R < 10^6$ . Ainsi il se restreint à la courbe enveloppe (lisse) du diagramme de Moody. Les écoulements retrouvés dans notre canal d'essais appartiennent donc au domaine pratiquement lisse; le coefficient de frottement dépend alors uniquement du nombre de Reynolds  $R$ . Dans ces conditions, le coefficient de frottement  $f$  est donné par l'équation implicite de Nikuradse-Prandtl :

$$(3.2) \quad 1/\sqrt{f} = 2 \log(R \sqrt{f}) - 0.8.$$

Pour  $2.3 \cdot 10^3 < R < 10^5$ , le coefficient de frottement  $f$  peut être approché par l'équation de Blasius :

$$(3.3) \quad f = 0.316 / R^{1/4}.$$

L'équ. (3.2) n'est strictement applicable que pour des écoulements dans des conduites en charge. Par analogie pour les canaux découverts, l'équ. (3.2) est corrigée par un facteur de forme  $f_0$  [05] intervenant sur le nombre de Reynolds :

$$(3.4) \quad 1/\sqrt{f} = 2 \log(f_0 R \sqrt{\pi}) - 0.8$$

Ce facteur de forme se calcule par l'équation expérimentale suivante (selon Bock [05]) :

$$(3.5) \quad f_0 = 1.13 (R_h/B)^{1/4}$$

avec  $B$  la largeur du canal.

Avec ces éléments, il est possible de calculer la pente de frottement  $J_f$  d'un écoulement dans un canal, définie par l'équation de Darcy-Weisbach :

$$(3.6) \quad J_f = f_0 \cdot V^2 / (8gR_h).$$

L'effet de frottement sur les hauteurs conjuguées du ressaut classique est approché analytiquement sur la base de ces informations et est présenté à l'annexe 8.3.

### 3.43 Détermination de la hauteur d'eau $h_1$ dans la configuration avec déversoir standard

La hauteur d'eau  $h_1$  à l'amont du ressaut influe fortement sur les paramètres de base  $F_1$ ,  $Y$  et  $S$ . Il importe donc de s'assurer de l'exactitude de sa mesure. Une telle détermination est réalisée dans la section située à  $x=6.50$  m, qui correspond approximativement à la valeur moyenne de la position du pied du ressaut pour les divers débits, dans la configuration du canal avec déversoir standard à son entrée pour la mise en vitesse de l'écoulement. Afin de cerner au mieux la valeur précise des hauteurs et de pouvoir comparer entre eux différents résultats, plusieurs procédés sont utilisés pour ce contrôle :

- 1) mesure directe par limnimètre,
- 2) mesure directe par piézomètre,
- 3) calcul à partir de mesures de vitesses,
- 4) calcul à partir des hauteurs conjuguées.

Ces différents procédés sont présentés ci-après et les valeurs obtenues sont représentées sur la Figure 3.19. Pour la détermination de la hauteur  $h_1$  à la section  $x=6.5$  m, le ressaut n'est pas présent lors des mesures. Les débits ont varié de 40 à 200 l/s avec 20 l/s d'intervalle.

1) Le premier procédé est la mesure directe à l'aide du limnimètre. Etant données les variations de hauteur d'un écoulement torrentiel dans une section transversale dues à la turbulence, aux ondes de choc provoquées par l'écoulement par-dessus le

Q (l/s)	40	100	140	200
h min (mm)	25.5	51.5	71.5	95.5
h max (mm)	27.5	62	82	112
$\Delta$ (%)	8	20	15	18

Tableau 3.2 : Fluctuations de niveau dans la section  $x=6.5$  m; mesures par limnimètre : valeurs extrêmes et écarts pour 4 débits.

déversoir et les frottements le long des parois, 6 points sont relevés sur la largeur et la moyenne des mesures est pondérée pour atténuer les effets de bords. Les fluctuations de niveau (cf. Tableau 3.2) sont dans une certaine mesure indépendantes de la hauteur d'eau (donc du débit).

Ces fluctuations sont importantes. Ceci implique une grande prudence quant à l'utilisation de valeurs moyennes ainsi mesurées et demande confirmation par d'autres procédés.

2) La batterie piézométrique a la même précision que le limnimètre. La hauteur d'eau en une section est fournie par la moyenne des valeurs de 3 prises de pression (une dans la section même, les deux autres respectivement 0.3 m en amont et en aval de la première). Le niveau des piézomètres est très stable pour de faibles débits et les oscillations augmentent avec les grands débits. Toutefois, ce procédé comporte trop peu de points de mesures.

3) La procédure de mesures de vitesses est spécifique à cette détermination de la hauteur  $h_1$ . Le moulinet est positionné dans la section de mesures et pendant le temps d'intégration, le moulinet est déplacé et balaye toute la section transversale à une hauteur donnée. Ce procédé permet d'obtenir une valeur moyenne de la vitesse dans cette section à cette hauteur  $z$ . La moyenne de trois mesures est prise en considération pour chaque hauteur  $z$ . Ces opérations sont répétées tous les 10 mm en hauteur. Dans les cas de mesure près de la surface, une valeur est extrapolée, en se rapportant à la valeur précédente sans aération. De plus, une correction est apportée à la valeur de la vitesse la plus proche du fond (le moulinet permet d'arriver jusqu'à 15 mm du fond) par un coefficient pour tenir compte de la répartition des vitesses tout près du fond. En admettant une vitesse à 15 mm du fond  $V_{15}=1$  m/s (l'indice de  $V$  correspond à la hauteur  $z$  de la mesure),  $V_5=0.75$  m/s est supposé pour la vitesse à 5 mm, ce qui donne la vitesse moyenne  $V=0.875$  m/s et le coefficient de correction vaut  $V/V_{15}=7/8$ . La hauteur est obtenue comme suit : avec le débit  $Q$  et la répartition des vitesses en direction horizontale connues sur une hauteur  $h_0 < h$ , l'intégration fournit le

débit  $Q_0 < Q$ . Sur le dernier élément  $n$  de hauteur restant  $(h-h_0)$ , la vitesse  $V_n$  est supposée égale à celle de l'élément précédent, ce qui permet de calculer la hauteur du dernier élément  $\Delta h = (Q-Q_0)/V_n$  et partant la hauteur totale dans la section  $h = h_0 + \Delta h$ .

4) Le procédé des hauteurs conjuguées consiste, pour un débit donné, à fixer la position du pied du ressaut à l'endroit où la hauteur  $h_1$  doit être déterminée. La hauteur d'eau à l'aval du ressaut  $h_2$  est mesurée, l'erreur relative étant faible rapportée à cette hauteur, et la hauteur  $h_1$  est calculée par la formule de Bélanger. La position du pied du ressaut en une section garantit une valeur de  $h_2$  précise (pour les débits jusqu'à 120 l/s), car une faible variation  $\Delta h$  de cette hauteur entraîne un fort déplacement  $\Delta x$  du ressaut (e.g. pour  $Q=60$  l/s,  $\Delta h=10$  mm et  $\Delta x=1.60$  m !). Au-delà les fluctuations de surface sont importantes et la précision de la mesure diminue.

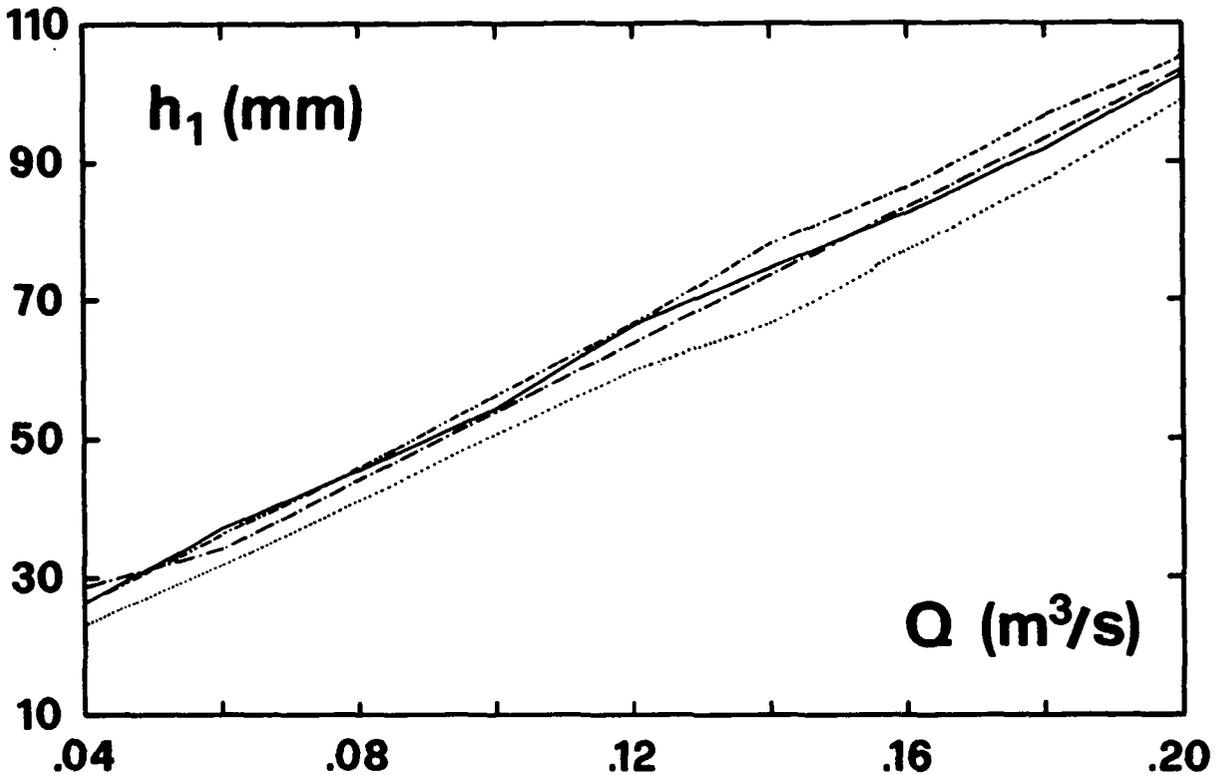


Figure 3.19 : Courbes hauteurs-débits  $h_1=f(Q)$  obtenues selon les différents procédés : 1) (—) mesure directe par limnimètre, 2) (...) mesure directe par piézomètre, 3) (-.-) calcul selon les vitesses, 4) (-.-.) calcul selon les hauteurs conjuguées.

La Figure 3.19 fournit une première indication sur la cohérence des mesures et calculs. En effet, toutes les courbes sont pratiquement parallèles et contenues dans un faisceau de largeur constante, i.e. les écarts absolus maximaux sont identiques pour n'importe quel débit. Relativement, la dispersion et l'erreur sont plus importantes pour les faibles débits, comme déjà souligné plus haut.

Pour la détermination de la hauteur d'eau  $h_1$ , la Figure 3.19 indique comme borne supérieure la courbe 4) calculée à partir des hauteurs conjuguées. La valeur aval  $h_2$  est bien déterminée comme vu plus haut, jusqu'à un débit donné, et la hauteur amont  $h_1$  est calculée avec la formule de Bélanger qui donne des valeurs trop élevées, car elle néglige les frottements à l'intérieur du ressaut.

La borne inférieure correspond à la courbe 2) des pressions; ce procédé est fiable pour des débits jusqu'à env. 100 l/s, au-delà, il semble devoir être soumis à caution à cause des fluctuations importantes. Le système de piézomètres amortit d'autre part ces oscillations; les valeurs mesurées s'avèrent être les plus basses parmi celles des 4 procédés.

La courbe 1) donnée par le limnimètre et la courbe 3) des vitesses corrigées sont proches l'une de l'autre et de la borne supérieure. Les valeurs de la courbe 1) sont élevées à cause de la mesure du plan d'eau dont la surface n'est pas lisse en raison des ondes de choc qui s'y développent. La courbe 2) se situe presque à mi-distance entre les bornes et a l'allure d'une droite. Le point pour  $Q=40$  l/s se situe en dehors des bornes, cela provient de la difficulté de mesurer les vitesses dans de faibles hauteurs d'eau, à cause de l'aération du moulinet : ce point est à écarter.

La courbe hauteurs-débits à retenir doit s'approcher de celle obtenue par les mesures de vitesses (courbe 3), méthode la plus fiable; toutefois pour les débits inférieurs à 60 l/s, cette courbe diverge à cause des difficultés de mesure dans les faibles profondeurs d'eau. Pour ces mêmes débits, la courbe 2) offre le plus de garanties; par contre pour des débits

supérieurs à 80 l/s, le procédé de mesures par piézomètre présente les inconvénients décrits plus haut. Les deux autres courbes 1) et 4) sont situées légèrement au-dessus de la courbe 3). La courbe hauteurs-débits peut être approchée par une droite dont les valeurs de  $Q$ ,  $h_1$  et  $F_1$  sont indiquées au Tableau 3.3.

Les débits extrêmes utilisés sont  $Q=40$  l/s et  $Q=200$  l/s. La valeur inférieure est imposée car pour un débit plus faible, la lame d'eau atteint très vite le régime fluvial sous l'influence des forces de frottement non négligeables en rapport avec la hauteur d'eau. Un ressaut ondulatoire apparaît depuis l'aval et les conditions torrentielles disparaissent. D'autre part, le moulinet ne peut être utilisé dans un écoulement de hauteur d'eau inférieure à 25 mm à cause de l'aération de l'instrument et de la valeur de vitesse erronée qui en résulte. La valeur supérieure  $Q=200$  l/s est déterminée pour les raisons suivantes : 1) la limite de hauteur  $h_2$  à l'aval est atteinte dans le canal pour obtenir le ressaut, au-delà le canal déborde, 2) le débit est élevé et l'écoulement est perturbé déjà sur le déversoir standard et a fortiori dans le canal de mesures, et 3) le nombre de Froude ne varie plus que de peu en augmentant le débit.

Les limites pratiques de débit pour une utilisation optimale des installations sont  $40 \text{ l/s} < Q < 200 \text{ l/s}$  ce qui correspond à  $3.5 < F_1 < 8$ . Toutefois, pour des raisons descriptives, des débits dépassant ces limites peuvent être utilisés, avec les précautions qui s'imposent. La courbe hauteurs-débits retenue est indiquée par les valeurs du tableau 3.3, ainsi que les nombres de Froude correspondants. Les essais du ressaut forcé par seuil des chapitres 4 et 5 se basent sur ces valeurs.

$Q$ (l/s)	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$h_1$ (mm)	23	33	43	53	63	73	83	93	103
$F_1$ (-)	7.23	6.36	5.73	5.23	4.87	4.56	4.3	4.09	3.92

Tableau 3.3 : Valeurs de la courbe hauteurs-débits, pour la configuration du canal avec déversoir standard.

### 3.44 Détermination de la hauteur d'eau $h_1$ dans la configuration du canal avec vanne plane

Dans cette dernière configuration utilisée pour les besoins du chapitre 6, la hauteur d'eau  $h_1$  est déterminée directement par l'équ. (2.5), à partir de la charge et du débit. Cette détermination est exacte car l'équ. (2.5) ne contient que 2 variables connues avec précision. Dans cette deuxième configuration du canal, la charge amont a varié entre 0.3 et 0.7 m et donc la hauteur d'eau  $h_1$  entre 6 et 38 mm, ce qui correspond à  $5 < F_1 < 13$ .

## 3.5 ESSAIS PRELIMINAIRES SUR LE RESSAUT CLASSIQUE DANS LA CONFIGURATION DU CANAL AVEC DEVERSOIR STANDARD

### 3.51 Généralités

Dans le but de tester les installations et de se familiariser avec les instruments, les essais préliminaires portent sur le ressaut hydraulique dit classique, i.e. se produisant dans le canal horizontal de section prismatique rectangulaire, dans la configuration avec déversoir standard pour la mise en vitesse de l'écoulement. Après la description des essais et des mesures, la comparaison des résultats obtenus pour les hauteurs conjuguées et les profils de surface du ressaut classique avec la littérature existante confirmera ou non le bon fonctionnement des installations.

La simple observation du ressaut hydraulique dans un canal d'essais en laboratoire fait apparaître la complexité du phénomène : il s'agit d'un écoulement tridimensionnel à forte recirculation d'un fluide biphasique, avec d'importantes fluctuations spatio-temporelles de toutes les caractéristiques (hauteurs, longueurs, vitesses, directions, pressions). Il paraît donc ardu de prime abord de s'attaquer au problème du ressaut hydraulique et surtout avec des moyens simples. Il en va de même pour le ressaut forcé par seuil qui sera traité aux chapitres 4 à 6. Toutefois, en considérant le ressaut forcé

par seuil dans l'environnement où il a lieu, i.e. dans un bassin amortisseur qui lui-même est un élément d'un ensemble de constructions hydrauliques conçu par un ingénieur civil, les difficultés soulevées ci-dessus semblent s'estomper quelque peu. Dès lors, pour atteindre les buts fixés au chapitre 1, il n'est pas question d'analyser dans le détail toutes les fluctuations existantes des grandeurs caractéristiques du ressaut, mais plutôt d'en approcher l'allure générale par des valeurs moyennes dans le temps mesurées avec soin. Par là-même, la transposition entre le modèle et le prototype s'en trouve facilitée.

### 3.52 Description des essais

Ces essais préliminaires traitent du ressaut classique dont les principales caractéristiques sont rappelées à la Figure 2.2 (cf. §2.21). Ils se déroulent de la manière suivante : pour un débit  $Q$  donné, le ressaut est provoqué par exhaussement du niveau aval à l'aide du clapet et est stabilisé en la position choisie  $x=6.5$  m, comme indiqué au §3.43. Les mesures des différents grandeurs sont effectuées à l'aide des divers instruments.

L'écoulement est mis en vitesse par le déversoir standard : jusqu'à la section de pied du ressaut ( $x=6.5$  m), il se développe complètement et le profil de vitesses dans cette section est du type turbulent. Au §3.6, lors des essais avec la vanne plane, la position du pied du ressaut est immédiatement à l'aval de la vanne et le profil des vitesses dans cette section est du type uniforme. Aucune influence de l'un ou l'autre type de profil de vitesses n'a été constatée sur l'allure du ressaut hydraulique et ses caractéristiques. Il en est de même pour l'entraînement d'air par l'écoulement à l'amont du ressaut : cela reste pratiquement sans effet sur les caractéristiques de l'écoulement [23]. Aucune étude n'a été entreprise dans ce sens.

### 3.53 Mesures

La façon d'effectuer les mesures est expliquée ci-après pour

chaque grandeur mesurée à l'intérieur du ressaut : le niveau d'eau, la pression sur le fond et les vitesses. Elle concerne aussi bien les essais du ressaut classique que ceux du ressaut forcé par seuil. Lorsque la procédure diffère de celle décrite ci-dessous, cela est indiqué dans le texte.

1) Les mesures de niveau se font à l'aide du limnimètre décrit au §3.33. Les fluctuations de niveau dans le ressaut hydraulique empêchent une mesure précise et unique; une valeur moyenne est obtenue dans un laps de temps d'une trentaine de secondes pendant lequel la pointe du limnimètre se trouve la moitié du temps immergée et l'autre moitié en dehors de l'eau. Une deuxième méthode consiste à relever les positions extrêmes du niveau en une section verticale et la moyenne des deux donne la valeur à retenir, les fluctuations étant ainsi connues. Le choix entre les deux méthodes est dicté par les conditions de l'écoulement et par le résultat qui est visé.

2) Les niveaux d'eau dans la batterie piézométrique fluctuent lentement autour d'une position moyenne qui est retenue. Lorsque les fluctuations dépassent  $\pm 20$  mm, elles sont relevées précisément, sinon elles sont ignorées car correspondant aux fluctuations de surface.

3) Les vitesses sont mesurées à l'aide du moulinet de précision dans la section médiane du canal, i.e. parallèlement à l'axe longitudinal du canal. En une section verticale, des mesures sont effectuées en une dizaine de points. Le moulinet est positionné en un point et trois mesures sont effectuées, la moyenne des trois intégrations étant retenue (cf. §3.34). L'instrument ne donne que des valeurs positives même si l'écoulement se fait en sens inverse. Pour ces cas, le signe négatif est donné en observant le liquide en mouvement. Pour les profils de vitesses montrés aux chapitres 4 et 5, le moulinet est positionné avec les angles dans les plans vertical et horizontal.

### 3.54 Résultats

Sur le tableau 3.4 sont reportées les grandeurs mesurées

( $Q$ ,  $h_1$ ,  $h_2$  et  $L_r$ ) lors des essais préliminaires du ressaut classique dans la configuration avec déversoir standard et celles qui en découlent ( $F_1$ ,  $h_2/h_1$  et  $L_r/h_2$ ). Dans ce tableau apparaissent les essais no 5 et 6 dont les débits sont en-dehors du domaine défini sous §3.43 ; seules les grandeurs indiquées plus haut sont mesurées avec un soin particulier, alors que les essais no 1 à 4 contiennent une analyse de la distribution des vitesses et de la répartition des pressions sur le fond (cf. Figure 3.25). La Figure 3.20 montre les photographies du ressaut pour chacun des essais effectués.

No	Q	$h_1$	$F_1$	$h_2$	$h_2/h_1$	$L_r$	$L_r/h_2$	$L_r/h_1$
	(l/s)	(mm)	(-)	(mm)	(-)	(m)	(-)	(-)
01	100	53	5.23	360	6.79	1.80	5.00	34
02	60	33	6.36	275	8.33	1.15	4.18	35
03	200	103	3.92	525	5.15	2.80	5.33	27
04	40	23	7.23	220	9.56	0.90	4.09	39
05	30	18	7.82	187	10.39	0.71	3.80	39
06	284	145	3.31	605	4.17	2.90	4.79	20

Tableau 3.4 : Valeurs mesurées lors des essais pour le ressaut classique dans la configuration du canal avec déversoir standard.

La Figure 3.21 présente le rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $Y = h_2/h_1 = Y(F_1)$ . Les points numérotés selon les essais sont situés sur la courbe de Bélanger, ce qui constitue une première appréciation sur le bon fonctionnement de l'installation et confirme la validité de l'utilisation du théorème de la quantité de mouvement pour déterminer les hauteurs conjuguées. Sur cette Figure 3.21, une légère déviation par rapport à la courbe de Bélanger semble se dessiner lorsque le nombre de Froude augmente ; comme montré au §3.6, cet effet est dû au frottement. Mais pour le canal dans la configuration avec déversoir standard, les hauteurs d'eau  $h_1$  sont telles que ce frottement peut être négligé.

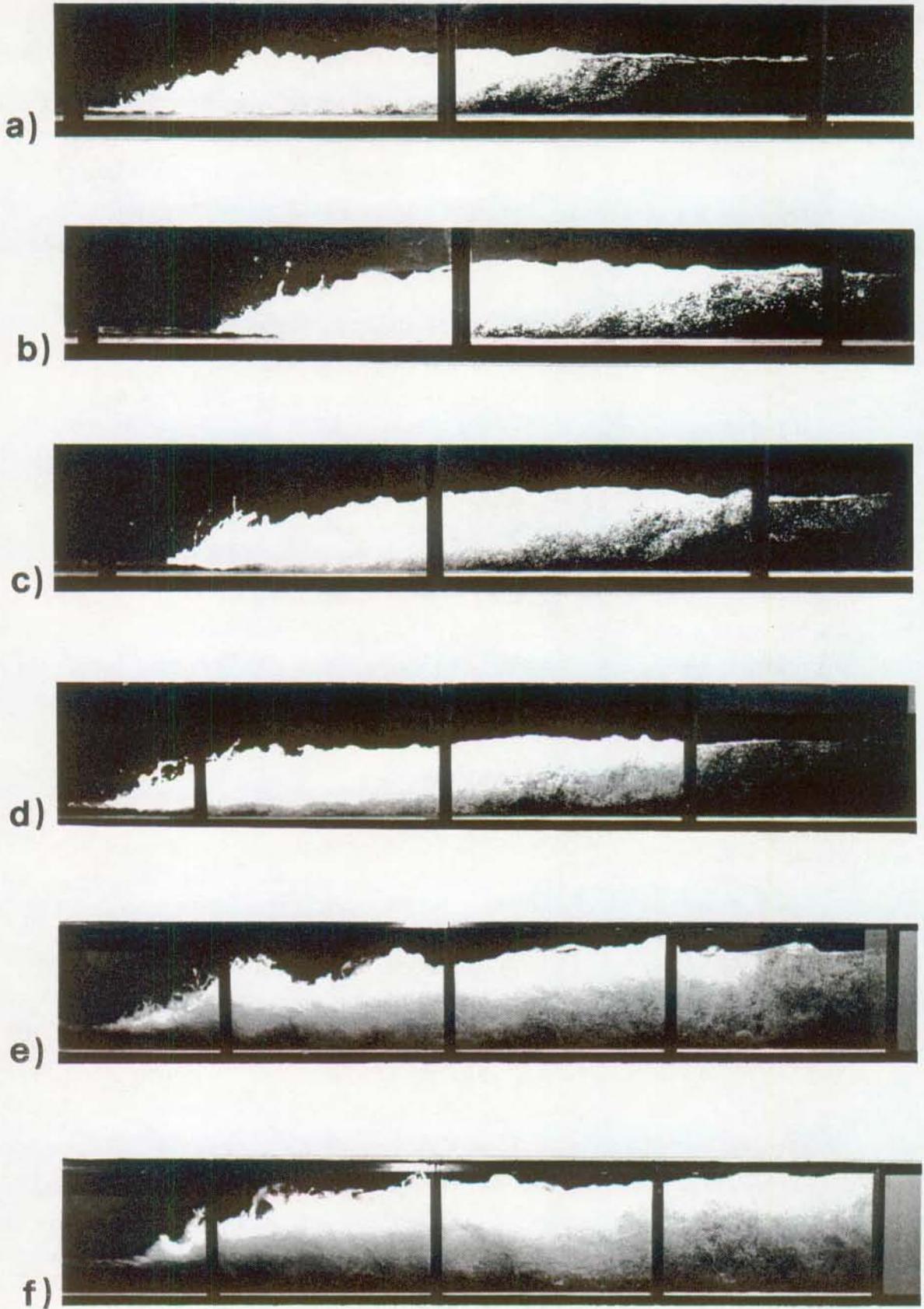


Figure 3.20 : Photographies du ressaut classique pour différents débits : a) 30 l/s, b) 40 l/s, c) 60 l/s, d) 100 l/s, e) 200 l/s et f) 284 l/s. (Pour donner l'échelle, la distance entre 2 barreaux verticaux est de 1.20 m).

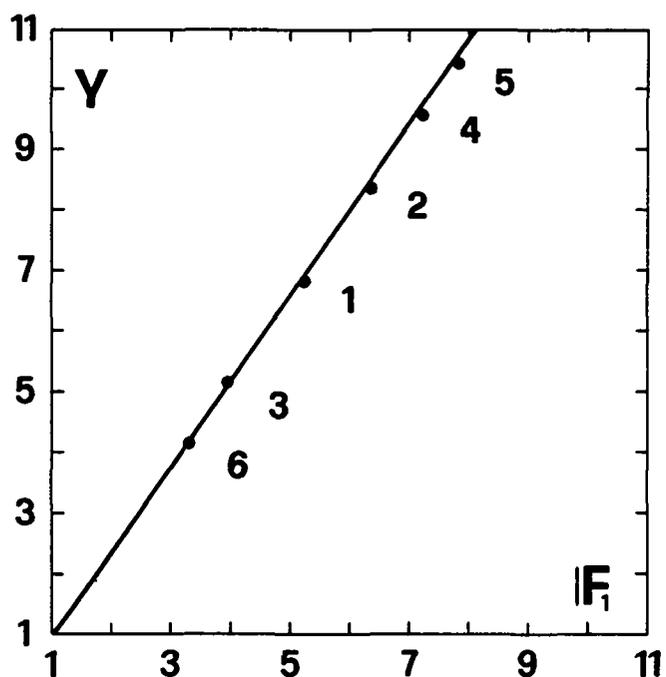


Figure 3.21 : Rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $Y=h_2/h_1=Y(F_1)$ . (—) selon l'équation de Bélanger et (●) observations ; les numéros 1 à 6 se réfèrent aux numéros des essais du tableau 3.4. Canal dans la configuration avec déversoir standard.

Les profils des ressauts relatifs à la hauteur amont sont présentés à la Figure 3.22 pour différents nombres de Froude  $F_1$ .

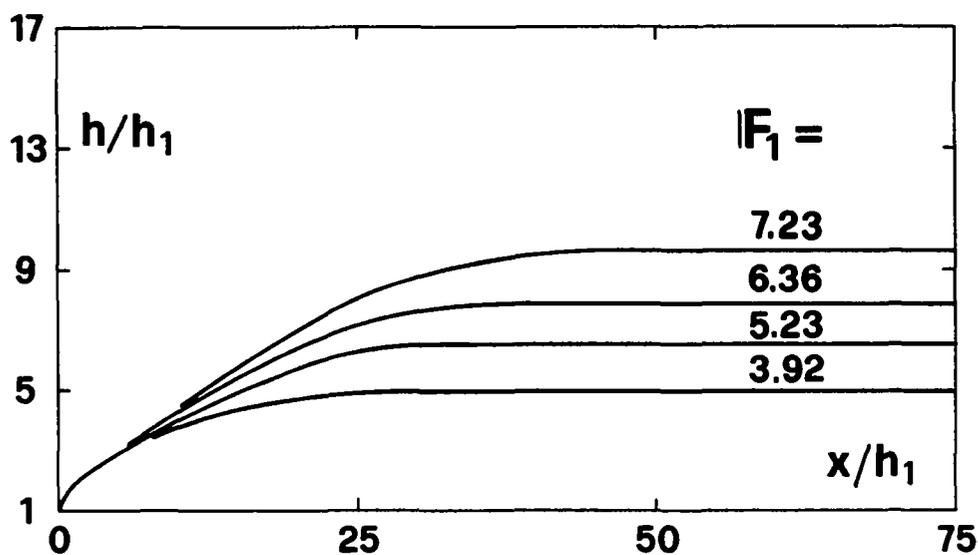


Figure 3.22 : Profils moyens de surface du ressaut classique relatifs à la hauteur amont pour différents  $F_1$ . Canal dans la configuration avec déversoir standard. (Les valeurs expérimentales sont à l'annexe 8.5.1)

Sur la Figure 3.23 sont reportés les profils des ressauts de façon adimensionnelle et unitaire, i.e. les rapports de l'abscisse et de l'ordonnée sont choisis pour être compris entre 0 et 1. Ainsi pour l'abscisse la coordonnée longitudinale  $x$  est rapportée à la longueur du rouleau  $L_r$ , et pour l'ordonnée, la coordonnée verticale  $h$  est d'abord différenciée d'avec la hauteur amont  $h_1$ , puis divisée par la différence des hauteurs conjuguées  $h_2-h_1$ . Le diagramme exprime donc  $(h-h_1)/(h_2-h_1)$  comme fonction de  $x/L_r$ , pour différents nombres de Froude. Pour chaque point de la Figure 3.23 sont également indiquées les variations du niveau à la surface du liquide. Ainsi chaque cas (correspondant à un nombre de Froude  $F_1$  donné) n'est plus représenté par une seule courbe mais par une bande comprise entre les extrema des valeurs mesurées. Et ces bandes se chevauchent les unes sur les autres. Apparemment aucune tendance ne se dessine pour leur ampleur en fonction de  $F_1$ . Plus ce dernier croît, plus la courbe moyenne se déplace vers la droite du diagramme et se rapproche d'une droite à  $45^\circ$ .

Aucune analyse statistique n'est effectuée sur ces fluctuations de niveau; il s'agit surtout de montrer qu'elles existent (cf. §3.51) et qu'elles concernent également les autres grandeurs mesurées (vitesses, pressions, directions de ligne de courant). Toutefois, les valeurs moyennes suffisent à représenter l'allure générale du ressaut hydraulique (classique ou forcé) pour atteindre les buts visés.

Rajaratnam [39] a proposé un type de représentation généralisée des profils utilisant les coordonnées  $m$  et  $n$  : la coordonnée verticale  $n=h/Y$  avec  $Y=0.75(h_2-h_1)$  et la coordonnée longitudinale  $m=x/X$  avec  $X$  la longueur correspondant à la section où  $h=Y$ . Les points expérimentaux se situent sur la courbe tirée des essais de Rajaratnam comme montré sur la Figure 3.24. Pour n'importe quel nombre de Froude  $F_1$ , le profil du ressaut est donné par une courbe unique, mais cette dernière n'a pas le caractère d'universalité de la représentation adimensionnelle et unitaire présentée à la Figure 3.23.

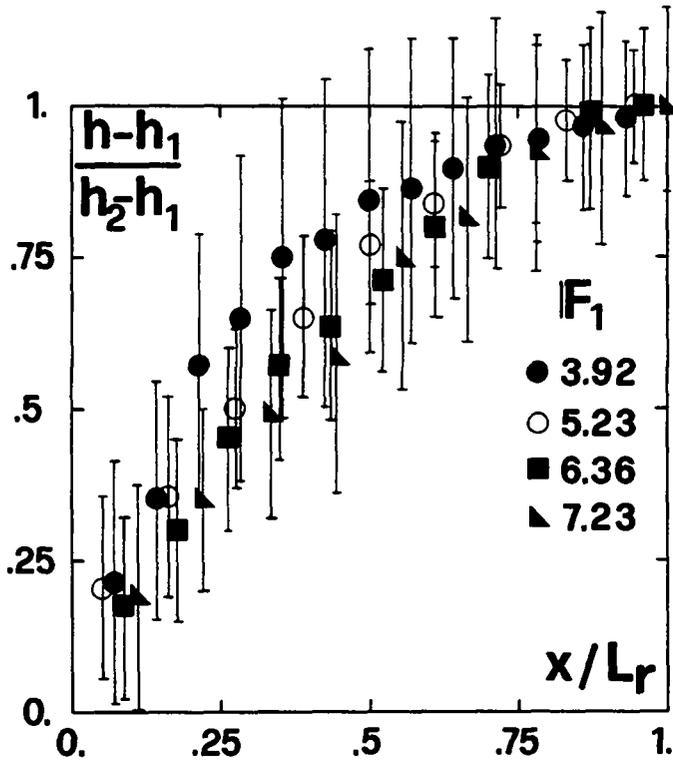


Figure 3.23 : Profils de surface des ressauts relatifs  $(h-h_1)/(h_2-h_1)$  en fonction de  $x/L_r$  pour différents nombres de Froude; les traits verticaux en chaque point représentent les fluctuations de niveau. (Mesures à l'annexe 8.5.1)

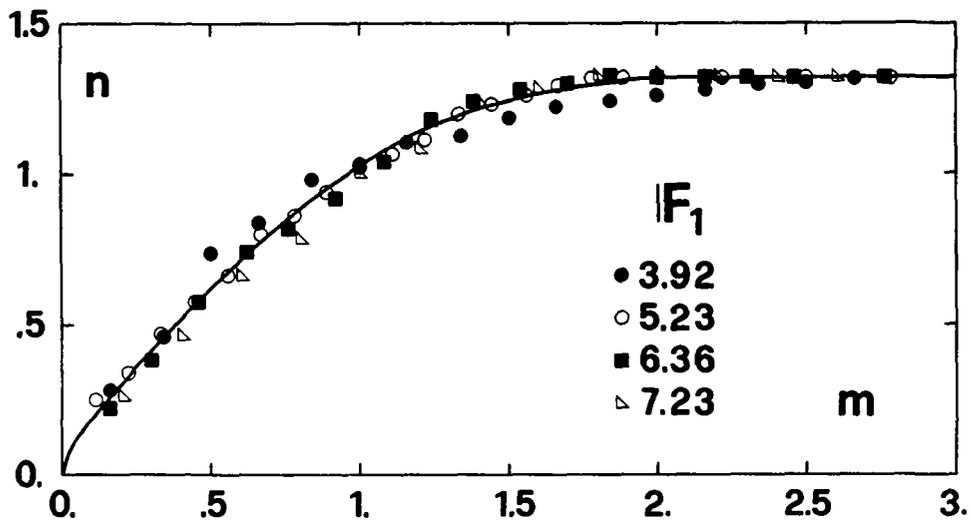
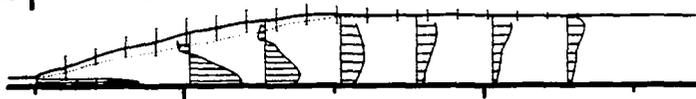


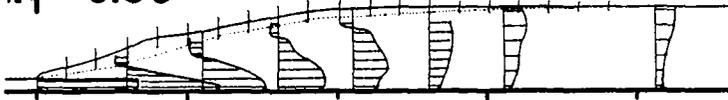
Figure 3.24 : Profils de surface moyens des ressauts selon Rajaratnam [39] avec  $n=h/Y$  où  $Y=0.75(h_2-h_1)$  et  $m=x/X$  où  $X=x(h=Y)$ . (Mesures à l'annexe 8.5.1)

Les profils de vitesses et de pression sur le fond sont donnés à la Figure 3.25 pour les quatre cas étudiés. La ligne de pression est parallèle et proche de la surface de l'écoulement à l'amont et à l'aval du ressaut ; le long de celui-ci, elle est inférieure au niveau d'eau à cause de la présence d'air qui diminue le poids spécifique du mélange et de la turbulence de l'écoulement. Dans une première approximation, la hauteur de pression sur le fond peut être prise comme égale à la hauteur d'eau.

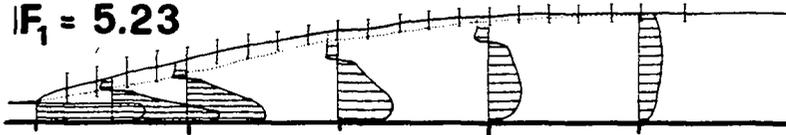
$IF_1 = 7.23$



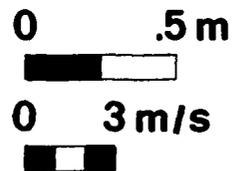
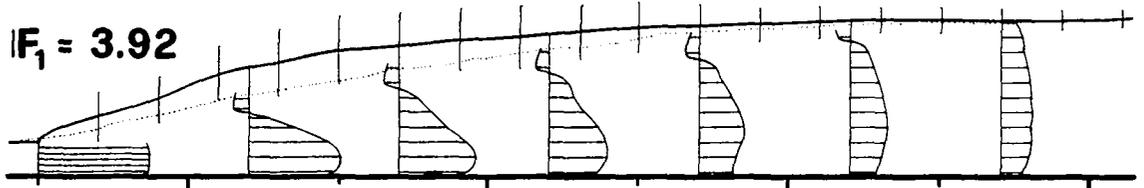
$IF_1 = 6.36$



$IF_1 = 5.23$



$IF_1 = 3.92$



6.5 m

7.5

8.5

9.5

Figure 3.25 : Profils de surface (—), de pression sur le fond (...) et de vitesses, pour les quatre essais préliminaires ; (I) : fluctuations de la surface. La même échelle est conservée pour les quatre cas. (Mesures à l'annexe 8.5.2)

Sur la même figure sont présentées les répartitions des vitesses dans plusieurs sections le long du ressaut, ce qui permet de visualiser leur évolution longitudinale. La zone du rouleau est mise en évidence par les vitesses négatives proches de la surface. Le ressaut agit comme un répartiteur de vitesses : à son entrée, elles sont élevées et proches du fond, puis elles diminuent pour atteindre une quasi-uniformité à sa sortie.

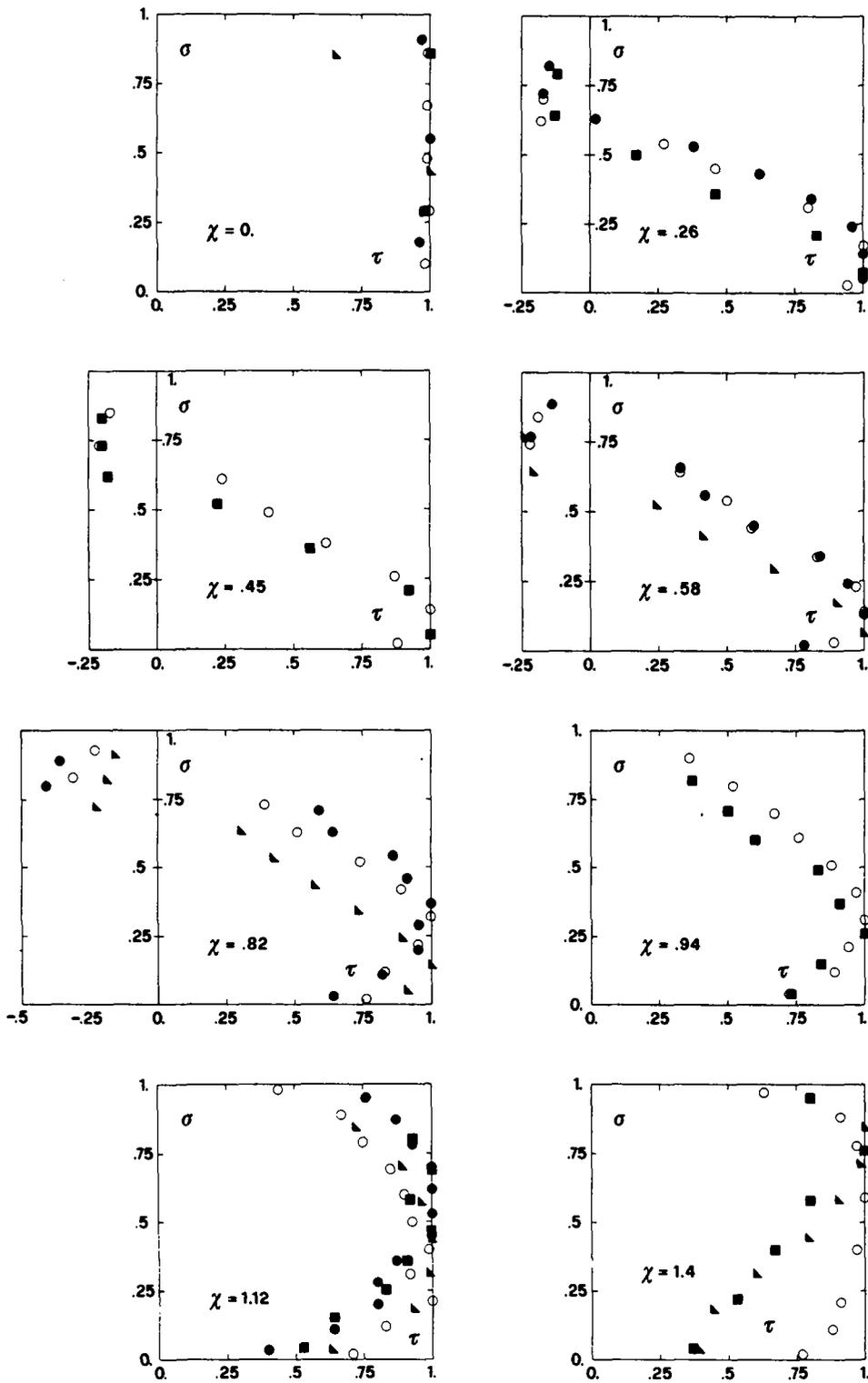


Figure 3.26 : Profils unitaires des vitesses  $\tau = V/V_{\max} = f(\sigma = z/h)$  pour différentes valeurs  $\chi = x/L_r$  ; notations voir Figure 3.23. (Mesures à l'annexe 8.5.2)

Les mesures de vitesses rapportées aux vitesses maximales dans les sections sont reportées à la Figure 3.26, en fonction de l'altitude  $z$  du point de mesure rapportée à la hauteur d'eau  $h$  de la section. C'est une représentation adimensionnelle unitaire. Chacun des diagrammes correspond à une position  $x$  de la section de mesures par rapport à la longueur du rouleau : en bref, pour  $\chi = x/L_R$  donné, la distribution  $v = V/V_{\max}$  est donnée sur  $\sigma = z/h$ . Pour les quatre essais, les valeurs de  $\chi$  ne sont pas toutes identiques, mais seulement proches des valeurs indiquées. L'évolution longitudinale de la répartition des vitesses est pratiquement similaire pour les quatre cas de ressaut classique étudiés.

La Figure 3.25 des profils de vitesses fait ressortir le rouleau de surface du ressaut classique, avec son écoulement à contre-courant. Le but est d'approcher par une courbe l'enveloppe inférieure de cette zone dite de séparation, à l'aide d'une représentation adimensionnelle unitaire du type de celle présentée à la Figure 3.23.

Cette zone est déterminée sur la base des profils de vitesses de la manière suivante : 1) en une section, l'intégrale des vitesses est calculée; 2) cette intégrale fournit la vitesse moyenne dans cette section; 3) en imposant le débit spécifique  $q$  à cette intégrale avec la vitesse moyenne, la hauteur d'eau  $h$  correspondant à l'épaisseur de la lame d'eau de l'écoulement principal est obtenue.

La Figure 3.27 présente pour les quatre cas de ressaut classique ces résultats exprimant la hauteur relative unitaire  $(h-h_1)/(h_2-h_1)$  en fonction de la position relative  $\chi = x/L_R$ , avec  $h_1$  et  $h_2$  les hauteurs conjuguées et  $L_R$  la longueur du rouleau.

Les points expérimentaux sont approchés par la courbe suivante

$$(3.7) \quad (h-h_1)/(h_2-h_1) = \chi^m.$$

où  $h=h(x)$  décrit la zone de l'écoulement principal situé au-

dessous du rouleau de surface. Cette courbe est représentée sur la Figure 3.27 pour  $m=2, 3$  et  $4$ . Pour  $m=2$ , la concordance avec les mesures est bonne pour  $\chi < 0.4$ , mais au-delà, l'écart devient grand. Pour  $m=4$ , la courbe est au-dessous des points expérimentaux jusqu'à  $\chi < 0.6$ ; pour  $0.6 < \chi < 0.8$ , la concordance est bonne. La courbe pour  $m=3$  se situe entre les deux précédentes et est choisie pour représenter la zone de l'écoulement principal.

Avec nos notations et  $m=3$ , l'équ. (3.7) s'écrit alors :

$$(3.8) \quad h(x)/h_1 = 1 + (Y-1)\chi^3.$$

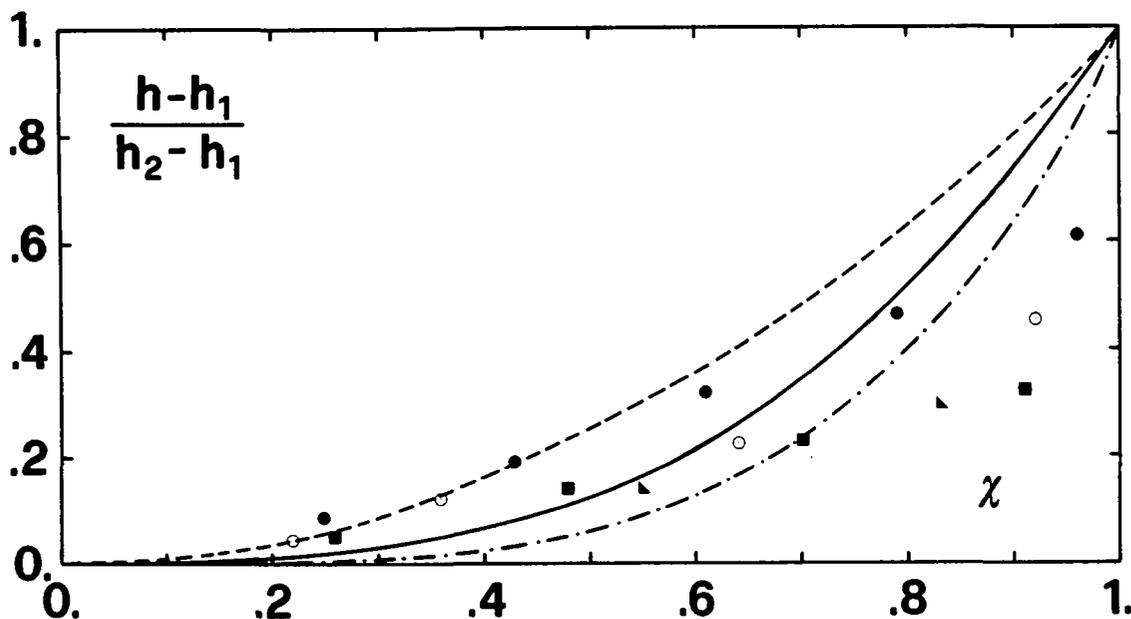


Figure 3.27 : Profil de la zone de séparation. Points expérimentaux : notations cf. Figure 3.23. Courbes selon l'équ. (3.7) : (--)  $m=2$ , (—)  $m=3$  et (-.-)  $m=4$ .

### 3.6 ESSAIS PRELIMINAIRES DU RESSAUT CLASSIQUE DANS LA CONFIGURATION DU CANAL AVEC VANNE PLANE

#### 3.61 Généralités

La configuration avec vanne plane est décrite au §3.27 et la détermination de la hauteur d'eau  $h_1$  dans cette configuration est présentée au §3.44. Avant de procéder aux essais avec

seuil, les hauteurs conjuguées pour le ressaut classique sont mesurées : il s'agit d'un tarage du canal avec la vanne plane mobile, pour ainsi évaluer l'effet de frottement sur les caractéristiques principales de ce phénomène sans seuil; pour le canal dans la configuration avec déversoir standard, cet effet de frottement (cf. §3.5) a pu être négligé à cause des valeurs de  $h_1$  plus élevées.

### 3.62 Description des essais

La procédure est la suivante : 1) une ouverture de la vanne plane est fixée; 2) le débit donnant la charge maximale ( $H < 0.7$  m) possible correspondant à l'ouverture, est installé; 3) le niveau d'eau  $h_2$  à l'aval est réglé de telle manière que le pied du ressaut classique se situe juste à l'aval de la vanne, le plus près possible sans en noyer l'écoulement; 4)  $h_2$  est mesurée ainsi que  $L_R$ ; 5) le débit est diminué de une ou plusieurs unités et, après stabilisation du ressaut comme sous 3), les mesures reprennent; 6) après exploitation de quelques cas, l'ouverture de la vanne est changée et la procédure reprend à 1). Toutes les valeurs du ressaut classique mesurées dans la configuration du canal avec vanne plane sont données à l'annexe 8.5.35.

### 3.63 Résultats

La Figure 3.28 présente les hauteurs conjuguées du ressaut classique. Les points expérimentaux ne se situent pas sur la courbe de Bélanger (équ. 2.3), mais semblent s'aligner sur une droite dont le décalage par rapport à la courbe de Bélanger augmente avec  $F_1$ . Ce décalage traduit l'effet de frottement à l'intérieur du ressaut classique, négligé dans l'équ. (2.3).

Les points expérimentaux du ressaut classique présentés à la Figure 3.28 peuvent être approchés par la courbe de régression linéaire suivante :

$$(3.9) \quad Y = 1.307 \cdot F_1 - 0.142.$$

Sur les figures du ressaut forcé par seuil au chapitre 6, la courbe d'équation (3.9) sera indiquée et servira de référence pour le cas  $S=s/h_1=0$ , car ces essais ont été réalisés dans les mêmes conditions d'écoulement que ceux du ressaut classique discutés ici.

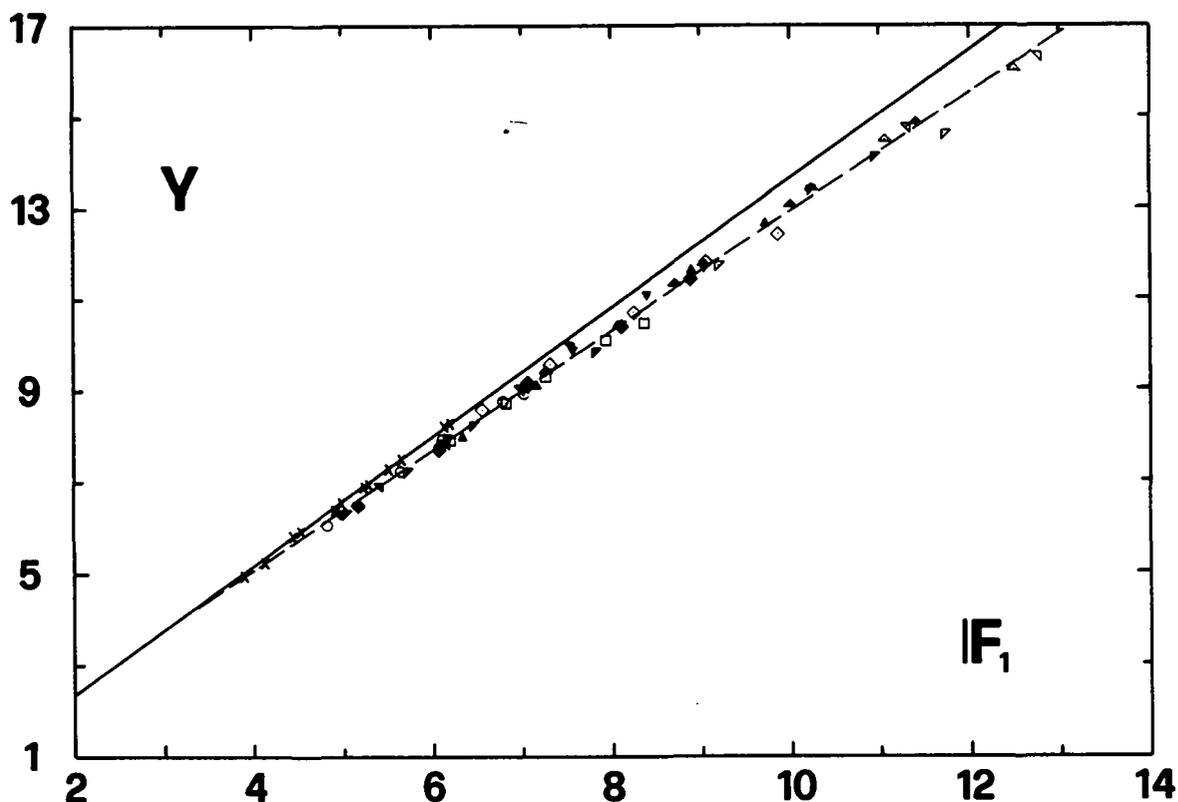


Figure 3.28 : Ressaut classique, rapport des hauteurs conjuguées; (--) courbe selon l'équ. (3.9), (—) équ. de Bélanger. Notations série 1 : ouverture de la vanne en mm ( $\nabla$ )  $a=10$ , ( $\triangle$ ) 12, ( $\nabla$ ) 15, ( $\blacktriangle$ ) 17, ( $\blacktriangle$ ) 20, ( $\diamond$ ) 22, ( $\blacktriangledown$ ) 25, ( $\blacklozenge$ ) 27, ( $\square$ ) 30, ( $\blacktriangledown$ ) 35, ( $\blacktriangleright$ ) 36, ( $\circ$ ) 40; (mesures à l'annexe 8.5.35). Série 2 : (x) points de contrôle (mesures à l'annexe 8.5.41).

L'effet de frottement sur les hauteurs conjuguées du ressaut classique est approché analytiquement (cf. annexe 8.3) sur la base des hypothèses suivantes : 1) la pente de frottement  $J_f$  est donnée par l'équation de Blasius (équ. 3.5) ajustée pour le régime pseudo-lisse, 2) le coefficient de forme  $f_0$  est tiré de Bock [05] (cf. équ. 3.4), 3) le profil de l'épaisseur de la lame d'eau de l'écoulement est défini par l'équation (3.8). Elle exprime le rapport des hauteurs conjuguées en tenant compte du paramètre hydraulique  $\Lambda=(v/q)^{1/4} \cdot \lambda_R \cdot \omega^{-1/16}$  et du pa-

paramètre géométrique  $\omega = h_1/B$  de la section au pied du ressaut.  $q$  est le débit spécifique,  $\nu$  la viscosité cinématique,  $\lambda_R$  la longueur relative du rouleau,  $h_1$  la hauteur d'eau amont et  $B$  la largeur du canal. Le résultat est donné sous la forme  $Y = f(F_1, \Lambda, \omega)$ , au lieu de  $Y = f(F_1)$  comme selon l'équ. (2.1).

Des courbes caractéristiques sont présentées dans l'annexe; elles s'éloignent de celle de Bélanger pour  $\Lambda$  grandissant et ce décalage est d'autant plus grand que  $\omega$  est élevé. Pour nos essais, ces deux paramètres ont varié dans les domaines suivants :  $2 < \Lambda < 9$  et  $0.013 < \omega < 0.051$ . Une expression généralisée  $Y = f(F_1, \Lambda, \omega)$  a pu être trouvée et s'énonce comme suit :

$$(3.10) \quad Y = \sqrt{2} \cdot F_1 (1 - (E/1.7)) - 0.5$$

avec  $E = 0.02712 \cdot \Lambda \cdot I \cdot \zeta$  et  $I = (0.6035 + 2.025\omega)(Y/3)^{0.235\omega - 0.382}$  où  $I$  est l'intégrale du terme de frottement du ressaut, comme expliqué en détail à l'annexe 8.3.

D'autre part, dans cette annexe au §8.35, une valeur limite  $\Lambda_g$  du paramètre hydraulique a été déterminée, correspondant à un décalage  $\Delta Y = 0.1$  des hauteurs conjuguées par rapport à la courbe de Bélanger pour lequel l'effet de frottement peut être négligé. Cette valeur limite peut être approchée par :

$$(3.11) \quad \Lambda_g = 1.382 / (1 + 3.8\omega).$$

Ainsi pour  $\Lambda_g < \Lambda$ , l'effet de frottement peut être considéré comme négligeable.

Une vérification des résultats concernant l'effet de frottement a été effectuée par la seconde série d'essais dans le canal avec sa configuration initiale comme décrit au §3.2. De grandes hauteurs d'eau amont  $h_1 > 35$  mm ont été utilisées pour ce contrôle et ont été déterminées à partir des vitesses mesurées au pied du ressaut (voir §3.4). Les points correspondants indiqués sur la Fig. 3.28 sont pratiquement alignés sur la courbe de Bélanger. Ceci confirme l'hypothèse de frottement négligeable pour ces hauteurs d'eau pour des vitesses  $3.0 < V_1 < 4.0$  m/s, comparables à la série 1.

### Longueur du ressaut classique

Lors des essais du ressaut classique, les longueurs du rouleau de surface  $L_R$  (voir définition à la Fig. 2.2) ont été relevées et sont présentées à la Figure 3.29, avec  $\lambda_R = L_R/h_1$ . Cette hauteur  $h_1$  est préférée à  $h_2$  pour les longueurs relatives parce que  $h_1$  détermine  $F_1$  et permet de comparer plusieurs cas pour un même nombre de Froude, i.e. avec des conditions d'entrée semblables, tandis que pour  $h_2$  donné, ces conditions peuvent varier en une infinité de possibilités et la comparaison entre deux cas perd alors de son sens. D'autre part, en rendant les longueurs relatives à  $h_2$ , celles-ci deviennent presque indépendantes de  $F_1$ , alors que par rapport à  $h_1$ , elles prennent des valeurs élevées avec  $F_1$  croissant.

Les points expérimentaux de la série 1 s'alignent sur une droite dont l'équation de régression linéaire est :

$$(3.12) \quad \lambda_R = 6.291 \cdot F_1 - 3.591.$$

Cette courbe est pratiquement parallèle, avec un léger décalage vers le bas, à celle définie par [54] :

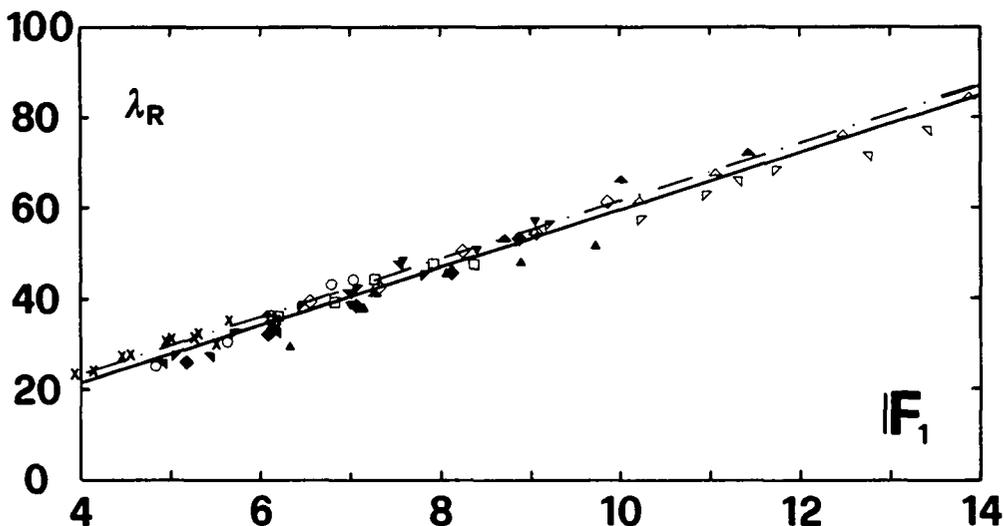


Figure 3.29 : Ressaut classique - longueur relative du rouleau. Points expérimentaux série 1, notations voir Figure 3.28. (—) courbe expérimentale selon l'équ. (3.12), (---) courbe selon l'équ. (3.13) d'après [54]. (x) points de contrôle de la série 2.

$$(3.13) \quad \lambda_R = 4.5 \cdot \gamma,$$

où  $\gamma = f(F_1)$  est l'équation de Bélanger selon l'équ. (2.3).

Les écarts peuvent provenir des fluctuations des positions du pied du ressaut et de la fin du rouleau de surface; ensemble, celles-ci sont approximativement de l'ordre de  $\pm 10\%$  par rapport à la longueur du rouleau. L'écart relatif moyen pour  $20 < \lambda_R < 80$  vaut alors  $\Delta\lambda = \pm 5$ .

Les points de vérification (comme expliqué plus haut) reportés sur la Figure 3.29 sont situés légèrement au-dessus de la courbe d'équ. (3.12). Ce décalage pourrait être dû à l'effet du frottement; mais il est confondu dans l'écart moyen  $\Delta\lambda = \pm 5$  déterminé plus haut. L'effet d'échelle est donc moins important que l'incertitude  $\Delta\lambda$ . Par conséquent, l'effet de frottement semble être faible sur  $\lambda_R$  du ressaut classique. C'est pourquoi on peut l'admettre aussi pour le ressaut forcé.

### 3.7 CONCLUSION

Ce chapitre a présenté les installations expérimentales utilisées pour cette recherche. Les principales caractéristiques du canal d'essais sont les suivantes : largeur 0.5 m, profondeur 0.7 m, longueur 10.8 m, capacité maximale possible 0.375 m<sup>3</sup>/s, fond et une paroi en PVC noir, l'autre paroi vitrée.

Deux configurations du canal sont exploitées : la première avec un déversoir standard à l'entrée pour la mise en vitesse de l'écoulement, la seconde avec une vanne plane mobile, permettant de fixer aisément la hauteur d'eau amont  $h_1$ . L'importance de la mesure la plus exacte de  $h_1$  sur les résultats antérieurs est soulignée.

Les instruments de mesures (limnimètre, moulinets, sonde de pression, sondes de directions horizontale et verticale) sont des prototypes conçus spécialement pour les besoins de ces travaux.

Des essais préliminaires pour le canal dans la configuration avec déversoir standard ont permis d'établir une courbe hauteurs-débits. Le domaine du nombre de Froude s'étend de 3.5 à 8. Ces résultats sont utilisés par la suite aux chapitres 4 et 5. La détermination de la hauteur d'eau  $h_1$  dans l'autre configuration se fait par l'équation (2.5).

Le ressaut classique a été étudié avec les deux configurations du canal. Dans celle avec déversoir standard, le ressaut classique est d'abord décrit qualitativement et la complexité du phénomène avec ses importantes fluctuations spatio-temporelles est soulignée; les profils de surface et de vitesses sont présentés pour quatre cas. Une nouveauté est introduite avec les profils adimensionnels unitaires comprenant les variations de niveau. La répartition des vitesses le long du ressaut met en évidence son rôle tranquillisateur. Dans la configuration avec vanne plane, les hauteurs conjuguées et les longueurs de rouleau du ressaut classique sont analysées en détail; pour les premières, les essais ont révélé l'effet de frottement inhérent au phénomène.

Les résultats obtenus par les essais préliminaires ont montré leur conformité à ceux publiés dans la littérature et ceci confirme le bon fonctionnement des installations.

Le ressaut hydraulique est un écoulement fortement tridimensionnel à forte recirculation d'un fluide biphase. L'analyse du phénomène dans la section médiane a montré que des fluctuations sont présentes pour toutes les grandeurs mesurées dans le ressaut hydraulique, mais les valeurs moyennes suffisent pour décrire l'allure générale du phénomène et en permettre la compréhension.

Le chapitre suivant traitera du ressaut forcé par seuil avec des essais préliminaires.



RESSAUT HYDRAULIQUE  
FORCE PAR SEUIL

CHAPITRE 4

RESSAUT FORCE PAR SEUIL  
ESSAIS PRELIMINAIRES



## C H A P I T R E 4

-----

### RESSAUT FORCE PAR SEUIL - ESSAIS PRELIMINAIRES

#### 4.1 INTRODUCTION

Le ressaut forcé par seuil a été sommairement présenté au début du chapitre 2. Sa description est reprise en détail par la présentation des cas d'écoulement possibles par dessus un seuil, dans la configuration du canal avec déversoir standard. Tous ces cas sont décrits et illustrés à l'aide de figures et de photographies. Une classification est proposée, sur le modèle de celle de Rand [41].

L'influence de la largeur du seuil sur les hauteurs conjuguées est analysée pour 4 rapports largeur/hauteur de seuil, variant entre 1/4 et 2; si cette influence est négligeable sous certaines conditions, le paramètre "largeur de seuil" peut être éliminé par la suite.

Il existe une différence sur les hauteurs conjuguées entre le ressaut classique et le ressaut forcé du type A : une correction est apportée en considérant l'étranglement provoqué par le seuil dans l'écoulement, par analogie avec un diaphragme dans un canal. Ainsi l'effet du seuil proprement dit peut être évalué.

Le cas représentatif de ressaut forcé par seuil avec le nombre de Froude  $F_1 = 5.23$  et le seuil carré  $s \times b = 75 \times 75$  mm, est présenté; la répartition des vitesses axiales moyennes de même que les pressions sur le fond sont mesurées pour cinq hauteurs de submersion différentes à l'aval.

A la fin du chapitre, une nouvelle approche pour une classification est adoptée; elle ne se base pas uniquement sur les profils de surface, mais aussi sur la distribution des vitesses de l'écoulement à l'aval du seuil. Trois types de ressaut

forcé par seuil sont ainsi retenus; ils correspondent au critère de sélection pour un écoulement avec de faibles vitesses près du fond à l'aval du seuil.

#### 4.2 DESCRIPTION DES TYPES DE RESSAUT FORCE ET CLASSIFICATION

Six paramètres principaux interviennent dans l'écoulement par dessus un seuil dans le canal considéré :

- 1) la hauteur d'eau amont  $h_1$ ,
- 2) le nombre de Froude  $F_1$ ,
- 3) la hauteur du seuil  $s$ ,
- 4) le niveau aval  $h_2$ ,
- 5) la longueur du ressaut forcé,
- 6) la largeur du seuil  $b$ .

Chaque écoulement correspond à une combinaison de ces six paramètres, différents cas typiques pouvant ainsi se présenter. L'influence de la largeur du seuil sur l'écoulement est traitée au §4.3;  $F_1$  dépend directement de  $h_1$ , il s'agit donc en fait d'un seul paramètre; la longueur du ressaut forcé est aussi un paramètre dépendant des conditions amont et aval. Seuls trois paramètres sont ainsi traités pour établir une classification :  $F_1$ ,  $s$  et  $h_2$ . Un premier pas est l'analyse singulière de chacun des trois paramètres : un de ceux-ci est utilisé comme variable et les deux autres sont fixés. Le deuxième pas est l'analyse globale, i.e. la variation simultanée de ces trois paramètres. Une classification regroupant tous les cas est proposée, en analogie avec [41].

##### 4.21 Cas de base

- 1) Cas no 1 :  $F_1$  variable,  $s$  fixe et  $h_2$  libre.

Pour ce premier cas, seul le nombre de Froude est variable, la hauteur du seuil est fixe et le niveau d'eau  $h_2$  à l'aval est libre, i.e. l'écoulement par dessus le seuil est dénoyé, sans submersion par l'aval. Pour le canal donné avec des débits croissants (donc pour  $F_1$  décroissant), l'écoulement passe par

les formes suivantes : tout d'abord la hauteur du seuil  $s$  est telle par rapport à la hauteur d'eau  $h_1$  qu'un ressaut complet se forme à l'amont du seuil; puis,  $S$  diminuant suite à l'augmentation du débit, le ressaut se déplace en aval et il se trouve de part et d'autre du seuil (ressaut intermédiaire); ensuite, lorsque le débit augmente encore, un écoulement de transition entre le ressaut et le jet apparaît; un jet pouvant être complètement aéré prend alors forme, avec une hauteur maximale; puis celui-ci diminue de hauteur et s'allonge de plus en plus, l'aération se réduisant jusqu'à disparaître; enfin l'écoulement reste "collé" sur le fond du canal, torrentiel de part et d'autre du seuil, sans discontinuité; il n'y a pas plus de ressaut hydraulique, mais ce type d'écoulement est contenu également dans la classification.

2) Cas no 2 :  $h_2$  variable,  $s$  et  $F_1$  fixes.

La hauteur d'eau  $h_2$  à l'aval du seuil est la variable, la hauteur du seuil et le nombre de Froude sont fixes, i.e. pour une géométrie et un débit donnés, le niveau aval  $h_2$  règle l'écoulement. Pour une hauteur  $h_2$  croissante, les formes suivantes d'écoulement apparaissent : d'abord un jet aéré ou non-aéré est présent par-dessus le seuil dépendant de  $S$  et  $F_1$  (pour la condition limite, cf. [26]); puis le début d'un ressaut se forme au-delà du seuil, au pied aval du jet, n'influençant pas l'écoulement à l'amont du seuil (pour les conditions de formation, cf. [17]); par la suite une onde de hauteur maximale apparaît, limite avant la formation d'un ressaut forcé proprement dit à l'amont du seuil; d'abord de longueur réduite, le ressaut se transforme ensuite en ressaut du type intermédiaire; enfin le ressaut complet se forme, le rouleau se terminant au droit du seuil; si  $h_2$  augmente encore, le ressaut se déplace vers l'amont et devient un ressaut classique, le seuil n'ayant plus aucune influence sur lui.

3) Cas no 3 :  $s$  variable,  $F_1$  et  $h_2$  fixes.

La hauteur du seuil  $s$  (trois grandeurs à disposition, cf. §3.26) peut varier, alors que le nombre de Froude  $F_1$  et la

hauteur d'eau aval  $h_2$  sont fixes. Pour une hauteur de seuil  $s$  croissante, l'écoulement peut prendre les formes suivantes : tout d'abord, aucune perturbation n'est créée, puis un jet prend naissance, successivement allongé et bas, peu accentué, puis se raccourcissant et de plus en plus marqué et bombé; ensuite le jet se brise et un ressaut de longueur réduite prend place à l'amont du seuil; après cela, le ressaut intermédiaire apparaît, puis le ressaut complet dont le rouleau de surface se termine au seuil; enfin, le seuil fonctionne comme un déversoir, le ressaut se déplace en amont et devient un ressaut classique.

#### 4.22 Combinaisons

Le deuxième pas consiste à faire varier simultanément les trois paramètres. Tous les cas de figures présentés dans les trois cas simples se retrouvent, car ils représentent en fait chacun une combinaison des trois paramètres. Deux nouveaux cas font cependant leur apparition par rapport à la description de [41], comme décrit à la fin du §4.23, où une classification des différents cas de ressauts forcés par seuil est présentée.

#### 4.23 Classification

En utilisant une classification analogue à celle de Rand [41], les cas rencontrés sont décrits ci-dessous et illustrés aux Figures 4.1 et 4.2. Trois classes sont différenciées en fonction de la position  $L_s$  du seuil par rapport au pied du ressaut (cf. Figure 2.20) : 1) position minimale  $L_{s,min}$  en amont, correspondant à la plus petite longueur obtainable avec un seuil de hauteur critique  $s_c$  nécessaire à la formation du ressaut (voir [17]), lorsque l'écoulement est dénoyé à l'aval; 2) position intermédiaire (ou normale)  $L_s$ , le seuil ayant une hauteur  $s > s_c$  et le rouleau de surface étant complètement formé devant l'obstacle et 3) position maximale  $L_{s,max}$ , la hauteur d'eau à l'extrémité du rouleau étant similaire à celle du ressaut classique (sans seuil), provoquée par le seuil de hauteur  $s_{max}$ . Les divers cas d'écoulement sont les suivants.

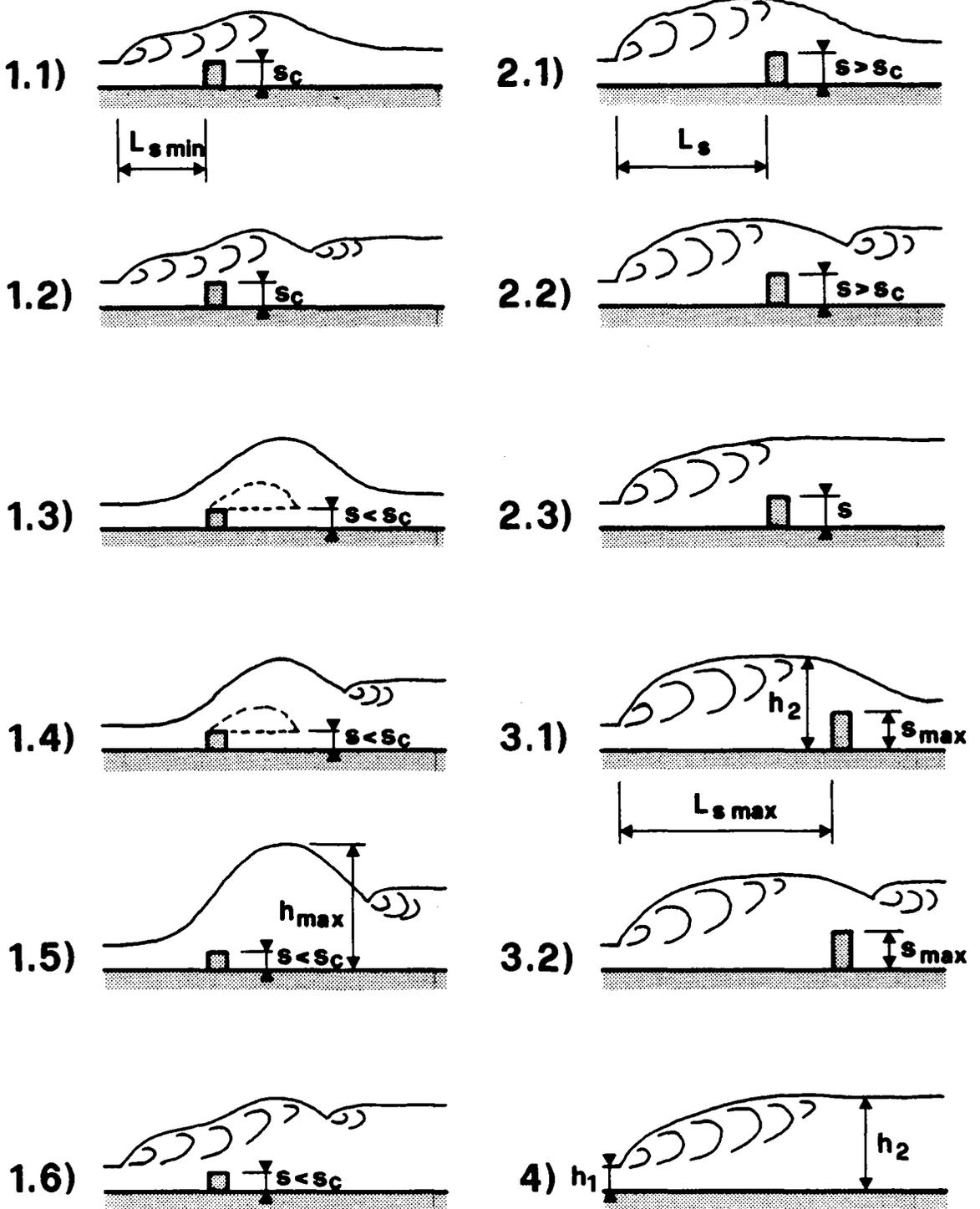


Figure 4.1 : Cas typiques d'écoulement divisés en trois classes : 1) classe 1, longueur  $L_{s,\min}$ ; 2) classe 2, longueur intermédiaire  $L_s$ , 3) classe 3, longueur  $L_{s,\max}$ , et 4) ressaut classique avec hauteurs conjuguées  $h_1$  et  $h_2$ .  $s$  : hauteur du seuil,  $s_c$  : hauteur critique du seuil et  $s_{\max}$  hauteur maximale du seuil. La description détaillée est donnée dans le texte.

1) Classe 1 : longueur  $L_{s,min}$

1.1) Ressaut intermédiaire avec niveau aval libre; la hauteur critique du seuil  $s_c$  est telle par rapport à  $h_1$  qu'elle provoque un ressaut s'étendant de part et d'autre du seuil;

1.2) identique à 1.1), mais en présence d'un deuxième rouleau à l'aval du seuil, obtenu par exhaussement du plan d'eau aval, ce dernier restant toutefois sans influence sur le premier;

1.3) La hauteur du seuil est inférieure aux cas précédents ( $s < s_c$ ), le ressaut se retire et fait place à un jet qui peut être complètement aéré, le niveau aval étant libre; l'allure plus ou moins bombée du jet dépend du nombre de Froude  $F_1$ ;

1.4) identique à 1.3), mais un deuxième rouleau à l'aval est présent n'influençant pas le jet; ce rouleau résulte d'une élévation du plan d'eau aval sans submersion du jet;

1.5) Le niveau d'eau du cas 1.4) est augmenté légèrement et le jet se transforme en une onde non aérée atteignant une hauteur maximale (pour l'analogie avec les marches, voir [18]); l'effet de la submersion de l'aval commence à se faire sentir; une élévation ultérieure du plan d'eau aval cause la formation d'un ressaut à l'amont du seuil (avec  $s < s_c$ ) : c'est le cas limite d'apparition du ressaut forcé à l'amont;

1.6) une nouvelle augmentation du plan d'eau du cas 1.5) engendre un ressaut s'étendant de part et d'autre du seuil (avec  $s < s_c$ ); ce cas ressemble au cas 1.2) mais pour celui-ci le ressaut est forcé par le seuil de hauteur  $s_c$ , tandis que pour celui-là c'est le niveau d'eau aval  $h_2$  qui en est la cause.

2) Classe 2 : longueur  $L_{s,min} < L_s < L_{s,max}$

2.1) Le seuil a une hauteur supérieure à celle du cas 1.1) ( $s > s_c$ ), le ressaut se forme entièrement à l'amont du seuil qui fonctionne en partie comme un déversoir; il n'y a pas de submersion de l'aval;

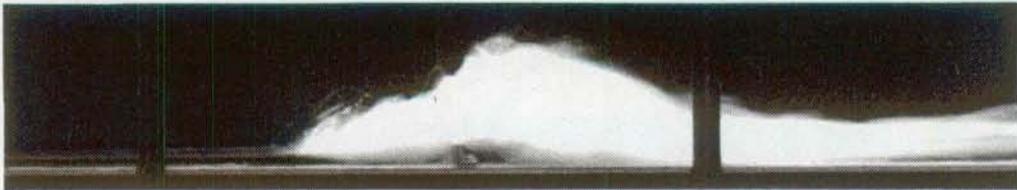
2.2) identique à 2.1) mais avec un deuxième rouleau à l'aval du seuil suite à l'élévation du plan d'eau (qui reste cependant sans effet sur le ressaut à l'amont du seuil);

2.3) c'est le ressaut forcé complètement formé, le rouleau se termine au droit du seuil; si le plan d'eau aval est augmenté, le ressaut se retire vers l'amont et devient un ressaut classique, le seuil n'exerçant plus d'influence sur lui.

3) Classe 3 : longueur  $L_{S,max}$

3.1) Le seuil a une hauteur telle que le ressaut se forme entièrement à l'amont et la hauteur d'eau devant le seuil correspond à celle du ressaut classique; le seuil fonctionne alors comme un déversoir dénoyé, sans submersion de l'aval;

1.1)



1.2)



Figure 4.2 : Photographies des cas 1.1) et 1.2) décrits à la Figure 4.1. Pour chaque cas, 2 photos sont présentées avec des temps d'exposition de 1/125 et 1/4 secondes, respectivement.

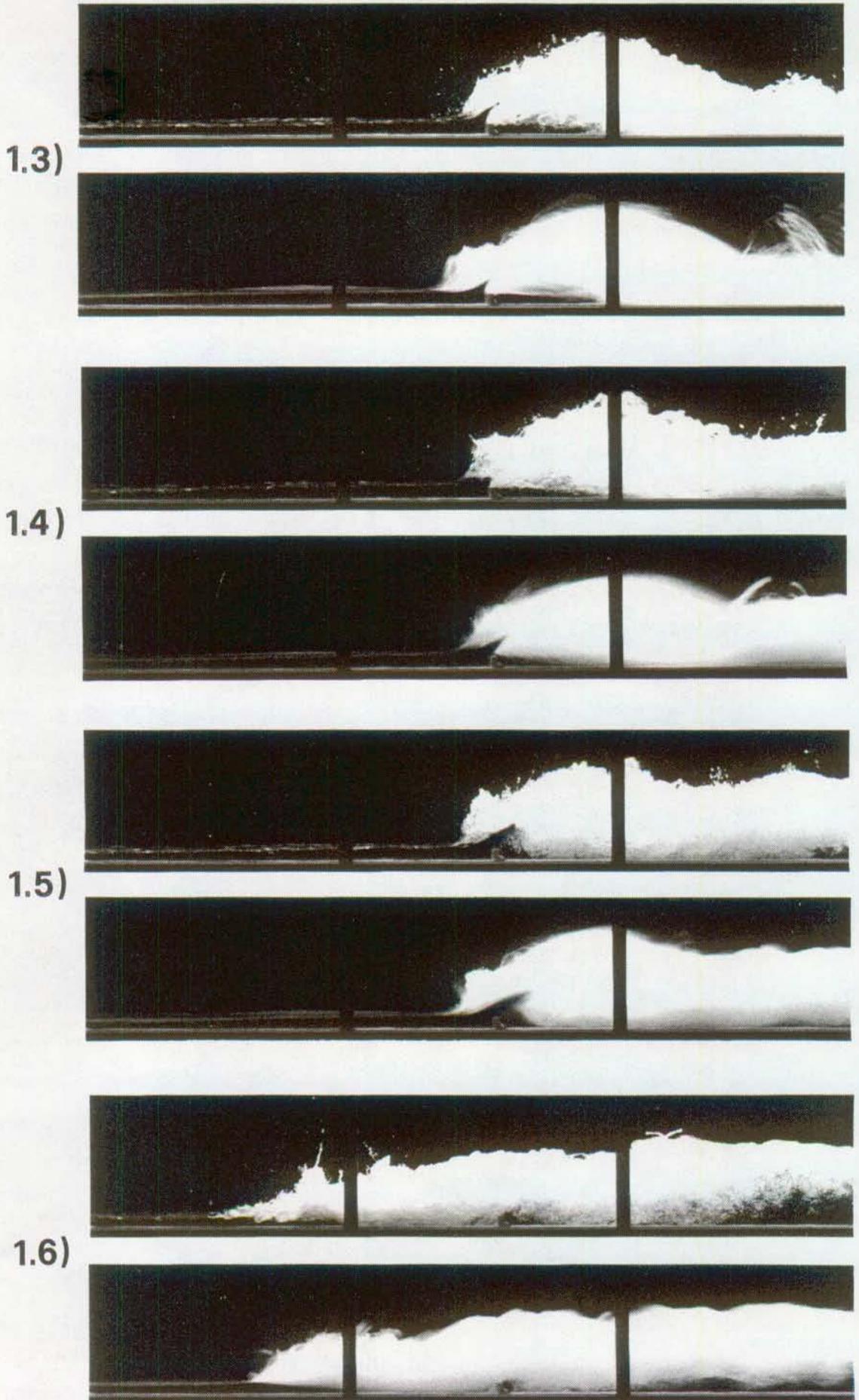
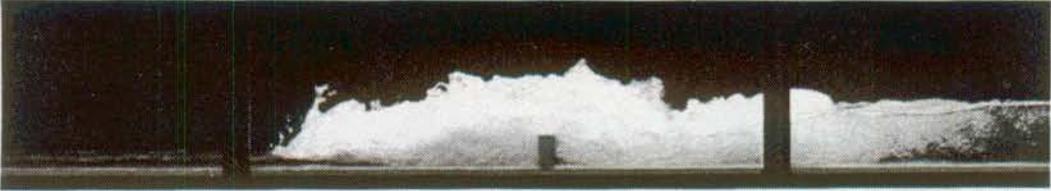


Figure 4.2 (suite) : Photographies des cas 1.3) à 1.6) décrits à la Figure 4.1.

2.1)



2.2)



2.3)

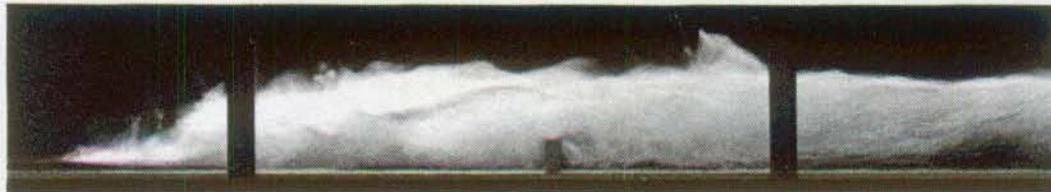


Figure 4.2 (suite) : Photographies des cas 2.1) à 2.3) décrits à la Figure 4.1.

3.2) identique à 3.1) mais en présence d'un deuxième rouleau à l'aval qui est sans effet sur l'écoulement à l'amont.

Par rapport à la classification de [41], deux nouveaux cas ont été inclus suite à nos observations : les cas 1.4) et 1.5) de la Figure 4.1. Il ne s'agit pas de ressaut à proprement

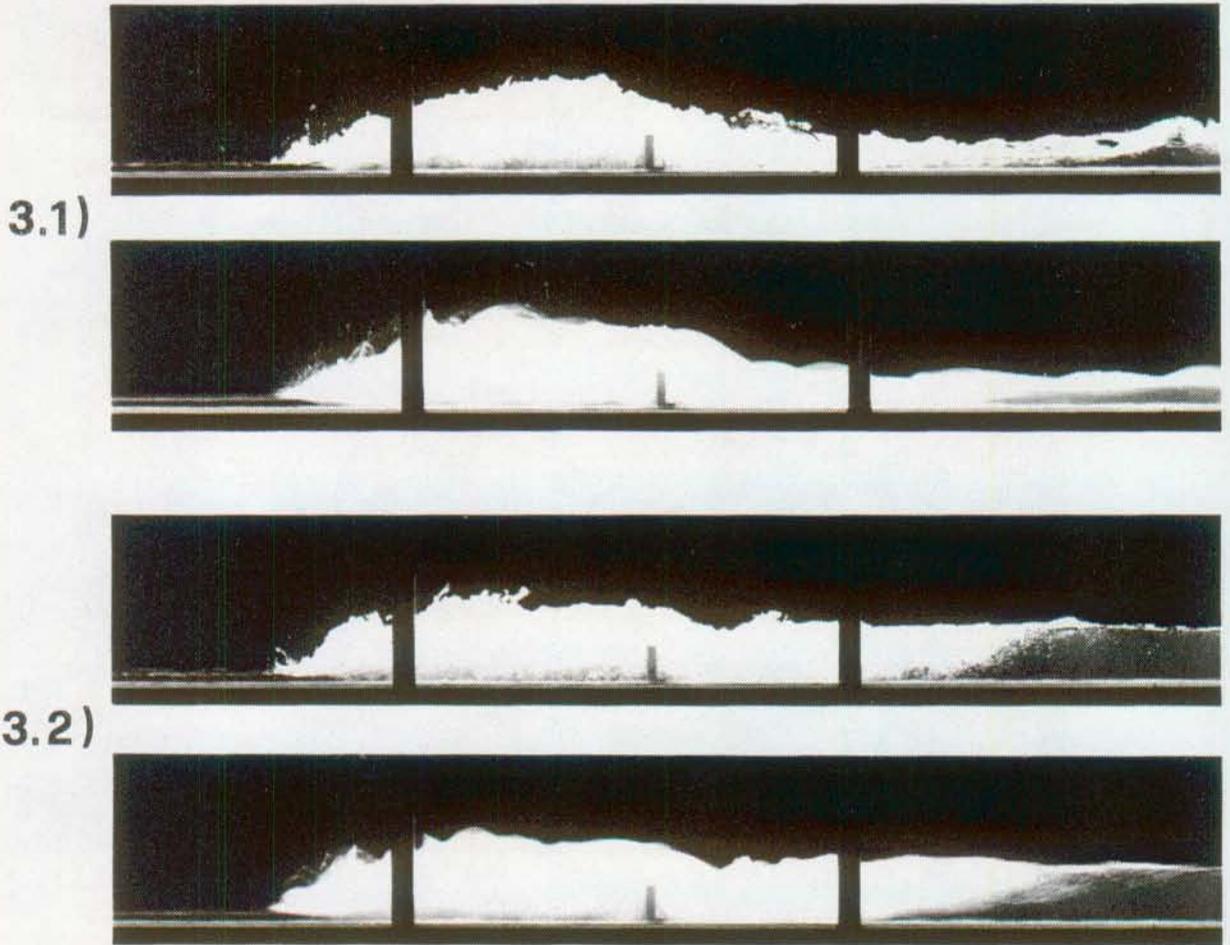


Figure 4.2 (suite et fin) : Photographies des cas 3.1) et 3.2) décrits à la Figure 4.1.

parler, mais ces écoulements sont provoqués par le seuil et s'intègrent dans la progression entre les cas 1.3) et 1.6). L'onde est très sensible aux variations du niveau d'eau aval et l'onde maximale correspond à un rapport  $\gamma$  des hauteurs conjuguées précis pour  $s$  et  $F_1$  donnés. Les deux cas sont semblables à ceux décrits par [18] pour les marches positives.

Cette classification complétée regroupe en trois classes, suivant les longueurs  $L_s$ , tous les cas d'écoulement possibles sur un seuil. La Figure 4.2 illustre à l'aide de photographies tous ces cas de la classification présentée à la Figure 4.1. D'autres photographies exécutées lors de ces essais sont données à l'annexe 8.4.

La classification est exhaustive et comprend des cas où le ressaut n'est pas présent. Pour obtenir une dissipation d'énergie sans provoquer une trop grande érosion, l'écoulement à l'aval du seuil doit avoir des vitesses faibles près du fond, mais la hauteur d'eau aval requise doit rester inférieure à celle du ressaut classique. Ces conditions éliminent donc bon nombre de cas décrits dans la classification; c'est pourquoi une nouvelle approche est proposée ci-après au §4.6, tenant compte en plus du profil de surface aussi de la distribution des vitesses de l'écoulement à l'aval du seuil.

Le ressaut forcé par seuil analogue au ressaut classique, i.e. avec un plan d'eau aval quasi horizontal et avec le rouleau de surface terminé au seuil, correspond au cas 2.3) de la classification; il est retenu comme cas limite d'un côté et est désigné à partir d'ici comme ressaut forcé type A. De l'autre côté, le cas limite est l'onde par dessus le seuil, avec le niveau d'eau aval sans effet sur celui à l'amont; il correspond au cas 1.3) de la classification. Les autres types intermédiaires sont obtenus par abaissements successifs du plan d'eau à l'aval, en allant du ressaut forcé type A à l'onde; la transition entre les divers types est continue. Les différents types sont présentés en détail au §4.5 pour un cas représentatif de ressaut forcé par seuil. Une nouvelle classification sera proposée au §4.6.

### 4.3 INFLUENCE DE LA LARGEUR DU SEUIL SUR LES HAUTEURS CONJUGUEES

#### 4.31 Introduction

Le but de ce paragraphe est de déterminer l'influence de la largeur  $b$  du seuil sur l'écoulement, i.e. de savoir si le profil caractéristique de ce dernier est modifié ou non lorsque la largeur du seuil change dans les proportions suivantes :  $1/4$ ,  $1/2$ , 1 et 2 fois la hauteur  $s$  du seuil (cf. Figure 3.8), correspondant à des proportions réalisables constructivement. Si cette influence s'avère négligeable, cela éliminera un paramètre et signifiera que, pour des conditions données

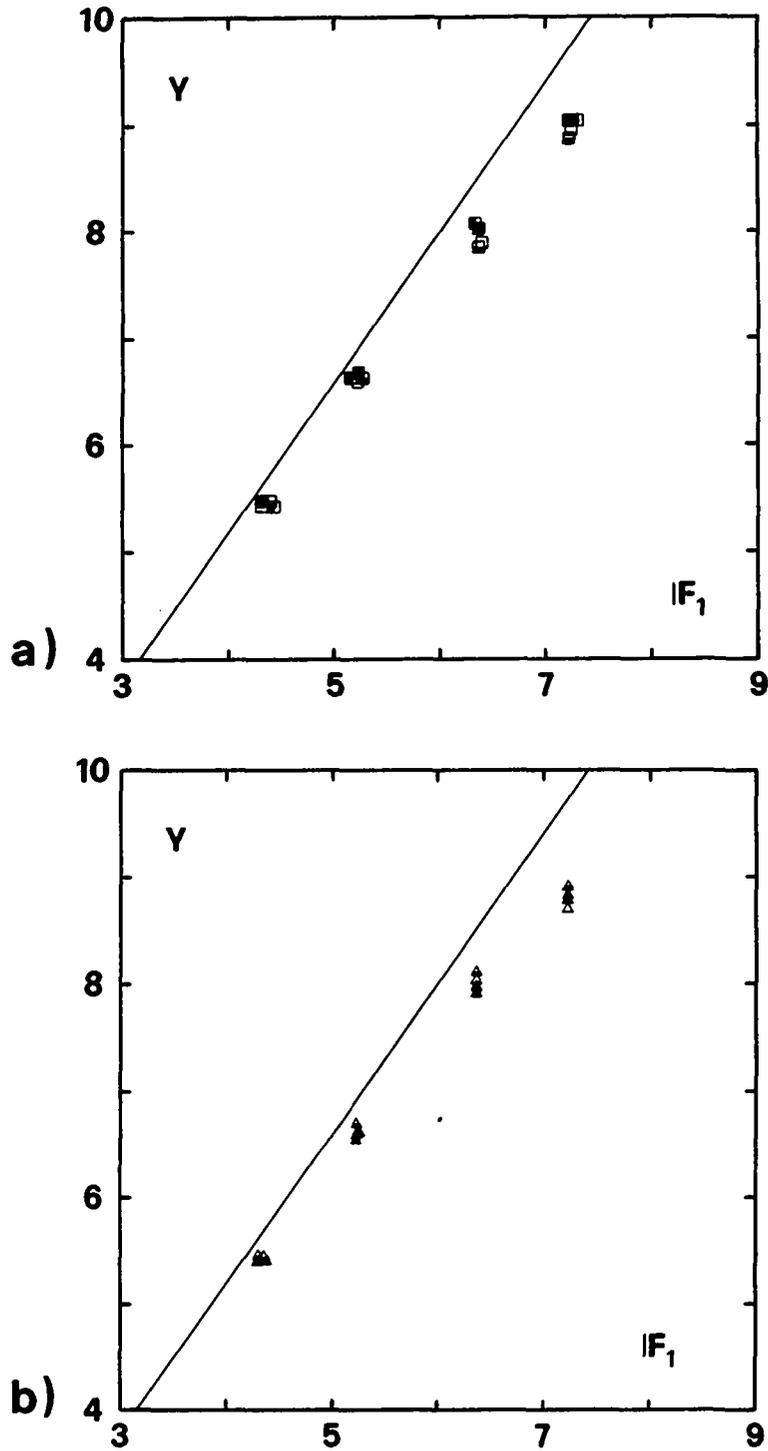


Figure 4.3 : Rapport  $Y = h_2/h_1$  des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour le ressaut forcé type A : a) seuil  $s = 50$  mm (■), b) seuil  $s = 75$  mm (▲) et c) seuil  $s = 100$  mm (●) (ce dernier est présenté à la page suivante). Pour chaque nombre de Froude, les points doivent être sur la même verticale, pour des raisons de clarté des décalages latéraux sont apportés. (—) équ. (2.3) du ressaut classique selon Bélanger. Symbole semi-vide en haut :  $b/s = 1/4$ , symbole vide :  $b/s = 1/2$ , symbole plein :  $b/s = 1$  et symbole semi-vide à droite :  $b/s = 2/1$ .

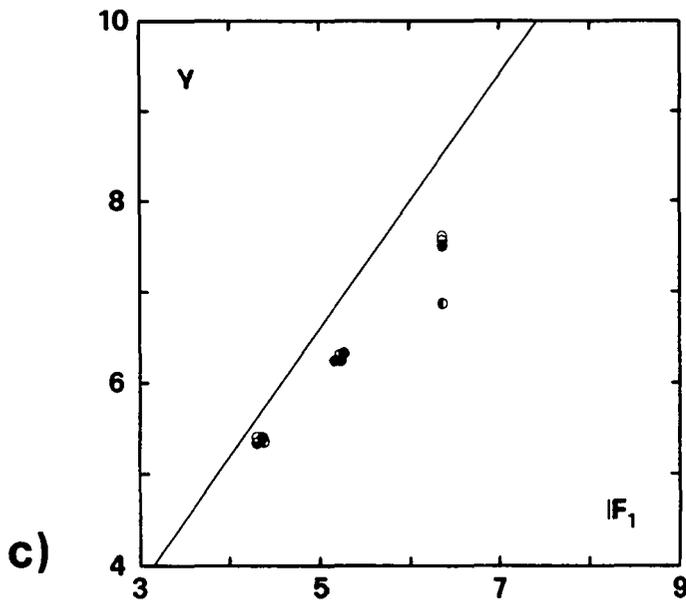
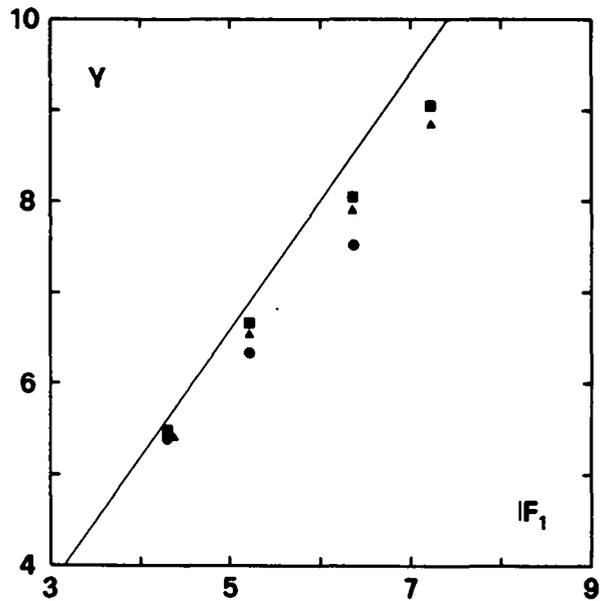
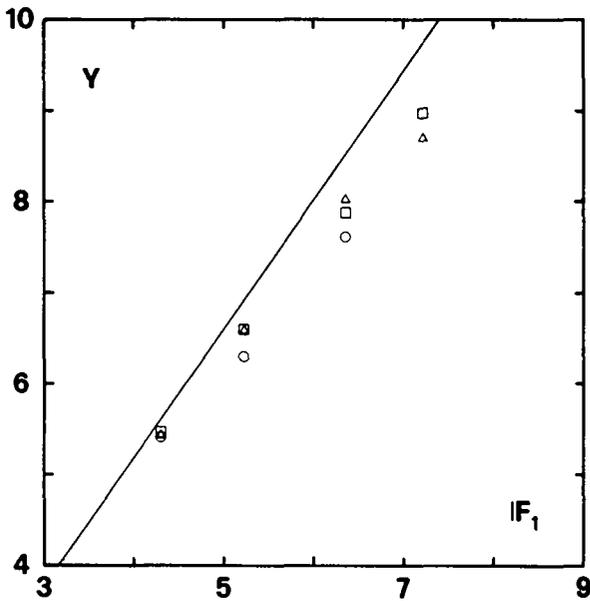


Figure 4.3 (suite) : c) Seuil  $s=100$  mm.



a)

b)

Figure 4.4 : idem Figure 4.3, regroupement des seuils selon le rapport  $b/s$  : a)  $b/s = 1/2$  et b)  $b/s = 1$ . (Notations comme Figure 4.3).

$(h_2, F_1)$ , seule la hauteur du seuil  $s$  joue un rôle sur l'écoulement. Dans cette optique, les hauteurs conjuguées et les profils de surface sont mesurés pour des ressauts forcés type A, avec les seuils de différentes largeurs. Cette analyse porte seulement sur le ressaut forcé type A parce que sa définition est aisée, que les mesures  $y$  sont faciles à exécuter, qu'il est présent pour n'importe quels seuils et débits (pour autant que les conditions de formation soient remplies), qu'il est comparable au ressaut classique et que les résultats seront applicables a fortiori pour les autres cas de ressaut.

#### 4.32 Résultats

Les résultats sont présentés aux Figures 4.3 et 4.4; les points expérimentaux des rapports  $Y=h_2/h_1$  des hauteurs conjuguées sont exprimés en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .

La première constatation est la diminution du rapport  $Y$  pour  $F_1$  donné par rapport au ressaut classique, provoquée par la présence d'un seuil dans l'écoulement. Cette diminution est d'autant plus grande que  $F_1$  est élevé. La seconde constatation concerne la réduction de  $Y$  qui augmente avec la taille du seuil. Au-delà d'une hauteur relative  $S=s/h_1 > 4$ , le ressaut est repoussé vers l'amont et le seuil fait office de déversoir, ce qui explique l'absence de valeurs expérimentales pour  $F_1=7.23$  sur la Figure 4.3 c). Sur cette même figure, le point expérimental pour  $F_1=6.36$  et  $b/s=2$  est éloigné des autres points; la largeur  $b$  du seuil joue ici un rôle : le ressaut forcé type A est obtenue sans que l'écoulement sur le seuil soit complètement noyé.

Mis à part cela, les diagrammes ci-dessus n'indiquent pas une tendance nette quant à l'influence de la largeur  $b$  du seuil sur le rapport des hauteurs conjuguées  $Y$ , les points pour un nombre de Froude  $F_1$  et une hauteur de seuil  $s$  donnés étant pratiquement aux mêmes endroits pour les divers  $b/s$ .

La Figure 4.4 présente les mêmes résultats mais regroupés selon les largeurs relatives  $b/s$  des seuils. Les mêmes remarques générales faites plus haut sont aussi valables dans ce cas, concernant l'effet de la largeur du seuil.

Dans le tableau 4.1 sont reportés les écarts sur le rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en fonction de la largeur relative  $b/s$  des seuils. Les seuils avec  $b/s=1$  servent de référence pour calculer ces écarts. Les valeurs chiffrées du tableau 4.1 confirment les constatations énoncées plus haut. Les écarts extrêmes  $\Delta$  (%) par rapport aux seuils de référence sont les suivants : 1) pour  $s=50$  mm,  $-0.37 < \Delta < 2.24$ ; 2) pour  $s=75$  mm,  $-2.65 < \Delta < 1.47$ , 3) pour  $s=100$  mm,  $-1.20 < \Delta < 8.78$ .

Cette dernière valeur dépasse très nettement les autres qui sont dans un domaine oscillant de  $\pm 3\%$  autour de la valeur de référence. Ceci indique que la largeur du seuil joue un rôle dans ce cas précis pour  $F_1$ ,  $S$  et  $b/s$  donnés. Mis à part cela, l'influence de  $b$  sur  $Y$  peut être considérée comme négligeable, car du même ordre de grandeur que l'erreur de mesure. Donc par la suite, les essais se limiteront à analyser l'effet de la hauteur du seuil sur l'écoulement.

	$F_1$	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$	$\Delta_4$	$\Delta_5$
s = 50 mm	7.23	1.88	0.88	0.00	0.00	7.16
	6.36	2.24	1.87	0.00	-0.37	5.62
	5.23	0.60	1.20	0.00	0.60	3.37
	4.30	0.00	0.36	0.00	0.36	1.99
s = 75 mm	7.23	-0.91	1.47	0.00	0.57	9.31
	6.36	-2.65	-1.52	0.00	-0.76	7.03
	5.23	-2.29	-0.76	0.00	-1.07	5.25
	4.30	-1.11	-0.93	0.00	-0.37	3.60
s=100 mm	6.36	-0.80	-1.20	0.00	8.78	11.62
	5.23	1.42	0.63	0.00	1.26	8.29
	4.30	0.74	-0.19	0.00	0.37	3.78

Tableau 4.1 : Ecart  $\Delta$  en % du rapport des hauteurs conjuguées pour les 3 hauteurs  $s$  de seuil en fonction du nombre de Froude  $F_1$  et de la largeur relative  $b/s$ , pour le ressaut forcé type A.  $\Delta_1$  écart pour  $b/s=1/4$ ,  $\Delta_2$  pour  $b/s=1/2$ ,  $\Delta_3$  pour  $b/s=1$  (seuils de référence) et  $\Delta_4$  pour  $b/s=2$ . La dernière colonne à droite indique l'écart  $\Delta_5$  (en %) du rapport  $Y$  du seuil de référence par rapport au rapport  $Y$  du ressaut classique.

Les écarts de  $Y$  du ressaut forcé type A par rapport au ressaut classique donnés dans le tableau 4.1 augmentent d'une part avec  $F_1$  et avec la hauteur des seuils d'autre part. Ceci s'explique par le fait que la formation du rouleau est favorisée par la présence d'un seuil; la longueur du rouleau  $L_r$  est ainsi diminuée et la hauteur d'eau aval  $h_2$  est réduite par rapport à celle requise pour le ressaut classique. Ce fait va être analysé plus en détail au chapitre 6.

#### 4.4 CORRECTION SUR LES HAUTEURS CONJUGUEES

Le ressaut forcé type A est défini par analogie au ressaut classique, car le rouleau de surface du premier est terminé au droit du seuil. Les 2 cas sont identiques en apparence, mais le ressaut forcé type A requiert une hauteur d'eau aval  $h_2$  moindre à cause de la contraction provoquée par le seuil. Cet effet est étudié ci-après et quantifié à l'aide d'un coefficient de correction qui s'applique au rapport des hauteurs conjuguées  $Y$ . A cette fin, l'analogie des contractions dans les conduites est exploitée pour résoudre le cas du canal découvert, à défaut d'une méthode plus exacte; ce procédé est acceptable étant donné les faibles nombres de Froude au voisinage du seuil et la quasi-horizontalité du plan d'eau dans cette zone considérée. Comme le montre la Figure 4.3, les rapports des hauteurs conjuguées expérimentales  $Y$  pour le ressaut forcé type A se situent en-dessous de la courbe de Bélanger. Cette différence s'explique de plusieurs façons :

- l'influence du frottement,
- l'influence du nombre de Froude,
- l'influence du seuil,
- la précision des mesures.

L'influence du seuil fait l'objet du présent paragraphe. Dans le cas d'un écoulement entièrement fluvial, le seuil provoque un rétrécissement local de la section d'écoulement. Il s'en suit une augmentation locale de la vitesse au-dessus du seuil, une perte de charge locale  $\Delta H$  à l'aval du seuil due à la divergence des lignes de courant, accompagnée d'une diminution du niveau d'eau sur le seuil.

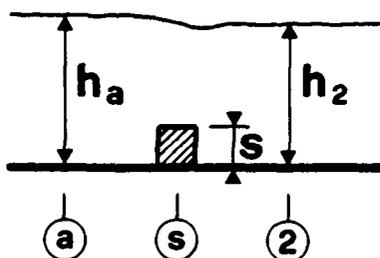


Figure 4.5 : Contraction due au seuil dans un ressaut forcé type A : définition des termes de hauteurs dans les sections (a) devant le seuil, (s) au droit du seuil et (2) à l'aval.

L'équation de Bernoulli entre les sections (a) et (2) s'écrit (cf. Figure 4.5) :

$$(4.1) \quad h_a + V_a^2/2g = h_2 + V_2^2/2g + \Delta H,$$

avec  $h$  comme hauteur d'eau,  $V$  la vitesse moyenne dans cette section et

$$(4.2) \quad \Delta H = \xi \cdot (V_s^2/2g),$$

où  $V_s$  est la vitesse moyenne de l'écoulement au-dessus du seuil et  $\xi$  le coefficient de perte de charge locale.

Avec l'équation de continuité, en posant  $Y_2 = h_a/h_2$ ,  $S_2 = s/h_2$  et  $F_2^2 = [Q^2/(gB^2h_2^3)]$ , et en divisant par  $h_2$ , l'équation (4.1) peut alors s'écrire :

$$(4.3) \quad Y_2 + \frac{F_2^2}{2Y_2^2} = 1 + \frac{F_2^2}{2} + \xi \frac{F_2^2}{2(1-S_2)^2}.$$

Comme hypothèse de base, étant donné la proximité des sections (a) et (2),  $V_a \approx V_2$  est admis. Après simplification, l'équation (4.3) devient :

$$(4.4) \quad Y_2 = 1 + \xi \frac{F_2^2}{2(1-S_2)^2}.$$

La valeur corrigée des hauteurs conjuguées  $Y_c$  est finalement le produit :  $Y_c = Y \cdot Y_2$ .

$\xi$  est estimé par analogie avec un diaphragme dans une conduite (cf. [24], diagramme 4.14), l'écoulement sur le seuil représentant la moitié de celui au travers du diaphragme (cf. Figure 4.6). Le coefficient  $\xi$  est fonction du rapport des surfaces  $\psi = A_0/A_1$  où  $A_0$  est la section du diaphragme et  $A_1$  la section normale, avec  $0 < \psi < 1$ , et du rapport  $\kappa = l/D_h$ , où  $l$  est la longueur du diaphragme,  $D_h = 4A_0/P_0$  le diamètre hydraulique et  $P_0$  le périmètre du diaphragme; soit :  $\xi = \xi(\psi, \kappa)$ .

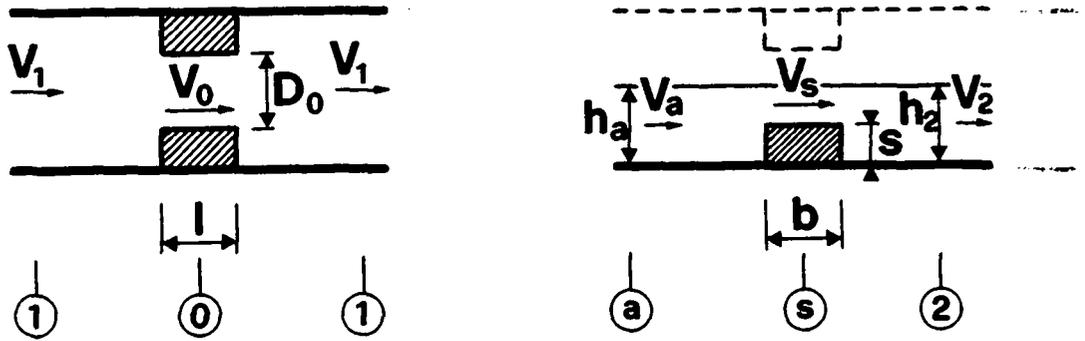


Figure 4.6 : Définition des termes pour l'analogie entre a) le diaphragme et b) le seuil.

Selon [24] pour le cas étudié, le diagramme  $\xi = \xi(\phi, \kappa)$  est tracé à la Figure 4.7 pour  $\kappa=0$  et  $\kappa=1$ . Lorsque  $\phi$  tend vers 0,  $\xi$  tend vers  $\infty$ , quel que soit  $\kappa$ . Les valeurs de  $\xi$  diminuent lorsque  $\kappa$  augmente, pour atteindre approximativement un minimum pour  $\kappa=2$ , puis elles augmentent pour  $\kappa>2$ . Les courbes limites sont données d'une part par  $\kappa=0$  et par  $\kappa=2$  d'autre part, cette dernière étant proche de celle pour  $\kappa=1$  et n'étant pas représentée à la Figure 4.7.

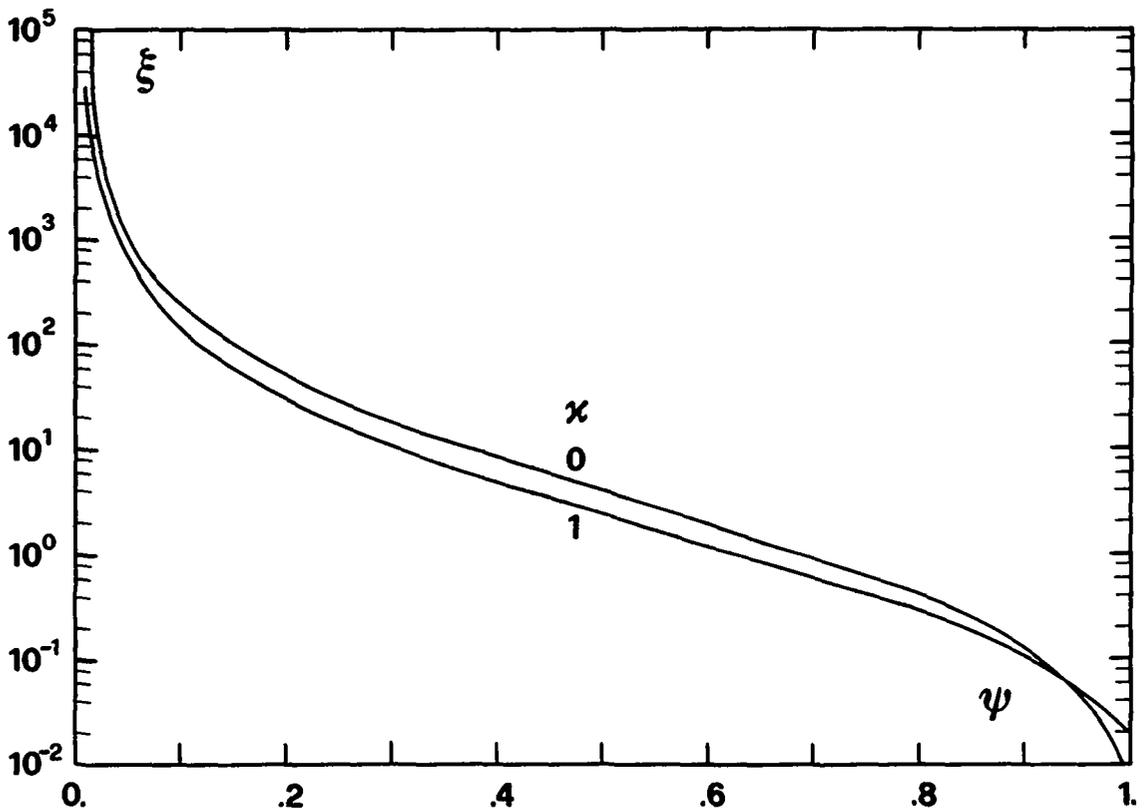


Figure 4.7 : Coefficient de perte de charge locale pour un diaphragme  $\xi = \xi(\phi, \kappa)$ , selon [24].

L'échelle des  $\xi$  est logarithmique et donc peu pratique. Cependant, avec  $V_1 = (A_0/A_1) \cdot V_0$ , le coefficient de perte de charge modifié  $\xi^*(V_0)$  se détermine par :

$$(4.5) \quad \xi^*(V_0) = (A_0/A_1)^2 \cdot \xi(V_1).$$

La Figure 4.8 présente le nouveau diagramme pour  $\xi^* = \xi^*(\psi, \kappa)$ .

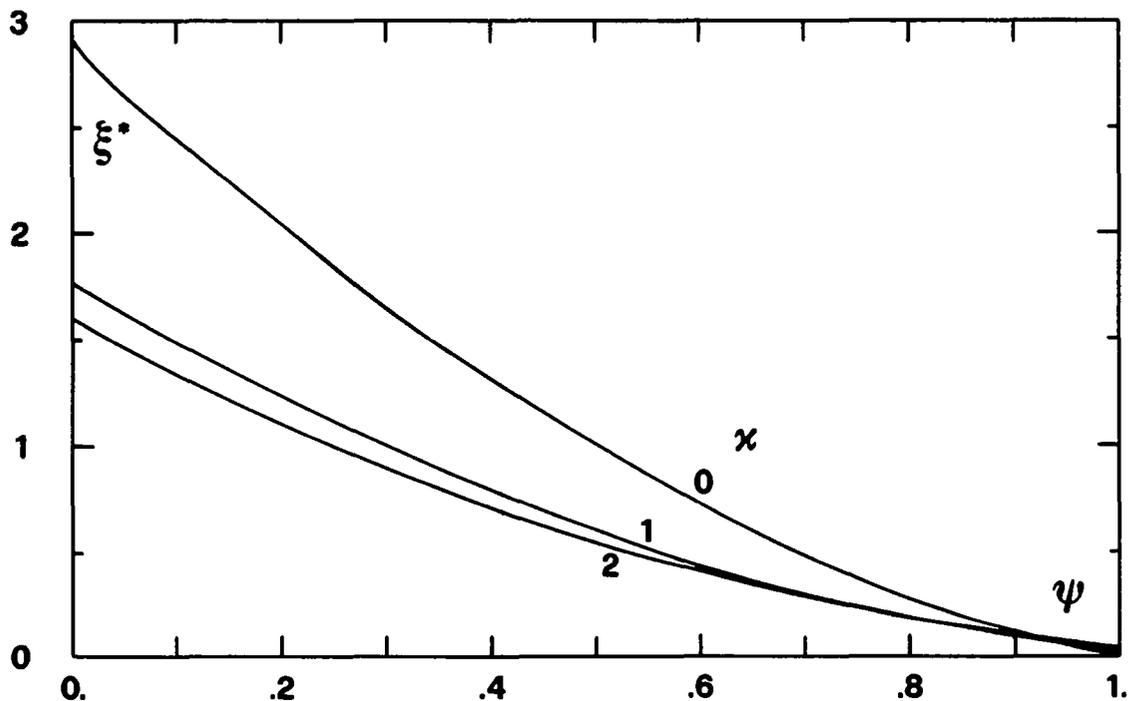


Figure 4.8 : Coefficient de perte de charge locale pour un diaphragme, rapporté à la vitesse  $V_0$  dans le diaphragme  $\xi^*(V_0) = \xi^*(\psi, \kappa)$ ; courbes pour  $\kappa=0, 1$  et  $2$ .

Pour  $\kappa=0$ , la courbe  $\xi^*(\psi, \kappa=0)$  peut être approchée par l'équation :

$$(4.6) \quad \xi^*(\psi, \kappa=0) = [2(1-\psi)]^{1.5}.$$

L'équation générale  $\xi^* = \xi^*(\psi, \kappa)$  est obtenue en déterminant l'influence de  $\kappa$ ,  $0 \leq \kappa < 1$ . A cette fin, le diagramme  $\kappa = \kappa(\xi^*/\xi_0^*)$  montré à la Figure 4.9, pour différents  $\psi$ .

La pente à l'origine de la courbe ainsi reçue fournit le terme d'influence de  $\kappa$ . Cette pente vaut  $-1/3$  environ et ce terme est donc  $(1 - \kappa/3)$ , pour  $0 \leq \kappa < 1$ . L'équation générale s'écrit :

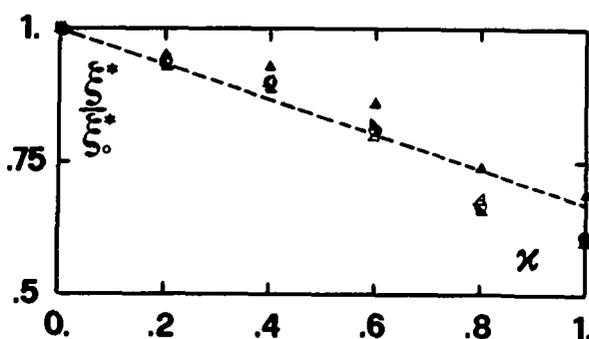


Figure 4.9 : Pente à l'origine de la courbe  $\kappa = \kappa(\xi^*/\xi_0^*)$ .

$$(4.7) \quad \xi^*(\psi, \kappa) = [2(1-\psi)]^{1.5} \cdot (1 - \kappa/3).$$

$Y_2$  peut maintenant être calculé. Dans notre cas,  $\psi = A_0/A_1 = h_s/h_2$ , soit  $\psi = (h_2 - s)/h_2 = 1 - S_2$ , d'où :

$$(4.8) \quad Y_2 = 1 + (2S_2)^{1.5} \cdot (1 - \frac{\kappa}{3}) \left( \frac{F_2}{1 - S_2} \right)^2.$$

Connaissant la hauteur de seuil relative  $S_2$  et le rapport  $\kappa$ , le rapport corrigé des hauteurs conjuguées est déterminé par :

$$(4.9) \quad Y_c = Y_2 \cdot Y,$$

où  $Y$  est le rapport des hauteurs conjuguées expérimentales et  $Y_2$  le facteur de correction défini par l'équ. (4.8).

Pour les trois seuils carrés, les valeurs expérimentales des hauteurs conjuguées et les valeurs corrigées sont montrées sur la Figure 4.10. Par le biais de cette correction, les points expérimentaux se sont rapprochés de la courbe de Bélanger qui représente la limite supérieure des hauteurs conjuguées. La correction est d'autant plus importante que  $S_2$  est grand (i.e. que le seuil est haut) et que le nombre de Froude  $F_1$  est élevé.

Ainsi les hauteurs conjuguées du ressaut forcé type A peuvent être calculées. On constate que  $Y_A$  ne dépend que de  $S_2$ ,  $\kappa$  et  $F_2$ ; ces paramètres sont définis dans ce paragraphe §4.4.

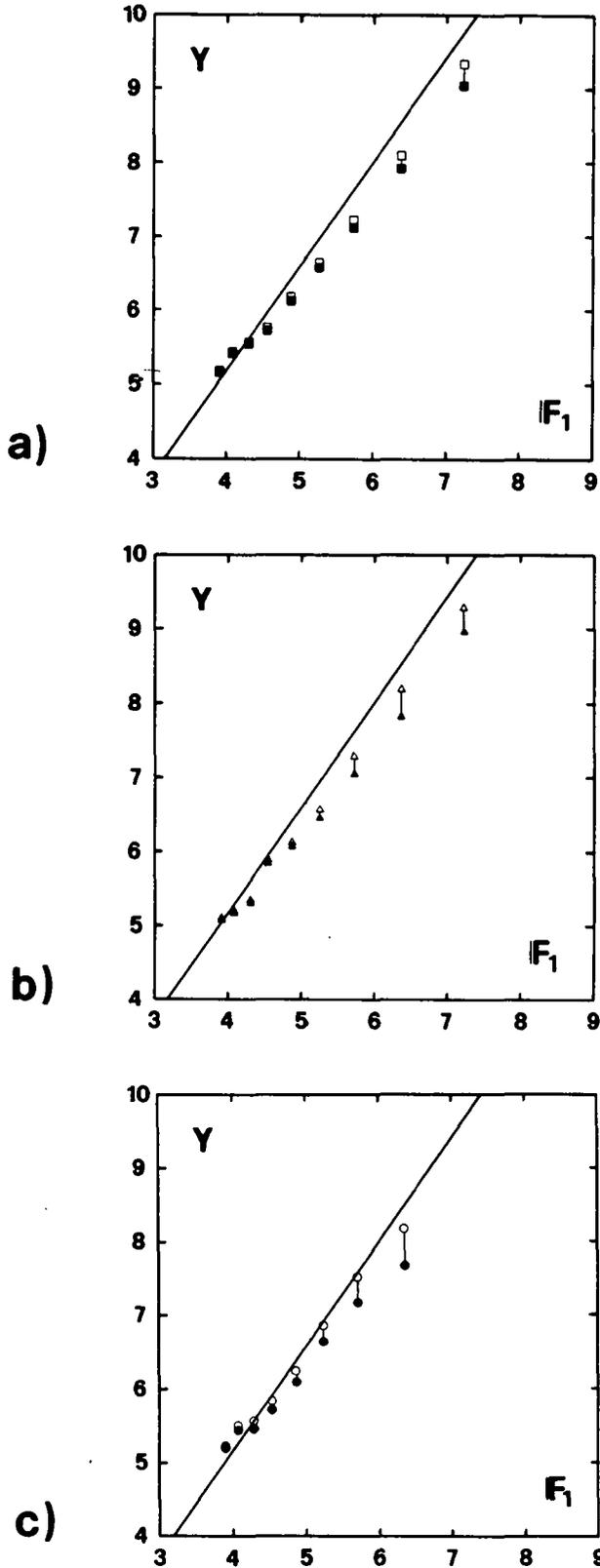


Figure 4.10 : Correction des hauteurs conjuguées pour le res-saut forcé type A, pour les seuils carrés a) (■)  $s=50$  mm, b) (▲)  $s=75$  mm et c) (●)  $s=100$  mm. Les symboles vides représentent les hauteurs conjuguées corrigées et les symboles pleins les hauteurs conjuguées expérimentales selon §4.3.

#### 4.5 VITESSES ET PRESSIONS DANS LE RESSAUT FORCÉ

Un cas représentatif du ressaut forcé par seuil est présenté dans ce paragraphe. L'écoulement concerné est caractérisé par le nombre de Froude  $F_1=5.23$ ,  $Q=100$  l/s,  $h_1=53$  mm et le seuil utilisé est de section carrée avec  $s=75$  mm. Ceci correspond à un "bon ressaut" comme défini par [02]. Les vitesses et les pressions sur le fond sont mesurées avec 5 hauteurs d'eau aval  $h_2$  différentes : 5 configurations sont ainsi obtenues allant du ressaut forcé type A à l'onde libre, en passant par trois types intermédiaires, comme décrit à la fin du §4.2.

##### 4.51 Répartition axiale des vitesses

Dans la section médiane du canal ( $y=250$  mm), les directions des lignes de courant dans le plan vertical sont mesurées à l'aide de la sonde de direction verticale et les valeurs moyennes sur un laps de temps d'une minute sont retenues; en un point donné, le moulinet est positionné avec l'angle de la ligne de courant déterminé au préalable et trois mesures par intégration sont effectuées. Dans la section médiane, l'angle dans le plan horizontal est  $0^\circ$  ou  $180^\circ$ . La répartition des vitesses ainsi obtenue est représentée à la Figure 4.11 pour les 5 types étudiés. L'évolution de cette répartition le long du ressaut, sur le seuil et au-delà à l'aval, est mise en évidence. Etant données les fortes fluctuations de niveau dans certains cas, des mesures de vitesse proches de la surface font défaut.

Pour le ressaut forcé type A, les vitesses sont élevées près du fond au pied du ressaut, diminuent à l'approche du seuil et se stabilisent au-delà, en redevenant distribuées de façon turbulente. Au-delà du seuil, la direction des vitesses est parallèle au fond ; il importe de constater que le maximum de la vitesse se trouve proche de la surface libre. La zone du rouleau est définie par les vitesses négatives (dans le sens aval→amont) devant le seuil et se termine au droit de ce dernier. Un rouleau de fond se dessine à l'aval du seuil, avec de faibles vitesses. Les directions des lignes de courant (repré-

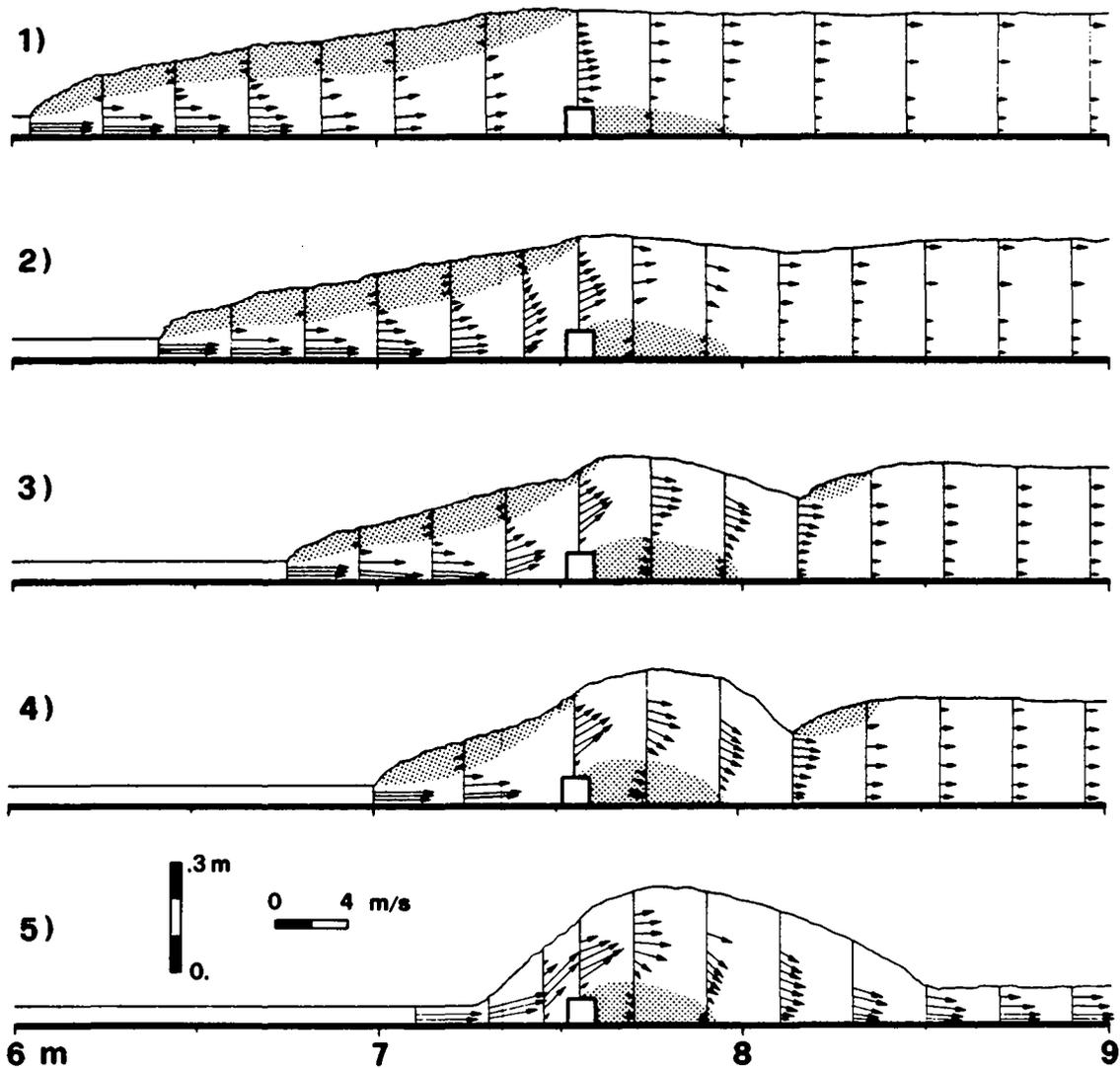


Figure 4.11 : Ressaut forcé par seuil,  $F_1 = 5.23$ ,  $s \times b = 75 \times 75$  mm; répartition axiale des vitesses, avec direction dans le plan vertical. 1) ressaut forcé type A, 2) 3) et 4) ressauts forcés types intermédiaires, 5) onde. Les zones hachurées indiquent les rouleaux de surface et de fond (avec vitesses négatives).

sentées par les vecteurs vitesses) sont d'autant plus marquées que le seuil approche, puis redeviennent horizontales au-delà.

Pour l'onde, qui se présente sans submersion aval et correspondant à l'autre cas limite avec le ressaut forcé type A, les vitesses restent élevées de part et d'autre du seuil. Il n'y a pas de rouleau de surface, mais celui de fond à l'aval est important, plus en hauteur qu'en longueur à cause de la courbure de l'onde. A son extrémité, le jet retombe violemment sur le fond du canal et l'écoulement reste torrentiel vers l'aval, avec des vitesses élevées près du fond.

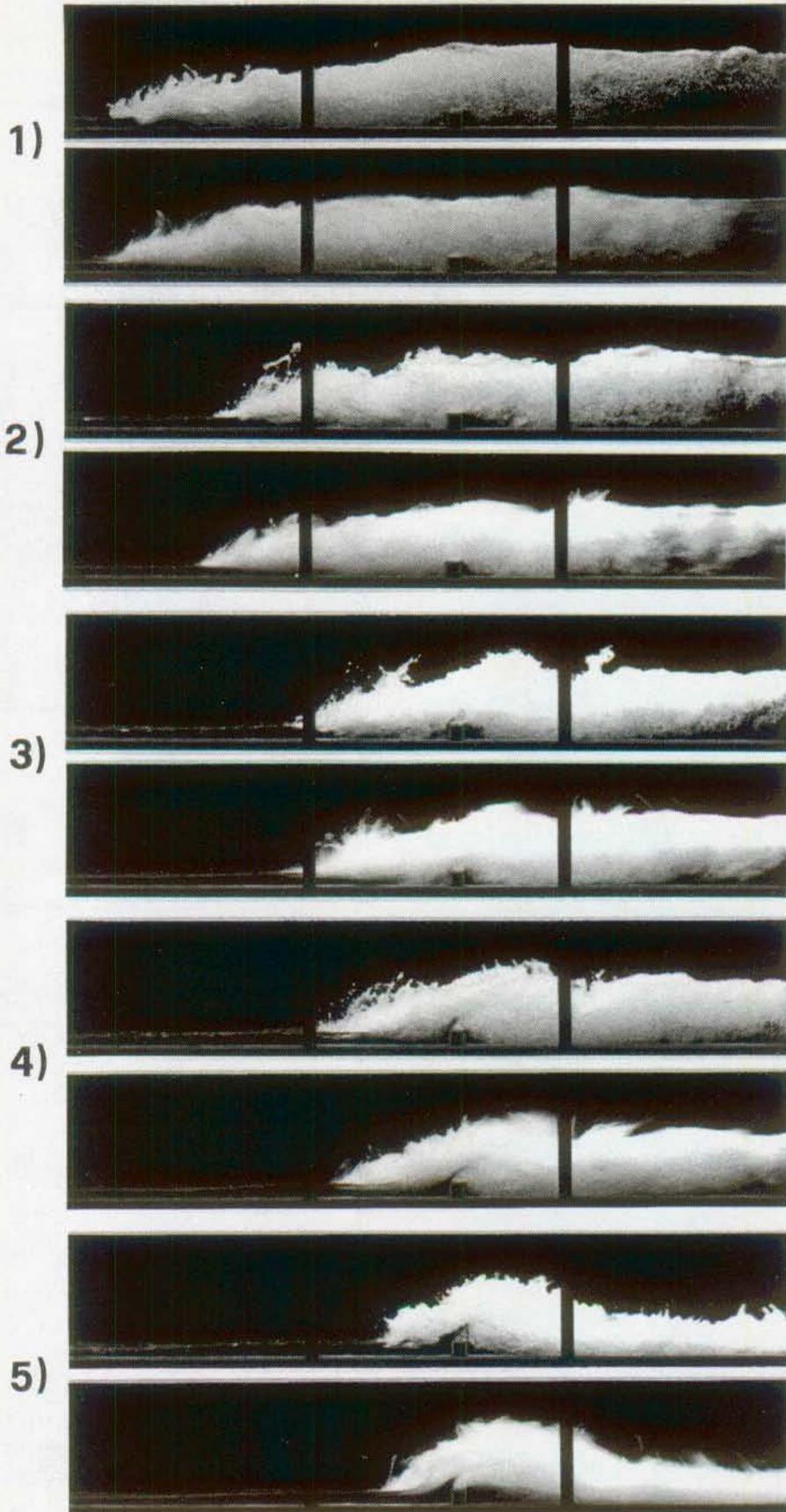


Figure 4.12 : Photographies des 5 cas étudiés : 1) ressaut forcé type A, 2), 3) et 4) ressauts intermédiaires, 5) onde. Pour chaque cas, 2 photos sont présentées avec des temps d'exposition de 1/125 et 1/4 secondes, respectivement.

Les trois autres types se situent entre les deux décrits ci-dessus, par abaissements successifs du niveau d'eau à l'aval; le rouleau de surface à l'amont du seuil devient à chaque fois plus réduit et celui de fond à l'aval plus prononcé. Un deuxième rouleau fait son apparition à l'aval du seuil pour les types 3) et 4). La répartition des vitesses évolue entre les deux cas limites. Plus le rouleau de surface est court, plus les lignes de courant sont inclinées près du seuil et plus les vitesses élevées sont proches du fond à l'aval.

#### 4.52 Pressions

La Figure 4.13 montre la répartition axiale des pressions pour les 5 types de ressaut forcé par seuil étudiés. Pour le ressaut forcé type A, la pression croît depuis une valeur quasi hydrostatique au pied du ressaut à un maximum qui se situe sur la face amont du seuil; ce dernier provoque une chute de la pression qui tend à revenir hydrostatique vers l'aval.

Le cas 2) (ressaut intermédiaire) ressemble au cas précédent, avec une accentuation du maximum et de la chute de la pression sur le seuil. Un creux d'onde apparaît à l'aval du seuil et la pression sur le fond y est plus élevée que celle hydrostatique : cela est dû à la courbure convexe des lignes de courant de l'écoulement principal.

Le cas 3) accuse la présence d'un deuxième rouleau à l'aval; au niveau du seuil, l'écart entre les extrema de pression est encore plus grand que pour le cas 2). La différence s'accroît encore pour le cas 4) du ressaut de longueur minimale et atteint son maximum pour le cas 5).

Pour l'onde libre, la face supérieure du seuil est en dépression; à l'aval, la pression croît à nouveau pour atteindre un deuxième maximum à l'endroit où le jet retombe sur le fond, puis décroît jusqu'à la valeur hydrostatique plus à l'aval.

D'une manière générale, plus le ressaut est court, plus la pression sur la face amont du seuil est élevée et plus sa

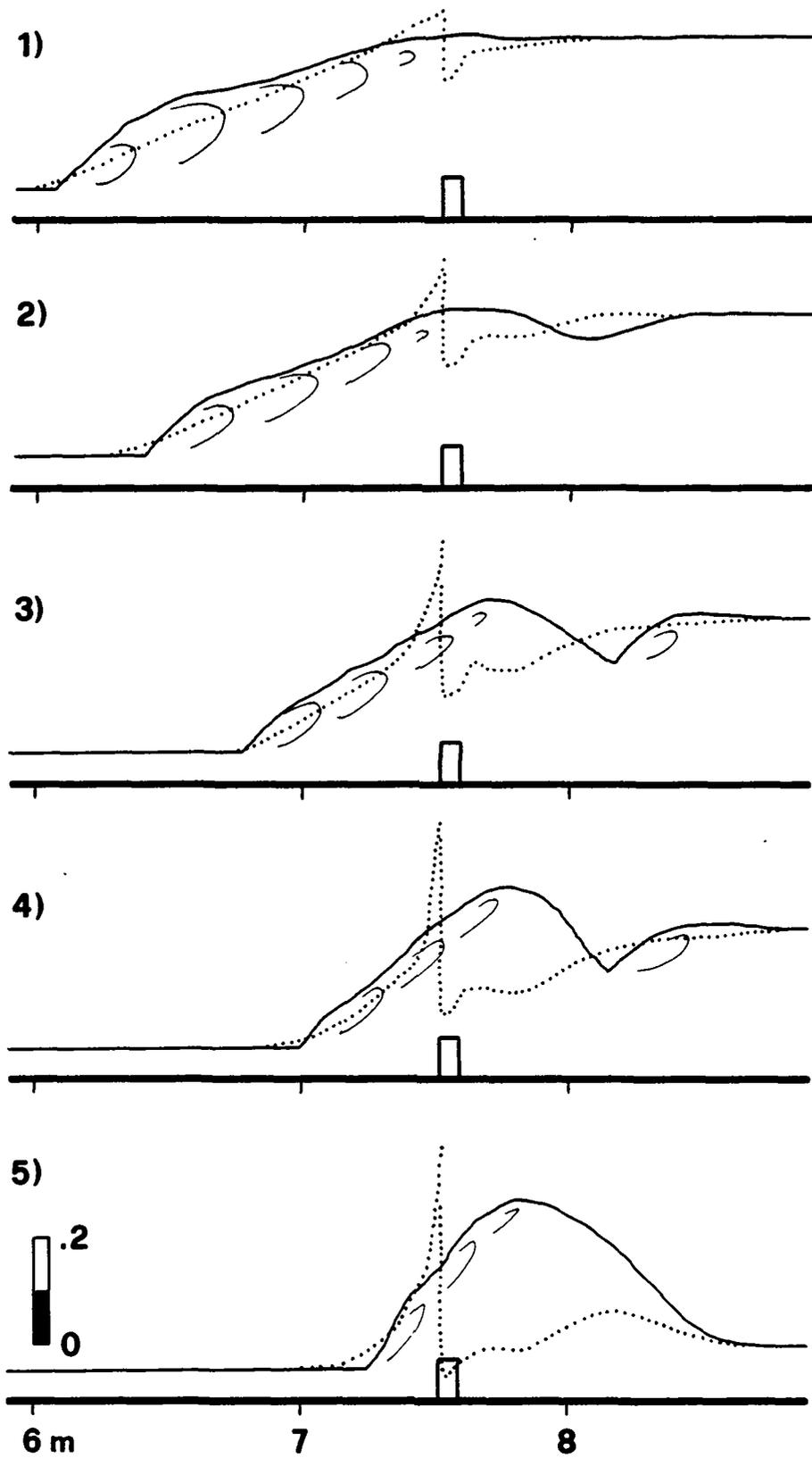


Figure 4.13 : Répartition axiales des pressions (•••) en mce sur le fond et sur le seuil, paramètres de base comme Figure 4.11. 1) ressaut forcé type A, 2), 3) et 4) ressauts intermédiaires, 5) onde. (L'échelle horizontale est la moitié de celle verticale).

chute est grande juste à l'aval et plus le gradient est prononcé. La pression est hydrostatique avant le ressaut et le redevient après.

#### 4.6 NOUVELLE CLASSIFICATION

Le §4.5 a présenté 5 types de ressaut forcé par seuil : le ressaut forcé type A, l'onde et trois types intermédiaires. Cette façon de procéder est plus "naturelle" que celle décrite au §4.2 pour la classification selon le modèle de [41]. La longueur n'est plus ici un paramètre, mais les profils de surface et de vitesses entrent en ligne de compte, pour la protection aval du bassin amortisseur contre l'érosion, critère analogue à celui de Moore et Morgan [32] pour les marches négatives (cf. §2.33).

Par la suite, seuls des ressauts forcés par seuil avec un niveau aval approprié seront traités, i.e. tel que l'écoulement principal avec les vitesses élevées reste près de la surface libre, évitant de la sorte une érosion du fond. Ainsi l'écoulement aval devient fluvial et la dissipation d'énergie envisagée est accomplie. Sont donc retenus le ressaut forcé type A et les ressauts forcés types 2) et 3) de la Figure 4.11. Ces deux derniers sont obtenus par diminution de la hauteur d'eau aval par rapport au ressaut forcé type A; ils seront appelés ressaut forcé type B et ressaut forcé type  $B_{min}$  respectivement.

Le ressaut forcé type A (déjà défini à la fin du §4.23) correspond à l'écoulement dont le rouleau de surface se termine au droit du seuil et le profil de surface est pratiquement horizontal au-delà; le ressaut forcé type B est caractérisé par l'apparition momentanée d'un deuxième rouleau de surface (à l'aval du seuil) dont la position est très fluctuante; le ressaut forcé type  $B_{min}$  possède un deuxième rouleau à l'aval complètement formé et stationnaire, et est plus court que le type B, mais n'est pas le ressaut minimum possible à l'amont du seuil. La transition entre les divers types est continue, obtenue par abaissement du plan d'eau à l'aval.

En abaissant encore la hauteur d'eau aval  $h_2$ , d'autres types de ressaut forcé apparaissent : le ressaut type intermédiaire 4) et l'onde (cf. Figure 4.11); le premier sera appelé ressaut forcé type C, en respectant l'ordre des trois premiers. Toutefois, leur écoulement principal avec les vitesses élevées reste proche du fond : ils ne correspondent donc plus au critère choisi. Le ressaut forcé type C sera traité aux §5.4 et §5.5, en comparaison avec les types A et  $B_{\min}$ , quant aux directions des lignes de courant et aux effets de l'érosion. Au chapitre 6 touchant le dimensionnement, seuls les ressauts forcés par seuil types A, B et  $B_{\min}$  seront considérés.

#### 4.7 CONCLUSION

Les différents types de ressaut forcé par seuil sont répertoriés et une classification de ceux-ci est présentée, en se basant sur celle de [41]. Deux nouveaux cas sont mis en évidence : le jet avec rouleau à l'aval du seuil et l'onde de hauteur maximale. Des photographies illustrent tous les types.

L'influence de la largeur  $b$  du seuil sur les hauteurs conjuguées pour le ressaut forcé type A est analysée et il en résulte que celle-ci est négligeable pour les cas étudiés (seuils rectangulaires et carrés), i.e. seule la hauteur du seuil intervient sur le rapport des hauteurs conjuguées pour des conditions données de l'écoulement.

Sur ces mêmes hauteurs conjuguées est apportée une correction qui tient compte de la contraction locale de l'écoulement provoquée par le seuil. L'effet du seuil peut de cette manière être évalué. Les points expérimentaux ainsi corrigés se rapprochent de la courbe de Bélanger. Cette correction est obtenue par analogie aux contractions dans les conduites.

La répartition axiale des vitesses pour cinq types d'écoulement est présentée et met en évidence les zones des rouleaux de surface et de fond. Plus la longueur du rouleau de surface diminue, plus les vitesses restent élevées près du fond et leurs directions sont inclinées autour du seuil.

La répartition axiale des pressions sur le fond pour les 5 mêmes cas montre que la force exercée sur la face amont du seuil est d'autant plus importante que le rouleau de surface est court, et que sur sa face supérieure, la pression chute fortement, pouvant engendrer des sous-pressions.

Une nouvelle classification simplifiée est proposée : elle se base non seulement sur les profils de surface mais aussi sur les profils de vitesses et des effets possibles d'érosion.

Trois types de ressaut forcé par seuil sont retenus pour être traités en détail dans le chapitre suivant. Il s'agit des ressauts type A, type B et type B<sub>min</sub>. Le premier correspond pratiquement au ressaut classique, les deux autres sont obtenus par diminution de la hauteur d'eau aval. Les trois types satisfont le même critère : le courant principal avec les vitesses élevées à l'aval du seuil reste près de la surface libre, évitant ainsi une érosion considérable du fond (voir aussi §5.5).



RESSAUT HYDRAULIQUE  
FORCE PAR SEUIL

CHAPITRE 5

RESSAUT FORCE PAR SEUIL  
ETUDES DETAILLEES



C H A P I T R E 5

-----

RESSAUT FORCE PAR SEUIL - ETUDES DETAILLEES

5.1 INTRODUCTION

Ce chapitre traite en détail d'un cas représentatif de ressaut hydraulique forcé avec le nombre de Froude  $F_1 = 5.23$  (correspondant à un débit  $Q=100$  l/s et une hauteur d'eau à l'amont  $h_1=53$  mm) et le seuil carré  $s=75$  mm, dans la configuration du canal avec le déversoir standard. Les trois types de ressaut forcé par seuil définis au § 4.6 sont retenus : le ressaut forcé type A ( $h_2=337$  mm), le ressaut forcé type B ( $h_2=320$  mm) et le ressaut forcé type  $B_{min}$  ( $h_2=305$  mm). Le ressaut forcé type B est le type intermédiaire entre les types A et  $B_{min}$ . C'est pourquoi seuls les ressauts types A et  $B_{min}$  sont traités en détail.

Pour ces deux types sont présentés les profils de surface, la répartition axiale des vitesses moyennes, les directions des lignes de courant dans la zone du seuil et la distribution des pressions à l'intérieur du ressaut. Le ressaut forcé type C ( $h_2=276$  mm) est comparé aux types A et  $B_{min}$  en ce qui concerne les directions des lignes de courant et les effets de l'érosion.

Les lignes d'eau sont relevées en 5 sections longitudinales et comparées entre elles. Les fluctuations verticales de la surface sont reportées sur les figures correspondantes.

La répartition axiale des vitesses présentée au §4.51 est complétée par les répartitions des vitesses dans 4 autres sections longitudinales. Ces mesures de vitesses comprennent aussi les directions dans les plans horizontal et vertical des vecteurs.

Les directions des lignes de courant dans la zone du seuil sont analysées précisément avec un réseau serré de mailles, sur une distance de 0.5 m de part et d'autre de l'obstacle. Ceci permet de comprendre l'écoulement interne dans le ressaut forcé par seuil et de mettre en évidence les tourbillons dans le rouleau de fond à l'aval du seuil. Ceci permet également d'expliquer le processus d'érosion à l'aval du seuil.

Une étude de l'érosion engendrée par la dissipation d'énergie à l'aval du seuil est présentée par des photographies. Elle permet de visualiser les effets de l'érosion pour trois types de ressaut forcé par seuil et montre l'importance de la protection du fond à l'aval du seuil sur une certaine distance.

La répartition des pressions statiques à l'intérieur de l'écoulement est comparée à la répartition hydrostatique correspondant à la pression sur le fond. Parallèlement, la répartition des pressions dynamiques et la distribution des vitesses obtenues à partir des pressions statique et dynamique est donnée. Une représentation typique des pressions sur les faces verticales du seuil est donnée à la fin du chapitre.

## 5.2 PROFILS DE SURFACES

### 5.21 Ressaut forcé type A

Les lignes d'eau sont mesurées dans 5 sections longitudinales, ce qui permet de connaître la surface globale du ressaut forcé. A chaque section verticale, les extrema de la surface de l'écoulement sont relevés et la moyenne des deux donne le point par lequel passe la ligne d'eau moyenne représentée à la Figure 5.1. Les traits verticaux y indiquent les fluctuations de la surface autour du niveau moyen. Ces variations sont très importantes dans la première moitié du rouleau de surface, puis elles s'atténuent vers l'aval, se transformant en ondulations. Ce profil moyen reste valable dans les cinq sections longitudinales, malgré les quelques différences dans les mouvements de circulation d'eau.

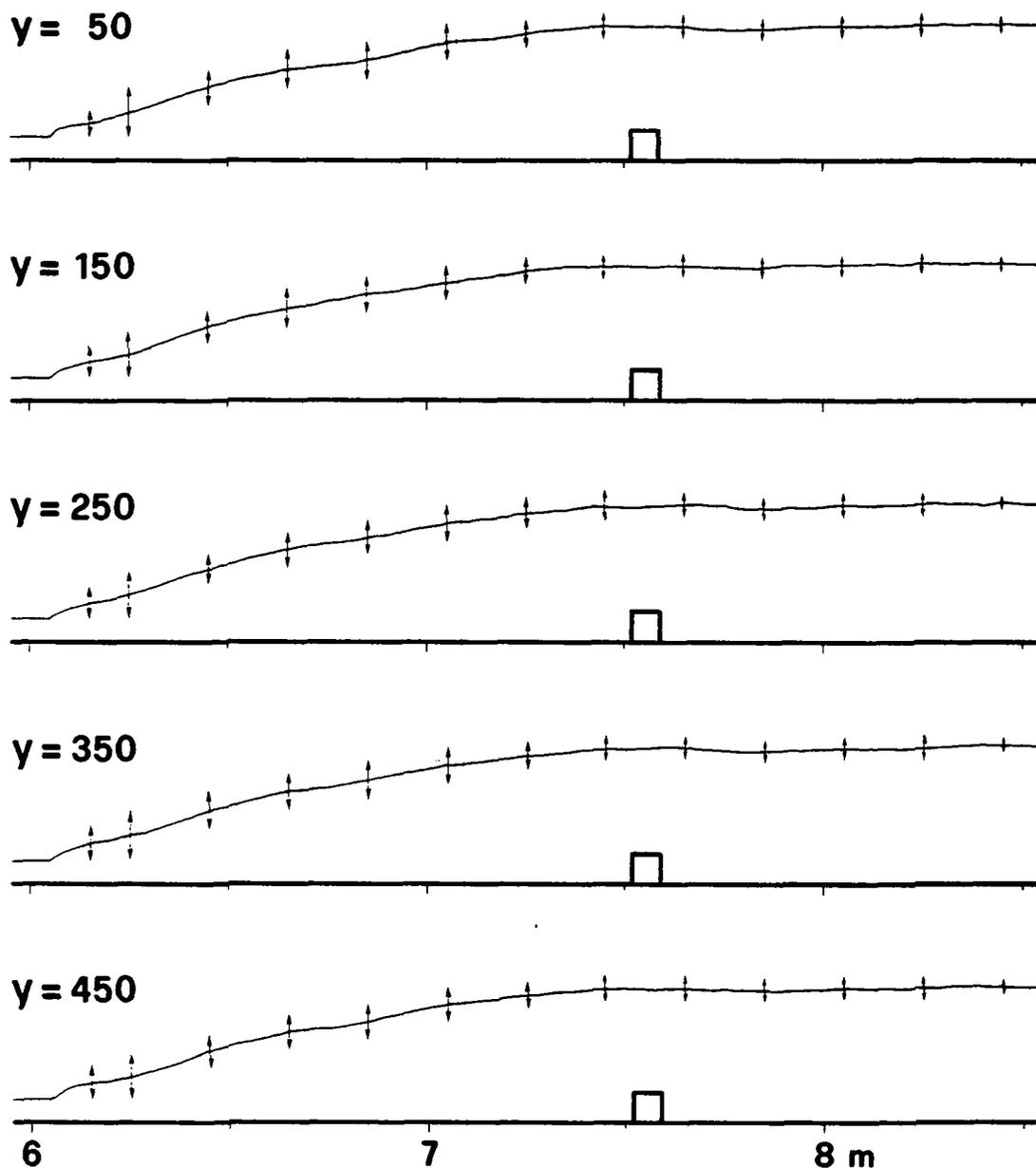


Figure 5.1 : Profils de surface pour le ressaut forcé type A avec les variations verticales de niveau (traits verticaux) pour différentes sections longitudinales ( $y$  en mm).

### 5.22 Ressaut forcé type $B_{min}$

Pour le ressaut forcé type  $B_{min}$ , les fortes variations demeurent jusqu'au-delà du seuil, au deuxième rouleau de surface, puis elles diminuent en devenant ondulantes, comme le montre la Figure 5.2. Il n'y a pas de différence notable entre les cinq sections longitudinales. Les fluctuations sont cependant plus importantes que pour le ressaut forcé type A.

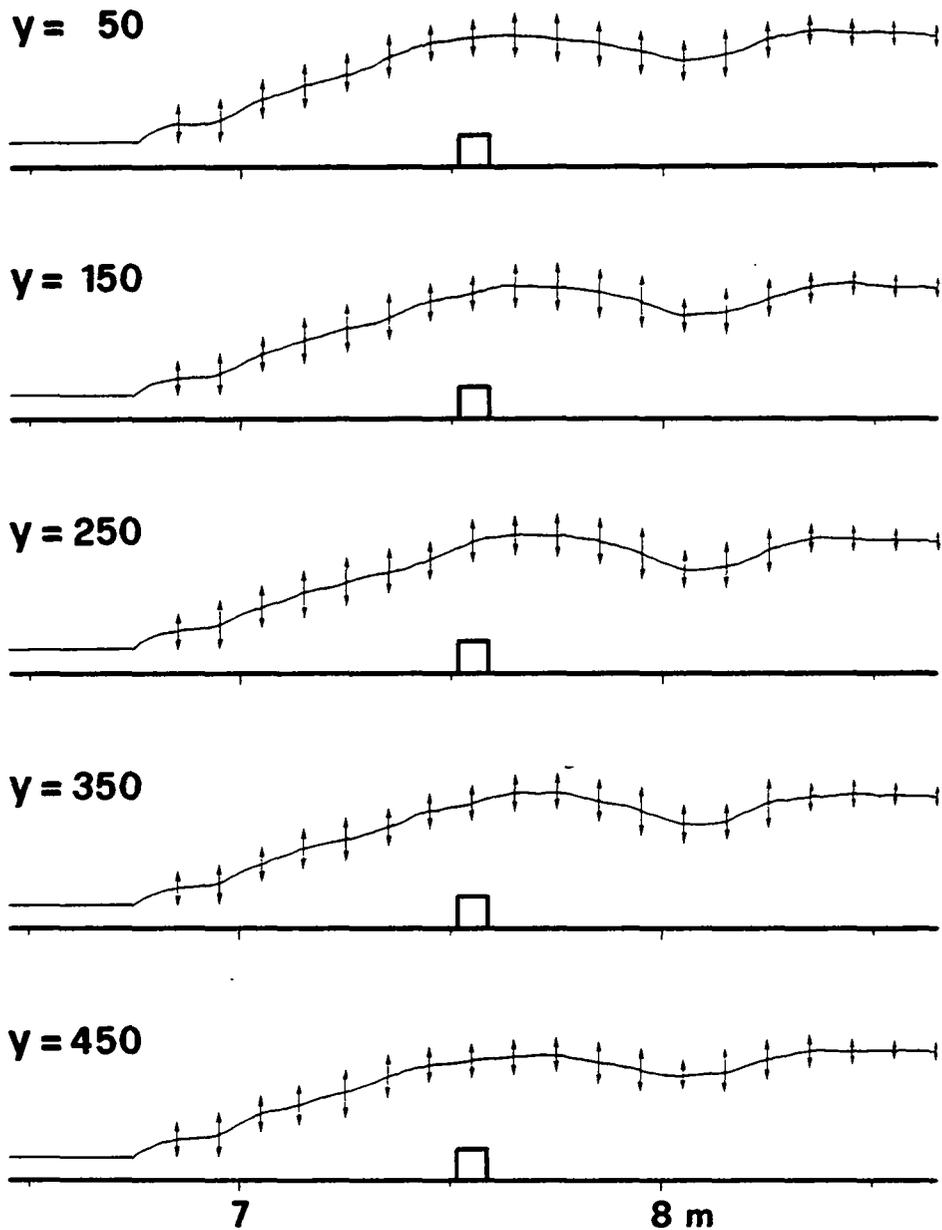


Figure 5.2 : Profils de surface pour le ressaut forcé type  $B_{min}$  avec les variations verticales de niveau (traits verticaux) pour différentes sections longitudinales ( $y$  en mm).

### 5.3 DISTRIBUTION DES VITESSES

#### 5.31 Ressaut forcé type A

Les vitesses pour ce cas ont été présentées globalement au §4.51, en comparaison avec quatre autres types possibles de l'écoulement. Les mesures ont été réalisées dans les mêmes conditions que celles de la Figure 4.11, avec en plus l'angle

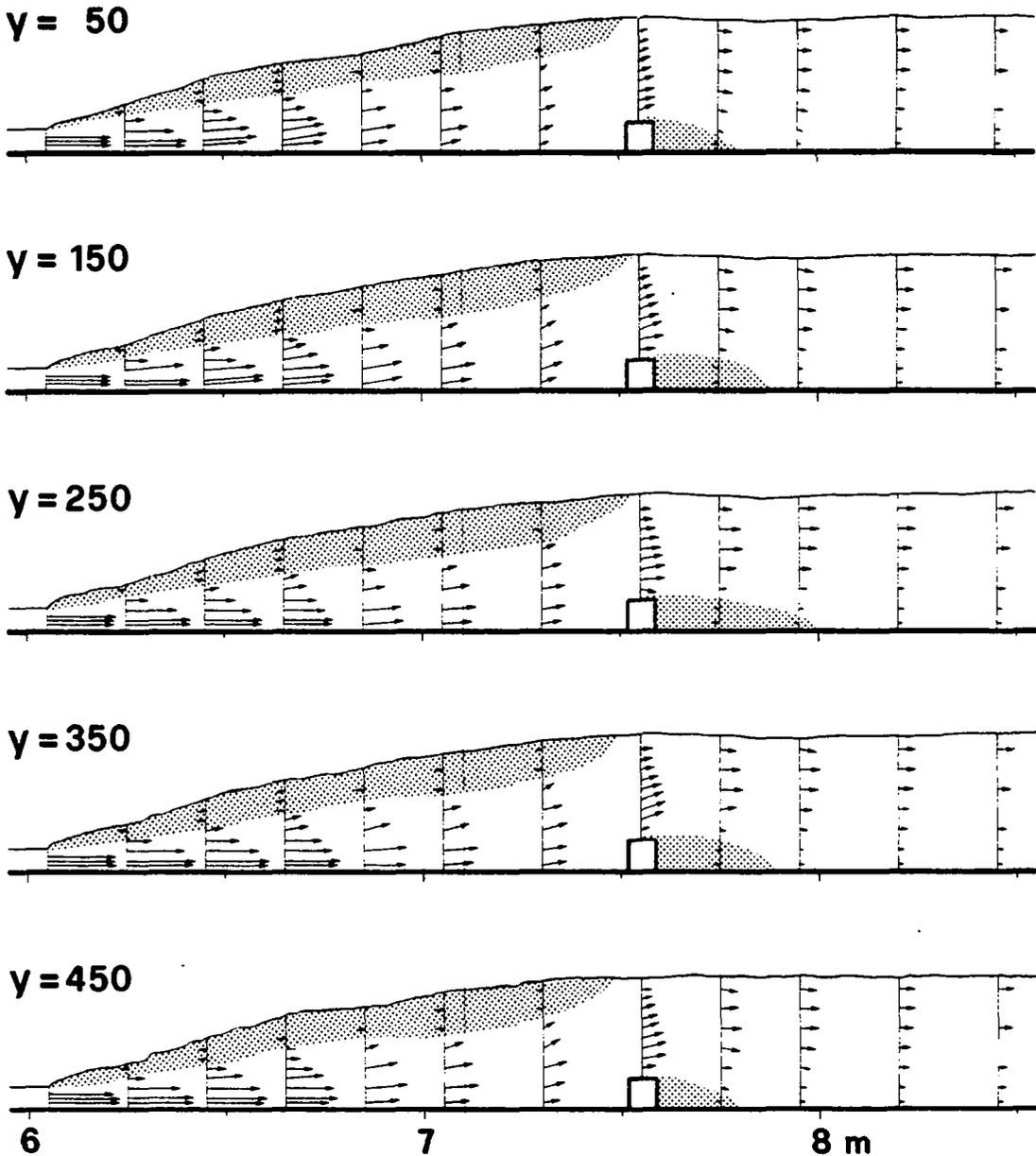


Figure 5.3 : Ressaut forcé type A - distribution des vitesses moyennes avec orientation dans le plan vertical pour 5 sections longitudinales ( $y$  en mm). Zones hachurées : rouleaux de surface et de fond.

dans le plan horizontal. A la Figure 5.3, la répartition des vitesses est donnée pour cinq sections longitudinales réparties sur la largeur du canal. D'une section à l'autre, l'allure générale de la distribution des vitesses est semblable, sauf dans la zone à l'aval du seuil; de faibles différences apparaissent dans les directions verticales et dans les grandeurs : les vitesses diminuent en intensité en se rapprochant des parois du canal. Le rouleau de surface caractérisé par des composantes négatives des vitesses, est similaire pour les 5

sections; ce n'est pas le cas pour le rouleau de fond à l'aval du seuil : il a une longueur maximale au centre et minimale sur les bords. Ceci est confirmé par la Figure 5.5 présentant en détail les directions des lignes de courant dans l'écoulement pour ce type de ressaut dans la zone du seuil.

Au pied amont du ressaut et dans sa première moitié, les vitesses élevées et maximales sont proches du fond. A l'approche du seuil, les vitesses diminuent et celles maximales s'éloignent du fond, se situant au tiers de la profondeur au droit du seuil. Au-delà, les vitesses diminuent encore et celles maximales se rapprochent de la surface, la répartition devenant turbulente et l'écoulement tranquille.

Dans le rouleau de surface, les vitesses ont une valeur presque constante  $V=0.4-0.5$  m/s, et une direction comprise entre l'horizontale et la pente du ressaut (15-35 %).

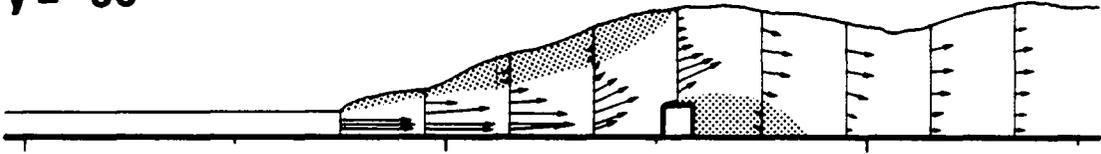
### 5.32 Ressaut forcé type $B_{min}$

Les vitesses pour ce cas ont été présentées globalement au §4.51. La répartition des vitesses est donnée à la Figure 5.4 pour cinq sections longitudinales. D'une section à l'autre, l'allure générale de la distribution des vitesses est semblable; des différences apparaissent quant aux directions et aux intensités, ces dernières diminuant vers les parois du canal à cause du frottement. Le rouleau de surface s'étend du pied du ressaut jusqu'au-delà du seuil; dans les cinq sections, il est pratiquement similaire. Par contre, le rouleau de fond à l'aval du seuil est maximal au centre et diminue vers les bords. La Figure 5.6 montre en détail les directions de l'écoulement dans le ressaut forcé type  $B_{min}$  dans la zone du seuil; le rouleau de fond en forme de coin est plus important que dans le cas précédent du ressaut forcé type A.

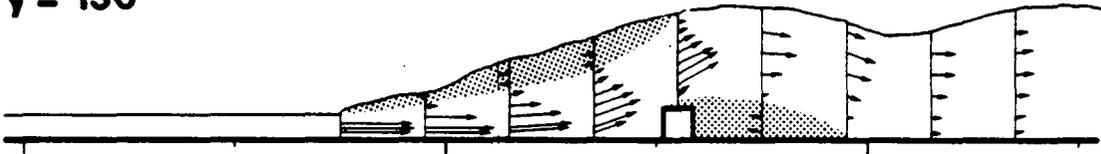
Comme pour le ressaut forcé type A, les vitesses élevées sont tout d'abord près du fond, puis à l'approche du seuil elles s'en éloignent, en s'inclinant de plus en plus. Au droit du seuil, les vitesses les plus élevées se situent environ au tiers de la hauteur, avec une inclinaison maximale. Au-delà,

les lignes de courant plongent en avant, les vitesses les plus élevées étant près de la surface et les directions passant par l'horizontale puis penchées en avant, avant de revenir horizontales sous le deuxième rouleau de surface à l'aval.

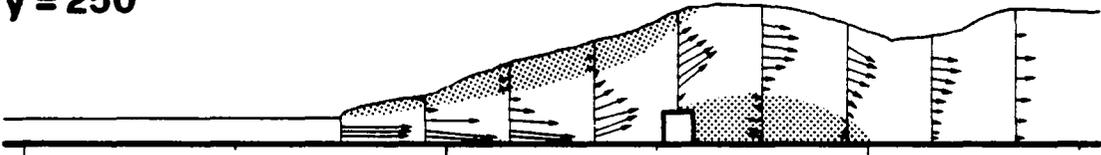
$y = 50$



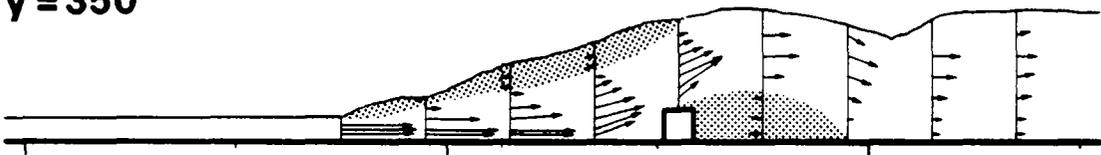
$y = 150$



$y = 250$



$y = 350$



$y = 450$

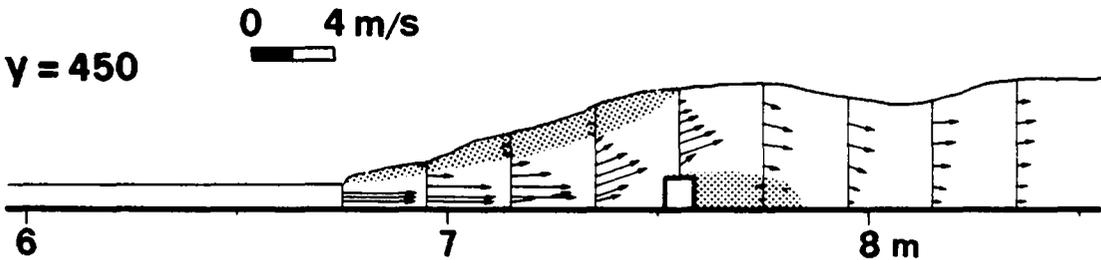


Figure 5.4 : Ressaut forcé type  $B_{min}$  - distribution des vitesses moyennes avec orientation dans le plan vertical pour 5 sections longitudinales ( $y$  en mm). Zones hachurées : rouleaux de surface et de fond.

### 5.33 Comparaison

Le ressaut forcé type A dans la partie à l'amont du seuil est analogue au ressaut classique. La présence du seuil entraîne

la formation du rouleau de fond à l'aval et provoque la courbure des lignes de courant autour de l'obstacle; ceci est aussi valable pour les 2 autres types de ressauts forcés. La distribution des vitesses de la Figure 5.3 fait ressortir d'une part la similarité des différentes sections longitudinales quant aux directions et grandeurs des vitesses, excepté dans la zone du rouleau de fond, et d'autre part la symétrie axiale de l'écoulement pour le rouleau de fond, dont la longueur est maximale au centre et diminue en s'approchant des bords. Ceci est remis en évidence au §5.41.

Dans [40], des profils de vitesses à l'intérieur du ressaut forcé par seuil à paroi mince sont présentés, mais aucune mesure n'a été faite à l'intérieur du rouleau de surface, l'appareillage ne le permettant pas; ils sont ainsi amputés dans leur partie supérieure et ne tiennent pas compte des directions des lignes de courant. Le rouleau de fond est très prononcé et long. Malgré ces différences, l'allure générale des profils est similaire à celle des présents essais.

Pour le ressaut forcé type  $B_{min}$ , une faible diminution de la hauteur d'eau à l'aval engendre une réduction de la longueur du rouleau de surface de moitié par rapport au type A. La Figure 5.4 fait ressortir les mêmes caractéristiques de similarité et de symétrie décrites plus haut. La principale différence due à cette longueur réduite réside dans la grandeur des vitesses qui sont nettement plus élevées à l'approche et autour du seuil. De plus, le courant principal plonge vers l'aval du rouleau de surface, avec une courbure des lignes de courant plus importante.

#### 5.4 DIRECTIONS DES LIGNES DE COURANT

Des différences dans les longueurs de rouleau de fond sont apparues dans les Figures 5.3 et 5.4 entre les sections longitudinales. Alors pour mieux connaître le ressaut forcé par seuil et l'écoulement dans la zone du seuil, les directions des lignes de courant dans le plan horizontal sont mesurées à l'aide de la sonde de direction horizontale, suivant une

grille de points de mesure espacés de 50 mm entre les sections transversales  $x=7.0$  m et  $x=8.15$  m. Cette opération est répétée pour les hauteurs  $z = 15, 50, 85$  et  $120$  mm. Cela représente 200 à 230 points pour chaque hauteur  $z$ . Les résultats sont présentés aux Figures 5.5 (ressaut forcé type A), 5.6 (ressaut forcé type  $B_{\min}$ ) et 5.7 (ressaut forcé type C). Les flèches dessinées représentent uniquement la direction dans le plan horizontal et ne sont donc pas des vecteurs vitesses.

Le ressaut forcé type C est présenté pour être comparé aux types A et  $B_{\min}$  en ce qui concerne les directions des lignes de courant (le présent paragraphe) et les effets de l'érosion (au §5.5). En effet, si les ressauts types A,  $B_{\min}$  et C sont assez similaires extérieurement, leurs effets sur le fond à l'aval du seuil sont sensiblement différents : ceci est mis en évidence par les essais avec lit meuble décrits au §5.5.

#### 5.41 Ressaut forcé type A

##### 1) $z = 15$ mm.

Les lignes de courant initialement parallèles aux parois convergent tout d'abord à l'approche du seuil puis divergent très fortement juste devant et reviennent même en arrière près des bords, soulignant la présence d'un vortex. Au-delà du seuil, les lignes convergent vers l'amont correspondant au rouleau de fond, puis vers l'aval en commençant près des bords et ensuite vers le centre. Les directions négatives (vers l'amont) couvrent une zone deux fois plus grande sur l'axe central du canal qu'à proximité des parois. Plus à l'aval, les filets redeviennent parallèles.

##### 2) $z = 50$ mm.

Les lignes de courant convergent et divergent comme précédemment mais plus à l'amont déjà et de façon moins prononcée; il n'y a plus de retour au pied du seuil. Au-delà, deux grands tourbillons apparaissent tournant en sens contraire l'un de l'autre; les directions divergent près du seuil, puis convergent vers l'amont dans une très petite zone. Plus loin, les lignes convergent vers l'aval, en redevenant parallèles.

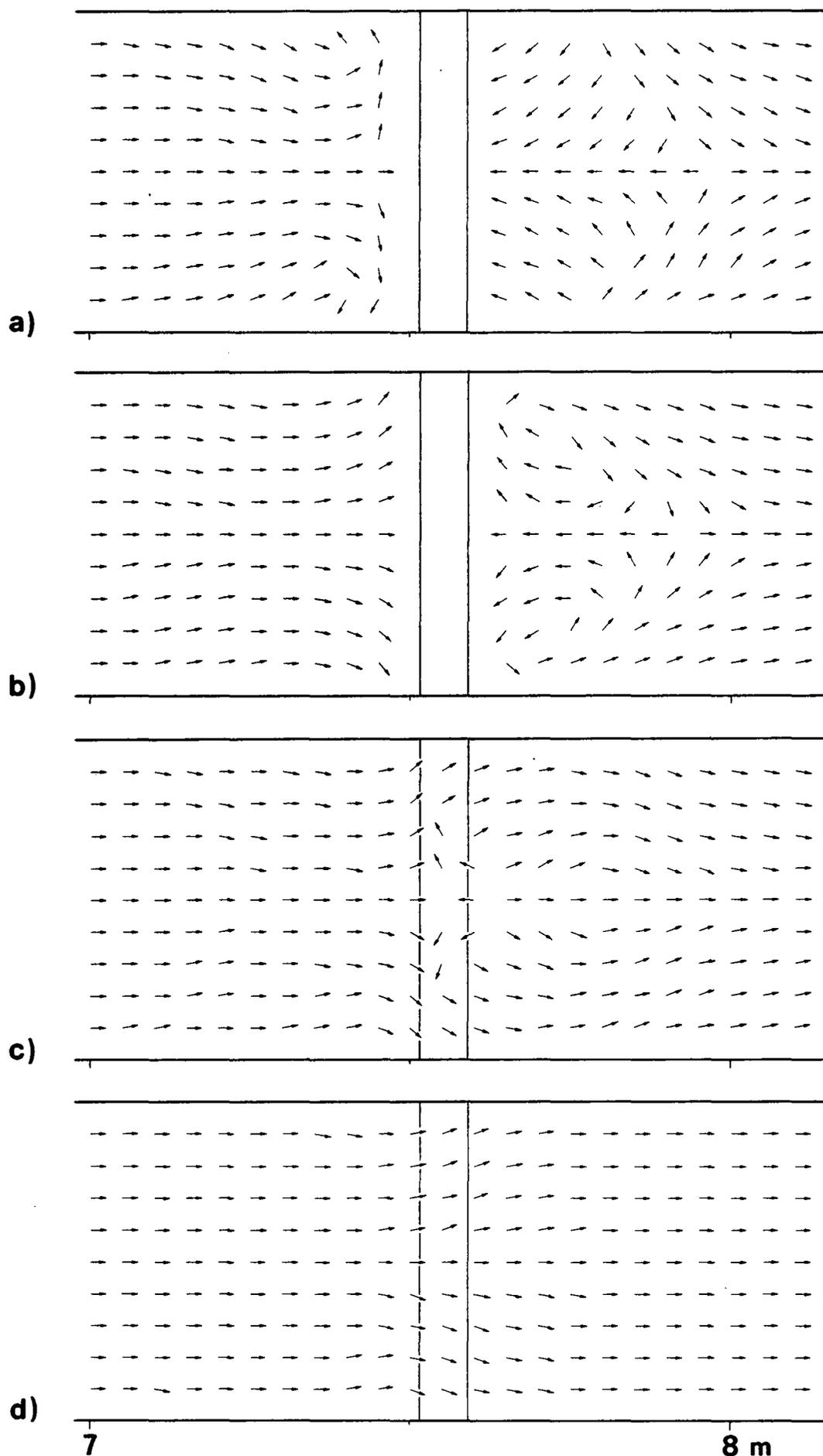


Figure 5.5 : Directions des lignes de courant pour le ressaut forcé type A dans la zone du seuil : a)  $z=15$  mm, b)  $z=50$  mm, 3)  $z=85$  mm et d)  $z=120$  mm.

3)  $z = 85$  mm.

La convergence et la divergence des lignes de courant sont encore atténuées à l'amont du seuil. Sur ce dernier, les directions proches de l'axe sont divergentes vers l'amont et celles près des parois divergentes vers l'aval : on se situe encore au-dessous du courant principal, dans la zone de séparation. Les tourbillons se propagent sur le seuil du centre vers les bords. Au-delà, les lignes de courant divergent légèrement puis convergent vers l'aval pour redevenir parallèles.

4)  $z = 120$  mm.

Les directions des lignes de courant sont pratiquement parallèles partout. Une faible convergence suivie d'une divergence apparaît à l'approche du seuil. La divergence se maintient quelque peu au-delà et disparaît rapidement, les filets redevenant parallèles.

Plus la hauteur  $z$  augmente, moins l'écoulement est perturbé et plus il devient uniforme parallèle aux parois du canal. Les zones dans lesquelles les directions sont négatives (ou à contre-courant) diminuent avec  $z$  croissant. Les zones du rouleau de fond et des tourbillons sont clairement mises en évidence sur la Figure 5.5.

#### 5.42 Ressaut forcé type $B_{\min}$

1)  $z = 15$  mm.

Les lignes de courant sont parallèles aux parois jusqu'à env. 200 mm du seuil, ensuite sur les bords elles dessinent une légère convergence et à env. 100 mm, elles divergent du centre vers l'extérieur. Dans les coins contre le seuil, le courant revient en arrière. Au-delà du seuil, les directions sont à contre-courant sur env. 400 mm, formant deux arcs de cercle à gauche et à droite de la ligne médiane respectivement, tournant en sens contraire en partant des bords. Puis les lignes de courant se retournent dans la direction de l'écoulement, en redevenant parallèles aux parois. La symétrie est conservée de part et d'autre du seuil.

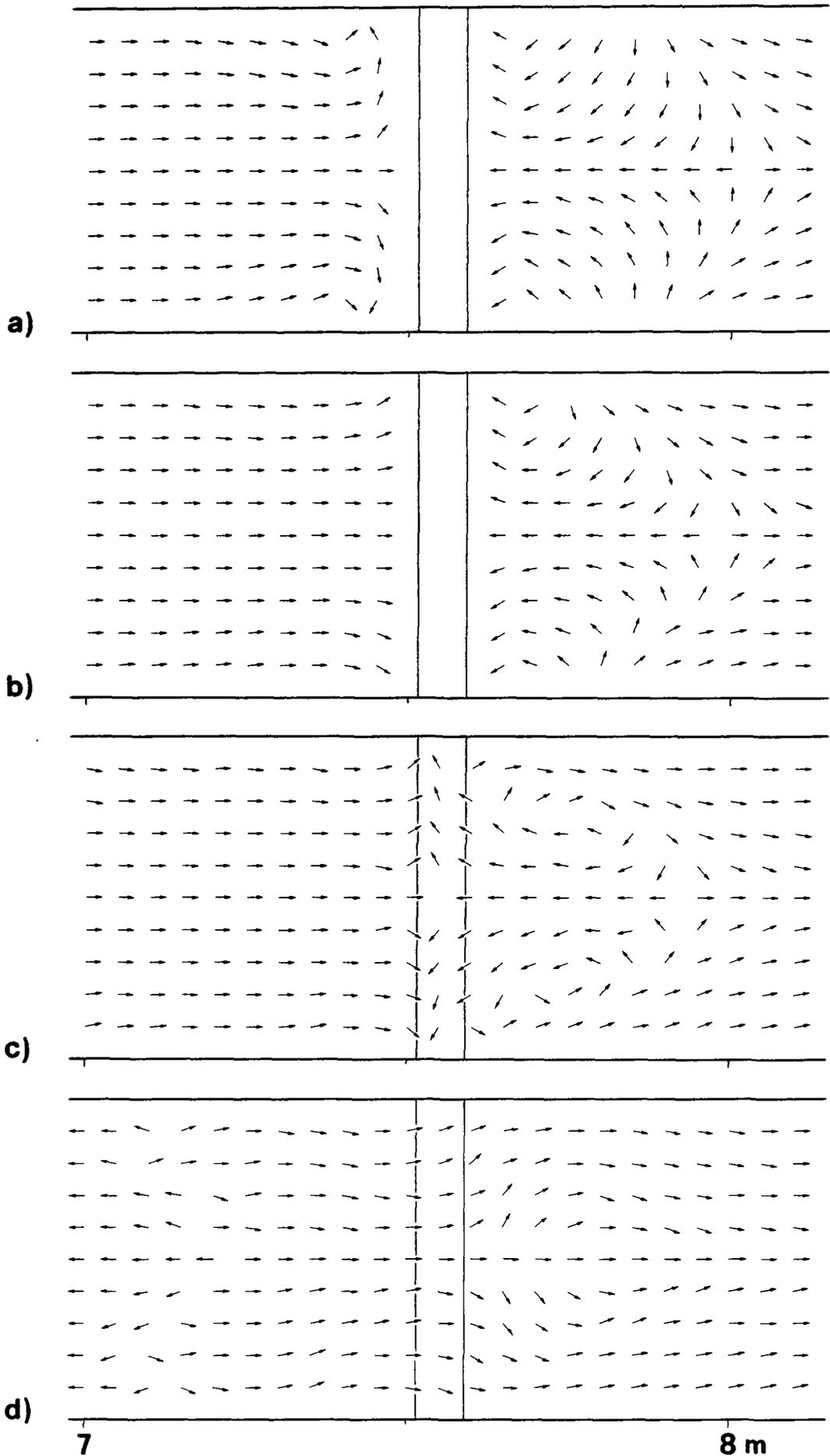


Figure 5.6 : Directions des lignes de courant pour le ressaut forcé type B<sub>min</sub> dans la zone du seuil : a) z=15 mm, b) z=50 mm, c) z=85 mm et d) z=120 mm.

2)  $z = 50$  mm.

Les lignes de courant sont parallèles aux parois jusque devant le seuil où elles divergent légèrement, sans toutefois revenir en arrière, comme précédemment. Au-delà du seuil, le même phénomène de tourbillons que pour  $z=15$  mm apparaît, mais de dimensions réduites et moins prononcé. La zone de directions à contre-courant est en forme de coin massif avec la pointe au centre vers l'aval. Ensuite les lignes de courant s'orientent à nouveau parallèlement aux parois du canal.

3)  $z = 85$  mm.

Le parallélisme des lignes de courant est conservé jusqu'à proximité immédiate du seuil. Juste devant ce dernier, elles divergent. Au-dessus du seuil, la zone de séparation est présente et les lignes de courant divergent mais de l'aval vers l'amont. Cette zone a une forme d'ogive et s'étend au-delà du seuil. Le long des parois, les lignes de courant sont positives. Les tourbillons sont bien marqués à gauche et à droite de la ligne médiane, tournant en sens contraire, celui de gauche dans le sens horaire. Plus loin, l'écoulement reprend le parallélisme aux parois du canal.

4)  $z = 120$  mm.

A environ 500 mm à l'amont du seuil, le rouleau de surface est présent avec ses directions de lignes de courant négatives. Cette zone a la forme d'un triangle dont le sommet est à l'axe du canal vers l'aval. De là jusqu'au seuil, les filets sont presque parallèles aux parois, avec une faible convergence puis divergence à env. 100 mm du seuil. Sur ce dernier et sur env. 200 mm au-delà, les directions divergent d'abord peu, ensuite fortement près de l'axe et enfin à nouveau peu. A l'aval de cette zone sur une courte distance, les lignes de courant convergent vers le centre et redeviennent parallèles aux parois.

#### 5.43 Ressaut forcé type C

1)  $z = 15$  mm.

Les lignes de courant sont tout d'abord parallèles aux parois

du canal. A l'approche du seuil, elles marquent une légère convergence puis une forte divergence du centre vers les bords en revenant même en arrière dans les coins formés par le seuil et les parois. Au-delà de l'obstacle, la zone du rouleau est clairement définie par les directions en sens contraire de l'écoulement principal. Un mouvement de rotation des lignes de courant se dessine des bords vers le centre et retour vers les bords, de façon symétrique par rapport à l'axe médian; à l'aval du rouleau, elles se dirigent des parois vers le centre puis redeviennent rapidement parallèles aux bords.

2)  $z = 50$  mm.

A l'amont du seuil, les directions sont peu affectées par des changements, à l'exception d'une faible divergence devant l'obstacle. A l'aval, la zone du rouleau de fond est raccourcie mais l'allure générale est identique à la précédente. Le courant y tourne des bords vers le centre en revenant vers le seuil. Au-delà l'écoulement est à nouveau parallèle aux parois.

3)  $z = 85$  mm.

Le pied du rouleau se situe à la section  $x=7.0$  m; étant données ses fluctuations de position, l'indication des directions ne commence qu'à la section  $x=7.1$  m. Le rouleau de surface apparaît à contre-courant dans la zone centrale. Jusqu'au seuil, les lignes de courant sont pratiquement parallèles aux parois. Sur le seuil, la divergence est extrême, l'écoulement se fait du centre vers les bords, presque perpendiculairement à l'axe du canal. Ici commence le rouleau de fond à l'aval qui diminue de grandeur avec l'altitude. Les mouvements de rotation sont plus petits et plus brusques. Au-delà de cette zone, les directions des lignes de courant redeviennent parallèles aux parois.

4)  $z = 120$  mm.

La zone du rouleau de surface s'est agrandie avec la cote  $z$  et les lignes de courant sont parallèles aux parois, en sens contraire. L'approche du seuil est assez semblable à la précédente. La divergence au-dessus du seuil est peu prononcée. La

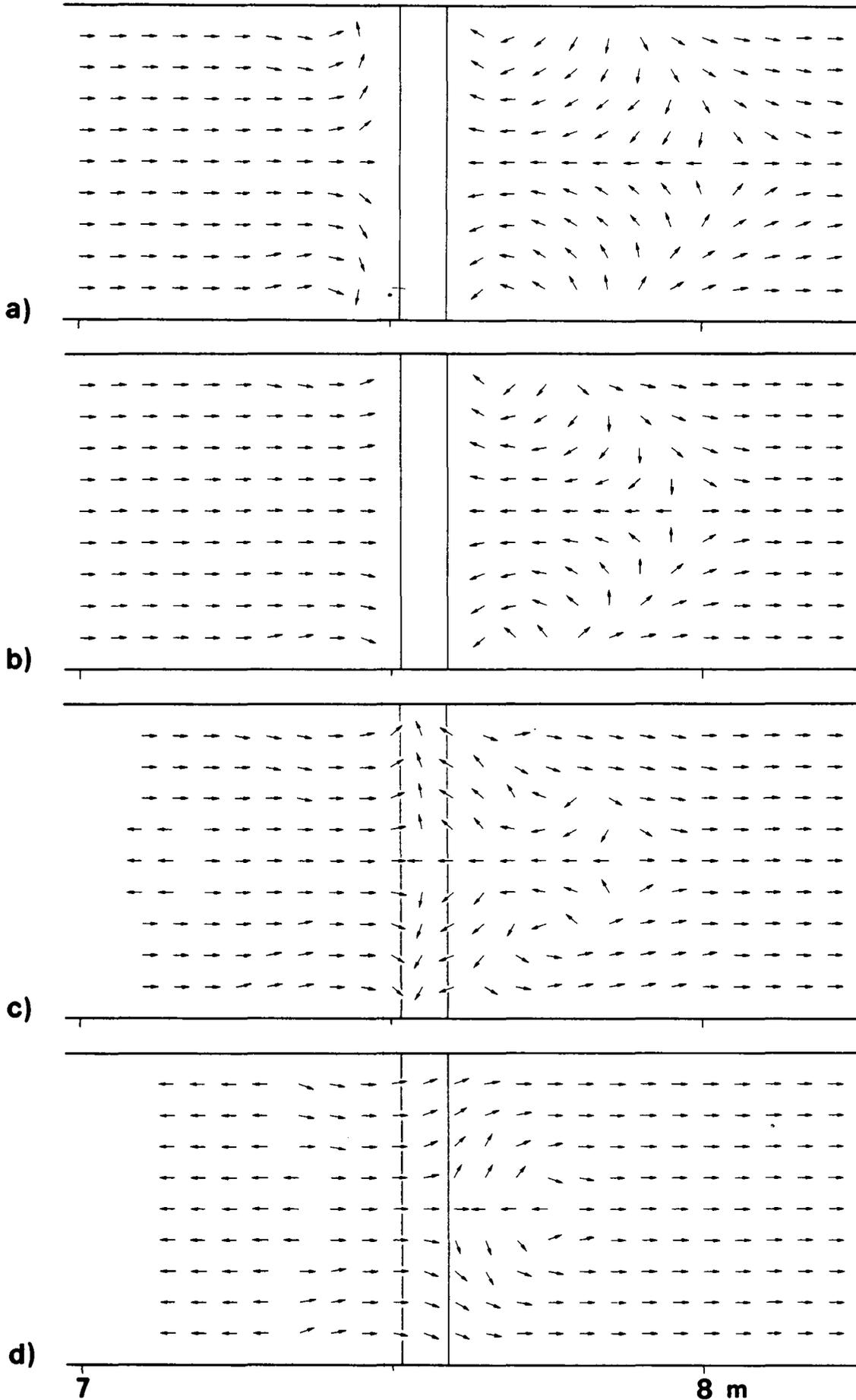


Figure 5.7 : Directions des lignes de courant pour le ressaut forcé type C dans la zone du seuil : a)  $z=15$  mm, b)  $z=50$  mm, c)  $z=85$  mm et d)  $z=120$  mm.

zone du rouleau de fond derrière le seuil est très réduite, l'écoulement contourne cette zone et les lignes de courant sont rapidement parallèles aux parois vers l'aval.

#### 5.44 Axonométrie

Sur la Figure 5.8 sont présentées les axonométries des trois types de ressaut forcé A, B<sub>min</sub> et C pour en visualiser l'écoulement interne dans la zone du rouleau de fond derrière le seuil. Alors que le rouleau de surface à l'amont du seuil peut être considéré globalement comme un phénomène plan, celui de fond est tridimensionnel. Le mouvement général de l'écoulement est similaire pour les trois types, seules les dimensions du rouleau de fond sont différentes d'un type à l'autre. La large flèche de la Figure 5.8 indique le mouvement : près du fond à l'approche du seuil, le courant se dirige du centre vers les bords, passe par dessus le seuil, plonge au-delà du rouleau de fond, pénètre à l'intérieur de ce dernier, revient en arrière des bords vers le centre puis à nouveau vers les bords, sort du rouleau de fond dans la région du seuil et poursuit sa course vers l'aval en revenant vers le centre au-delà du rouleau de fond. Tout ceci se passe de façon symétrique, comme relevé plus haut. Cette description qualitative du mouvement général de l'écoulement dans la région du seuil ne fait toutefois pas mention de toutes les fluctuations inhérentes au phénomène. Sur cette même figure est représentée la topographie du rouleau de fond avec les lignes de niveau équidistantes de 2 mm et les sections longitudinales de mesures.

Au §5.5, une analyse sur l'érosion engendrée par le ressaut forcé par seuil est présentée. Elle illustre le mouvement général de l'écoulement mis en évidence sur la Figure 5.8.

### 5.5 EROSION

#### 5.51 Introduction

Le but de ce paragraphe est de comparer à l'aide de photographies les trois types de ressaut forcé par seuil étudiés du

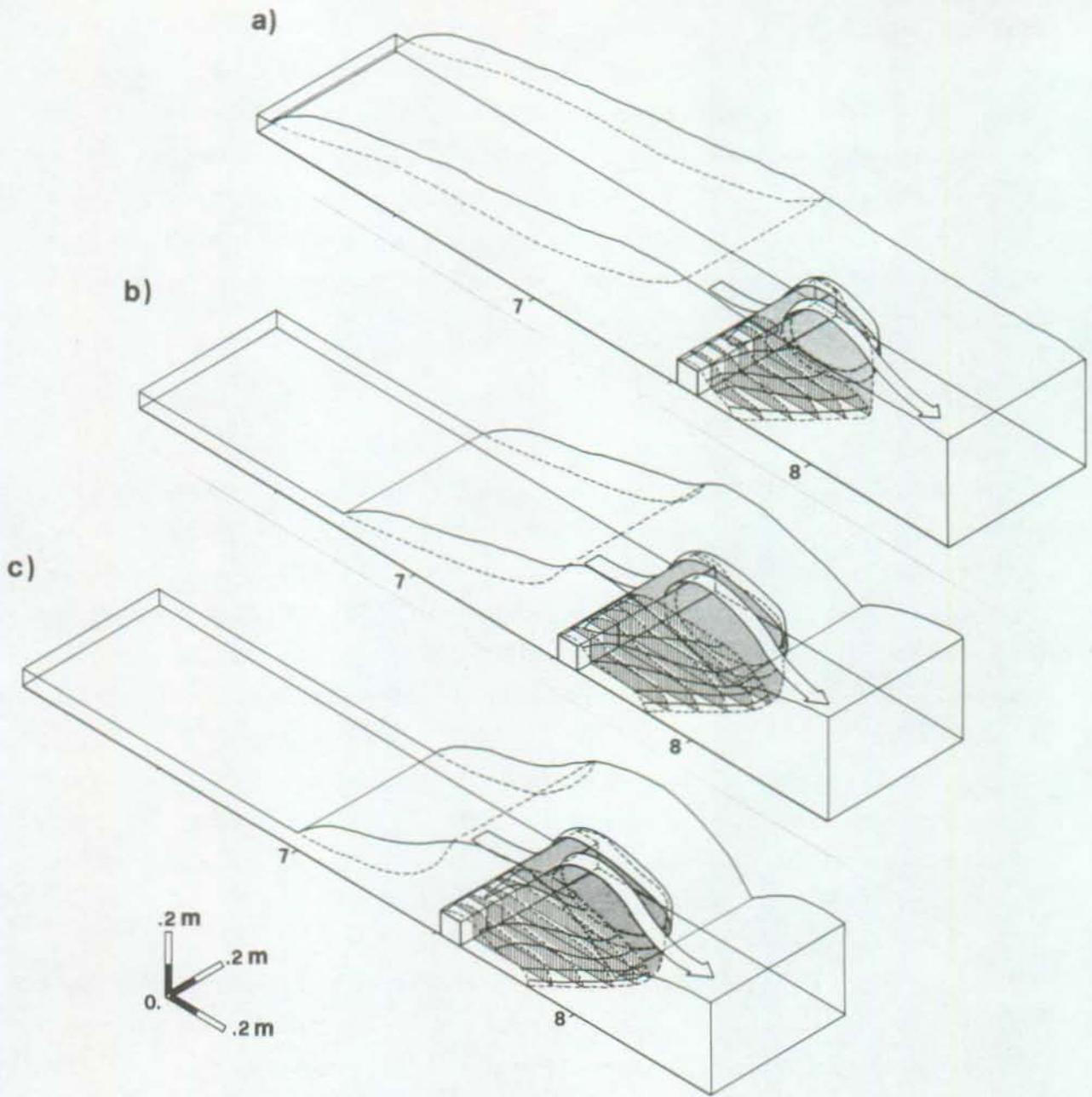


Figure 5.8 : Axonométrie du ressaut forcé : a) type A, b) type  $B_{\min}$  et c) type C. Dans la moitié de droite, topographie avec lignes de niveau équidistantes de 2 mm et sections longitudinales hachurées; dans la moitié de gauche, représentation du mouvement général de l'écoulement dans la zone du rouleau de fond (ce dernier est tramé).

point de vue de l'érosion d'un fond meuble à l'aval du dissipateur. Il s'agit d'une approche qualitative qui permet d'apprécier les effets érosifs de l'eau en mouvement et donne une bonne idée de l'importance de cette érosion. Les résultats qui en découlent permettent de proposer des recommandations de dimensionnement. Pour bien cerner cette érosion dans la réalité, cela nécessite évidemment en plus de bonnes connaissances des conditions hydrologiques et géologiques du cours d'eau considéré.

#### 5.52 Installations et essais

Dans la configuration du canal avec déversoir standard, un faux-plancher de 50 mm de hauteur est mis en place avec à son extrémité aval un seuil de hauteur  $s=75$  mm. Dans une première configuration, une couche de 50 mm de gravier  $\varnothing$  6-15 mm est simplement déposée sur le fond en PVC du canal et non pas fixée d'une manière ou d'une autre, au-delà du seuil et sur une distance d'environ 1.50 m. Dans une deuxième configuration, un élément de faux-plancher d'une longueur correspondant à la longueur du rouleau de fond est disposé à l'aval du seuil et une couche de gravier sur 1 m. Les mêmes essais sont effectués pour les deux configurations.

La procédure est la suivante : le canal est rempli d'eau avec un faible débit. Le gravier est nivelé, le débit est augmenté à la valeur désirée et le niveau  $h_2$  est réglé pour un des cas. Après 5 minutes, le débit est coupé et le canal vidé progressivement, pour permettre de tracer à l'aide de ficelle les lignes de niveau dans la zone où l'érosion s'est produite.

Des essais similaires ont été réalisés avec du sable  $\varnothing$  2 mm, mais cela ne s'est pas avéré aussi probant qu'avec le gravier, car, lors de l'abaissement du niveau d'eau dans le canal, le sable saturé d'eau se comportait comme un liquide et la topographie engendrée par l'érosion disparaissait progressivement. zone du rouleau de fond derrière le seuil est très réduite, l'écoulement contourne cette zone et les lignes de courant sont rapidement parallèles aux parois vers l'aval.

### 5.53 Commentaires

Les photographies des essais d'érosion sont présentées aux Figures 5.9-5.11.

La Figure 5.9 montre des vues latérales de l'écoulement pour les trois types de ressaut dans les deux configurations. Il n'y a pratiquement pas de différence visible quant au profil de surface.

La Figure 5.10 compare la topographie du lit meuble dans les deux configurations, après l'essai, lorsque l'eau a été retirée. La différence pour chaque type de ressaut forcé est frappante. En se référant au §5.4, les photographies des essais pour lit meuble seul confirment la description du mouvement tourbillonnaire dans la zone en aval du seuil. Le jet du courant principal plonge dans les bords derrière le seuil et arrache du matériau au lit; la circulation dans le rouleau de fond le transporte vers le centre et d'aval en amont, d'où le dépôt contre le seuil. Avec la deuxième configuration contenant la protection à l'aval du seuil, les tourbillons du rouleau ont lieu sur l'élément de radier et non plus sur le lit meuble.

La Figure 5.11 présente des vues latérales de la topographie après l'essai. L'influence de la protection de radier à l'aval du seuil y est visible : l'érosion est presque inexistante pour le ressaut forcé type A, peu importante pour le type B<sub>min</sub> et assez élevée pour le type C, alors qu'elle était forte et très forte dans la première configuration sans cette protection. La nécessité de la continuation de la protection du radier au-delà du seuil est ainsi mise en évidence.

Entre les deux configurations, la topographie de la surface érodée est complètement différente à cause de la présence de l'élément de faux-plancher à l'aval du seuil. La comparaison montre l'importance de cet élément : le seuil engendre des tourbillons violents et le lit doit être protégé sur une certaine distance contre ces effets.

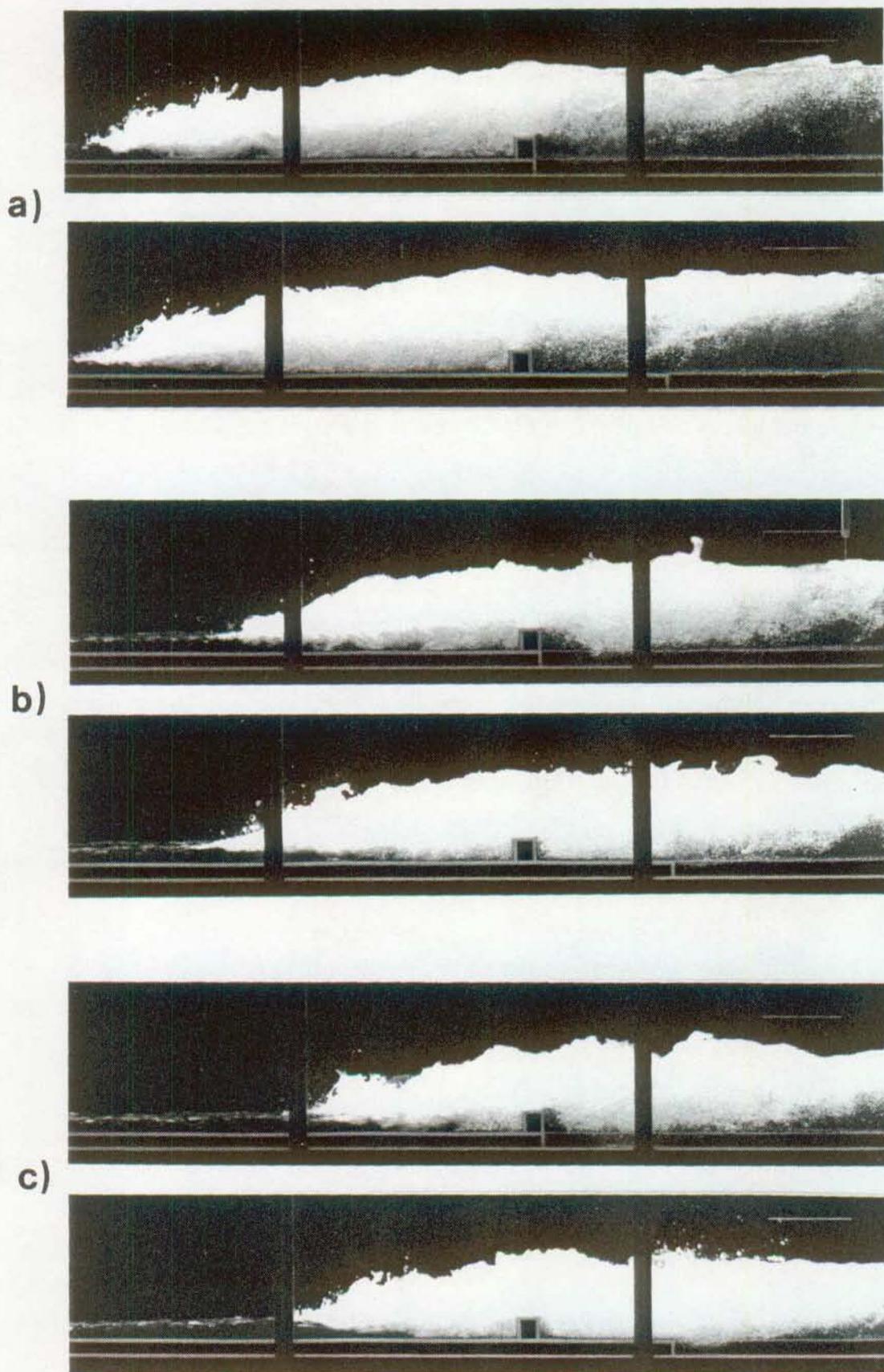
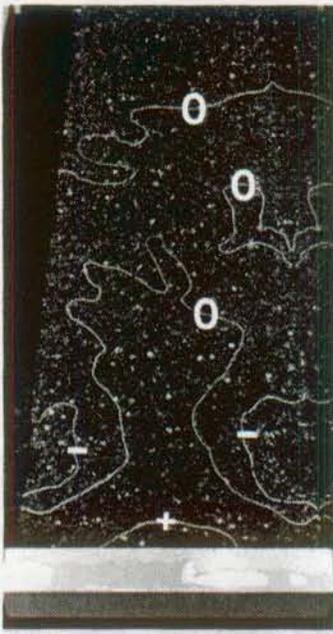
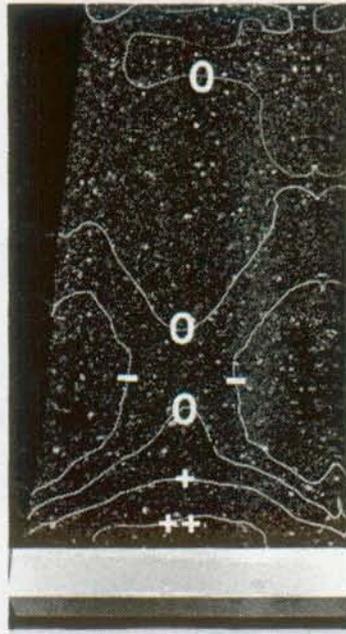


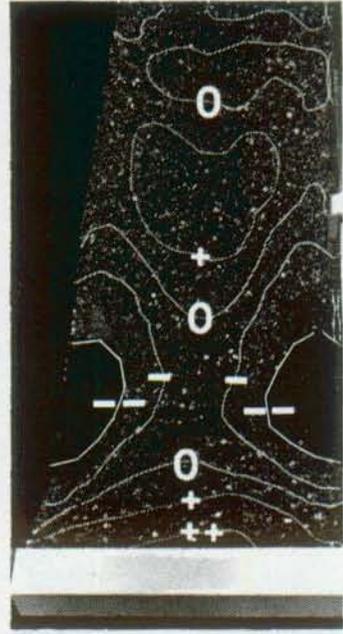
Figure 5.9 : Essais d'érosion, vue latérale de l'écoulement, dans la configuration de lit de gravier seul (dessus) et avec élément de radier à l'aval du seuil (dessous) pour a) ressaut forcé type A, b) ressaut forcé type Bmin et c) ressaut forcé type C.



a)



b)



c)

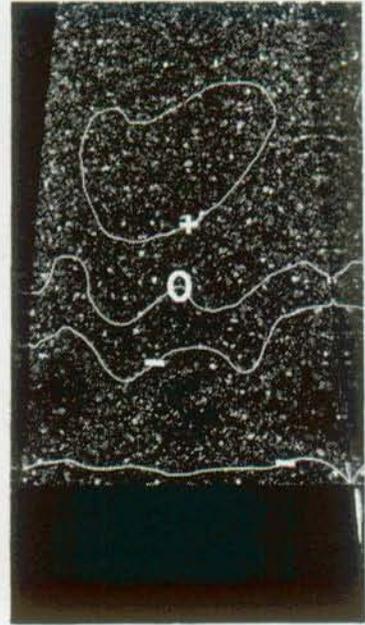
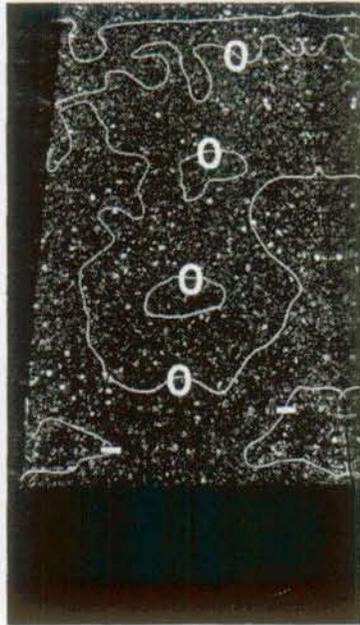
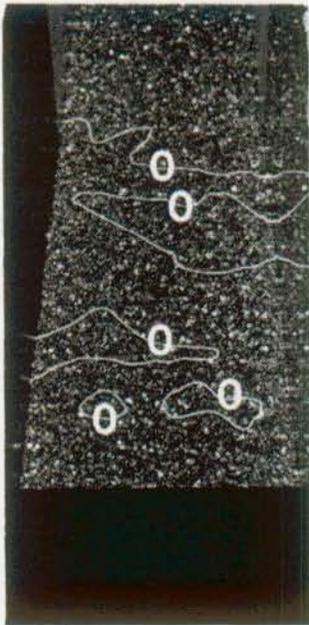


Figure 5.10 : Photographies d'érosion, vue de dessus, dans la configuration de lit de gravier seul (dessus) et avec élément de radier à l'aval du seuil (dessous) pour a) ressaut forcé type A, b) type  $B_{\min}$  et c) type C. Courbes de niveau équidistantes de 25 mm; la courbe -0- correspond au fond normal, "-" indique une dépression, "+" une surélévation.

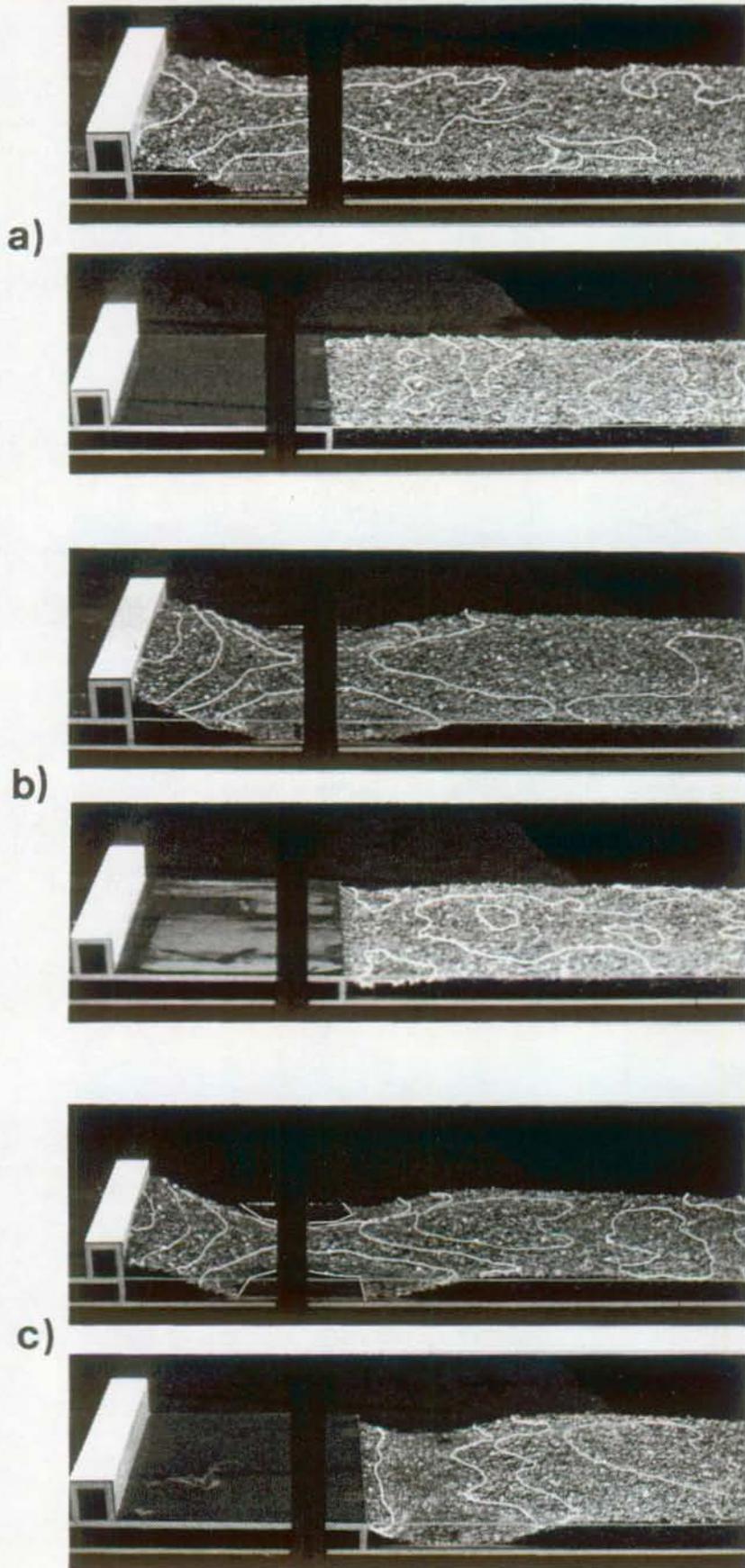


Figure 5.11 : Essais d'érosion, vue latérale de la topographie, avec courbes de niveau, dans la configuration de lit de gravier seul (dessus) et avec élément de radier à l'aval du seuil (dessous) pour a) ressaut forcé type A, b) ressaut forcé type Bmin et c) ressaut forcé type C.

De plus en présence du radier aval, il ressort que le ressaut forcé type A est trop conservatif ou alors pour des rivières à lit facilement érodable, alors que le ressaut forcé type C permet le développement de l'érosion à cause de la forte turbulence et des grandes vitesses près du fond et ne serait admissible que pour les cours d'eau avec un très bon lit. Le cas  $B_{min}$  par contre, avec la protection aval, peut être utilisé pour des lits peu érodables. Le ressaut forcé type B (non présenté ici, mais se situant entre les types A et  $B_{min}$ ) se dessine comme solution intermédiaire.

En comparant les photographies à la Fig. 5.8, les zones d'érosion constatées correspondent aux régions à forte turbulence du rouleau de fond. Aucune mesure de répartition de turbulence n'a été effectuée, mais celle-ci peut être visualisée sur les photographies : elle est très forte là où la turbulence est la plus élevée, i.e. à l'extrémité du rouleau de fond. C'est là que l'érosion commence : le matériau est remué d'avant en arrière et à un certain moment il est emporté par le courant. La Figure 5.12 illustre schématiquement cet effet. Par contre, ce qui ne transparait sur aucune figure, c'est la répartition des vitesses (et leurs fluctuations temporelles) et son influence sur l'érosion. Pour le ressaut forcé type C, les vitesses deviennent élevées près du fond et exercent leur effet érosif.

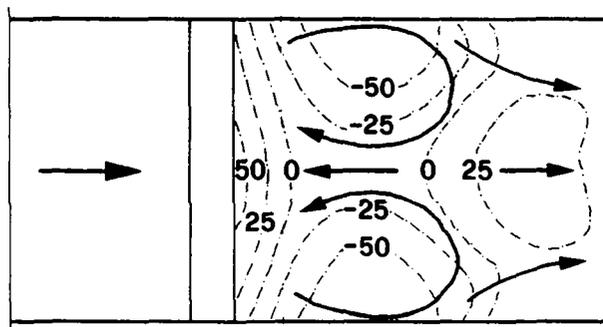


Figure 5.12 : Schéma d'explication du processus d'érosion d'un fond meuble à l'aval du seuil. (-.-) Topographie correspondant au ressaut forcé type C. Courbes de niveau équidistantes de 25 mm.

## 5.6 REPARTITION DES PRESSIONS

La répartition des pressions sur le fond est donnée au §4.52. Dans le présent paragraphe, les pressions statique et dynamique mesurées à l'aide du tube Prandtl sont présentées pour les ressauts forcés par seuil types A et B<sub>min</sub>. La sonde est positionnée dans la direction des lignes de courant, afin d'obtenir la valeur correcte de la charge (ou pression dynamique). Pour la pression statique, ce positionnement n'a théoriquement aucune influence car elle est indépendante de la direction; mais pratiquement, à cause de l'instrument de mesure, il est important de conserver la direction pour que la prise de pression statique soit perpendiculaire au sens de l'écoulement, même si une certaine marge existe (cf. §3.38). Sur les figures ci-après, les pressions statiques et dynamiques sont représentées axialement, pour des raisons graphiques; certains points font défaut dans la zone de l'écoulement à forte courbure à l'aval du seuil : cela provient de l'impossibilité matérielle d'effectuer les mesures, le positionnement de la sonde étant irréalisable dans ces cas.

### 5.61 Ressaut forcé type A

La répartition des pressions statiques est donnée à la Figure 5.13a) pour le ressaut forcé type A, la pression sur le fond servant de référence. Au pied du ressaut, cette distribution est hydrostatique; à l'intérieur du rouleau amont, elle y est inférieure à cause de la grande présence d'air dans l'écoulement, ce qui modifie le poids volumique du fluide. Au-dessus du seuil, la courbure des lignes de courant entraîne une répartition particulière des pressions : celles-ci augmentent d'une part avec la profondeur mais diminuent d'autre part avec la courbure des lignes de courant, pouvant provoquer des sous-pressions. Au-delà du seuil, la distribution des pressions redevient hydrostatique.

La distribution axiale des pressions dynamiques est indiquée à la Fig. 5.13b). Dans la zone du pied du ressaut, elle présente un fort gradient de diminution avec la hauteur; ceci signifie que la perte de charge y est très importante, alors qu'à l'a-

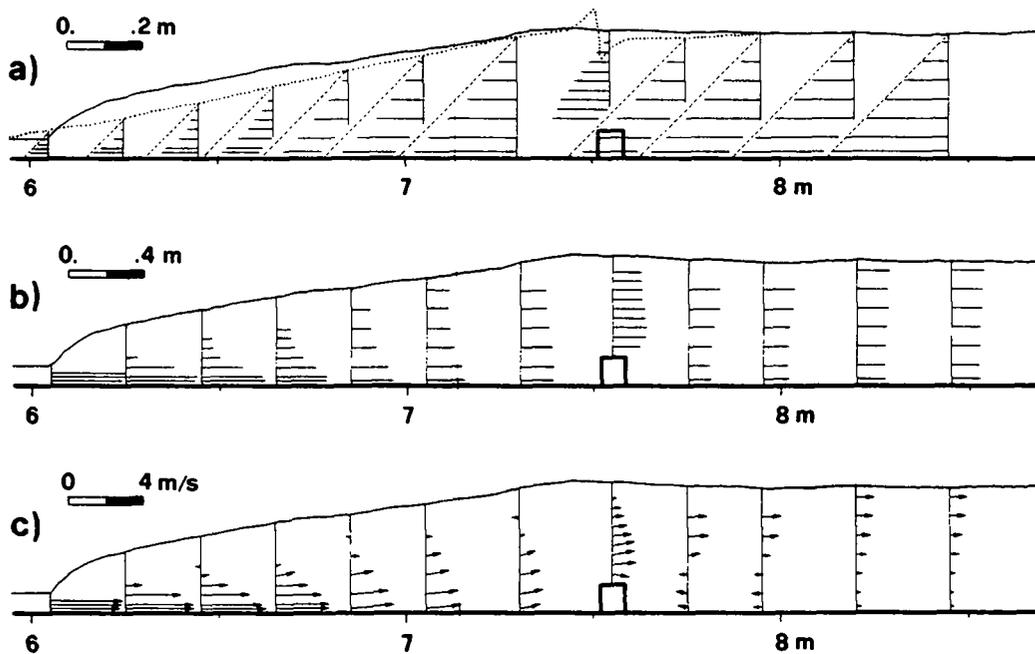


Figure 5.13 : Ressaut forcé type A : a) répartition des pressions, (...) pression sur le fond, (---) répartition hydrostatique correspondant à la pression sur le fond; b) répartition des pressions dynamiques; c) distribution correspondante des vitesses.

val, le gradient est très faible, voire presque nul, et la perte de charge  $y$  est insignifiante. Cela a été montré par [56] pour le ressaut classique.

Sur la Figure 5.13c) sont représentées les vitesses en direction longitudinale et correspondent à la différence entre les pressions statique et dynamique. Ces valeurs sont légèrement supérieures à celles obtenues avec le moulinet et, en quelques rares points, la direction est inversée.

La plus grande part de la perte de charge a donc lieu dans la zone du pied du ressaut; au-delà elle tend à se stabiliser. A l'aval du seuil, l'écoulement est pratiquement uniforme. Le maximum de la vitesse se trouve près de la surface libre.

### 5.62 Ressaut forcé type $B_{min}$

La Figure 5.14a) présente la répartition des pressions statiques du ressaut forcé type  $B_{min}$ , et la pression sur le fond. De part et d'autre du ressaut, la distribution est hydrostatique. A l'intérieur du rouleau de surface amont, la grande présence d'air entraîne une modification de la répartition : la pression croît moins fort dans la couche supérieure de l'écoulement (correspondant environ à la moitié de la hauteur d'eau); dans la partie inférieure comprenant moins d'air, la pression croît pratiquement de façon hydrostatique. Sur le fond, une pression moindre de celle hydrostatique est ainsi obtenue.

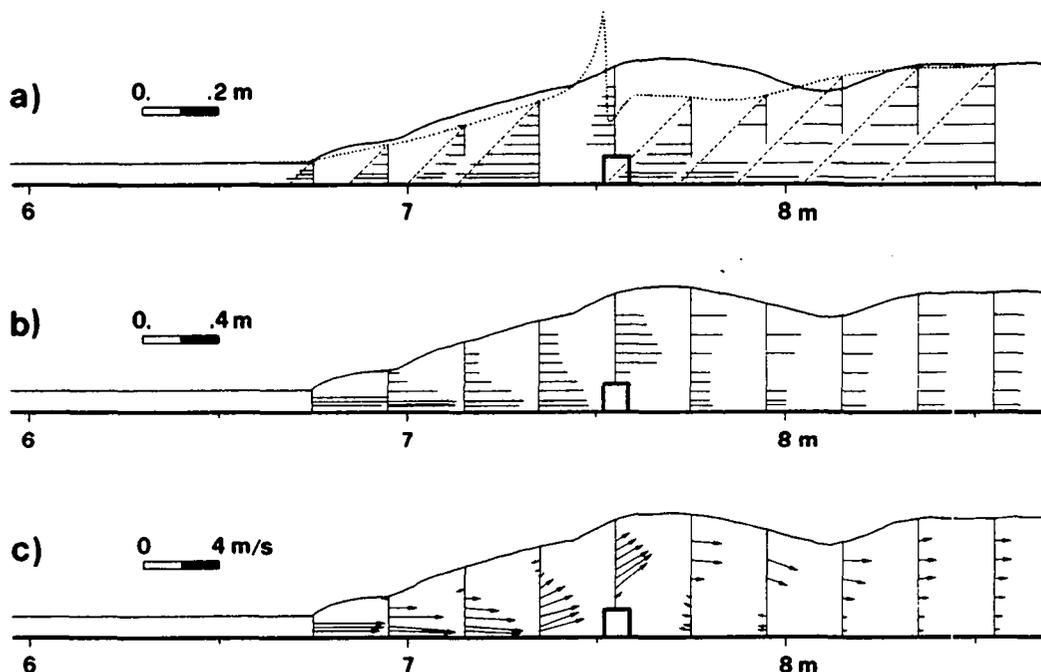


Figure 5.14 : Ressaut forcé type  $B_{min}$  : a) répartition des pressions et (...) pression sur le fond, (---) répartition hydrostatique correspondant à la pression sur le fond; b) répartition des pressions dynamiques; c) distribution correspondante des vitesses.

Au droit du seuil, la distribution des pressions a la forme d'un -S- aplati : la pression croît sur un premier tronçon, puis décroît légèrement et enfin croît à nouveau près du seuil; les lignes de courant sont très inclinées dans cette

section. A l'aval du seuil, la quantité d'air contenu dans l'eau diminue et la pression redevient rapidement hydrostatique.

La distribution des pressions dynamiques est donnée à la Figure 5.14b); comme pour le ressaut forcé type A, elle présente un fort gradient dans la zone du pied du ressaut indiquant une importante perte de charge. Le seuil provoque une inversion de gradient, parce qu'il dirige les grandes vitesses de l'écoulement vers le haut. A l'aval est engendrée une uniformisation de la répartition de la charge, le gradient tendant à devenir nul.

Sur la Figure 5.14c) est représentée la distribution des vitesses obtenues à partir de la différence des pressions statiques et dynamiques, correspondant globalement à celle mesurée avec le moulinet présentée au §4.51.

### 5.63 Pressions sur le seuil

Pour les pressions sur les faces verticales du seuil, les mesures correspondant au cas représentatif du ressaut forcé par seuil présenté jusqu'ici au chapitre 5, font défaut. En remplacement, des mesures sont effectuées dans la configuration du canal avec vanne plane et les résultats sont donnés ci-après à titre indicatif comme complément d'information.

La Figure 5.15 présente un cas typique de répartition de la pression sur les faces verticales d'un seuil pour les types de ressaut forcé par seuil. En passant du ressaut type A à celui type  $B_{min}$ , cette pression augmente sur la face amont et diminue sur la face aval. La pression sur la face amont est plus importante sur les bords qu'à l'axe; sa répartition est presque uniforme pour les trois types de ressaut. Elle est aussi plus élevée que celle sur la face aval. La pression sur la face aval a une distribution hydrostatique, avec un léger décalage par rapport à la pression correspondant à la hauteur d'eau aval  $h_2$ . Il n'y a pas de différence entre les valeurs de la pression à l'axe et celles sur les bords.

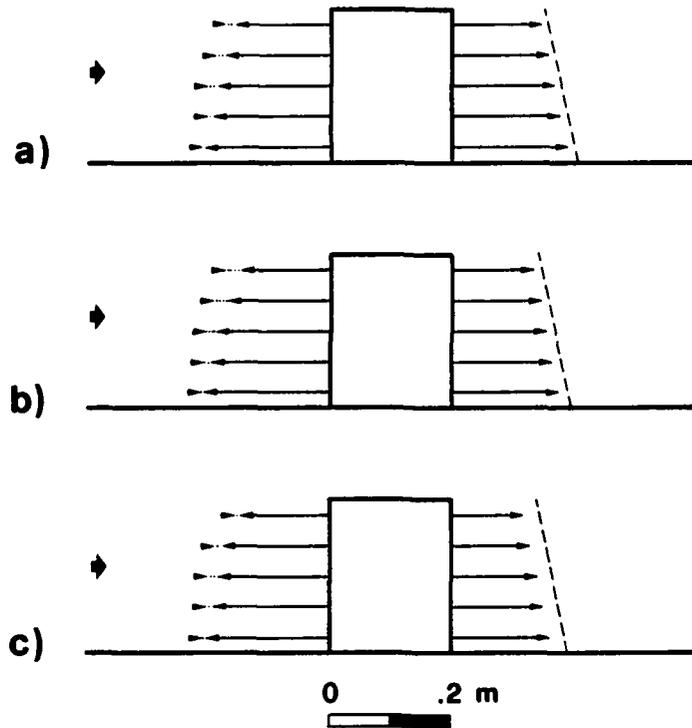


Figure 5.15 : Cas typique de répartition de la pression sur les faces amont et aval du seuil, avec  $s=50$  mm,  $F_1=6.5$ ,  $h_1=25$  mm et  $S=2$ . a) ressaut forcé type A ( $h_2=206$  mm), b) ressaut forcé type B ( $h_2=196$  mm), c) ressaut forcé type  $B_{min}$  ( $h_2=190$  mm). ( $\leftarrow$ ) pression à l'axe, ( $\rightarrow$ ) pression sur les bords, (--) répartition hydrostatique correspondant à  $h_2$ .

#### 5.64 Remarques sur les pressions

Les remarques suivantes peuvent être faites sur la répartition des pressions dans le ressaut forcé par seuil :

1) la distribution des pressions statiques dans le ressaut forcé par seuil, à l'exception des zones avec forte courbure des lignes de courant, correspond approximativement à celle hydrostatique relative à la pression mesurée sur le fond;

2) la répartition des pressions dynamiques accuse un fort gradient dans la zone du pied du ressaut, i.e. la charge subit une brusque diminution dans le premier tronçon du ressaut et non pas autour du seuil où la pression est maximale.

3) la pression sur la face amont du seuil a une distribution presque uniforme; elle est plus élevée sur les bords qu'à l'axe. De plus, elle augmente lorsque le rouleau de surface diminue. La pression sur la face aval a une répartition hydrostatique inférieure à celle correspondant à la hauteur d'eau aval  $h_2$ ; il n'y pas de différence entre la pression à l'axe et sur les bords.

## 5.7 CONCLUSION

Les études détaillées du ressaut forcé par seuil pour  $F_1 = 5.23$  et  $s=75$  mm, ont conduit aux principaux résultats suivants :

### 1) profils de surface

Les différences des profils de surface dans des sections longitudinales sont plus faibles que les variations mêmes de niveau : le profil axial avec fluctuations suffit donc pour représenter un cas donné. Les fluctuations sont d'autant plus grandes que le ressaut est court, et elles sont plus importantes dans la zone du pied du ressaut que dans celle du seuil.

### 2) vitesses

Les répartitions des vitesses sont similaires dans les différentes sections longitudinales pour un même type. Plus le ressaut est court, plus les vitesses sont élevées à l'approche du seuil, plus les directions des lignes de courant sont inclinées dans le plan vertical et plus les vitesses restent importantes près du fond à l'aval du rouleau de fond derrière le seuil. Ce rouleau décroît en grandeur du centre vers les bords et est d'autant plus bombé que le ressaut est court.

### 3) directions

La distribution des directions des lignes de courant dans la zone du seuil met en évidence le mouvement tourbillonnaire de l'écoulement et en facilite la compréhension. Le rouleau de fond doit être traité comme un phénomène spatial, mais son étendue étant maximale à l'axe, une première analyse dans cette section peut suffire comme base de dimensionnement.

#### 4) érosion

Les photographies montrent clairement l'effet de la présence d'une protection du fond à l'aval du seuil contre l'érosion par l'eau. Celle-ci ne disparaît pas complètement mais est fortement diminuée. Il s'avère donc important de protéger le bassin amortisseur au-delà de l'obstacle sur une distance correspondant à la longueur du rouleau de fond, celui-ci créant une zone de forte turbulence. Les photographies indiquent encore que, dans la configuration avec protection à l'aval, 1) le ressaut forcé type A provoque très peu d'érosion sur le lit du cours d'eau, 2) le ressaut forcé type  $B_{min}$  engendre le creusement de fosses d'érosion juste après le radier protégé, sur les bords du lit, 3) le ressaut forcé type C creuse pratiquement au pied aval du radier une tranchée transversale, pouvant compromettre la sécurité de l'ouvrage. Ceci justifie le critère de choix énoncé au §4.6 concernant les effets de l'écoulement sur le fond à l'aval du seuil.

#### 5) pressions

La répartition des pressions statiques peut être considérée en première approximation comme hydrostatique par rapport à la pression sur le fond, sauf dans les zones à forte courbure de l'écoulement (e.g. sur le seuil). La distribution des pressions dynamiques fait ressortir que la majeure partie de la perte de charge, donc de la dissipation d'énergie, a lieu dans la zone du pied du ressaut et non pas autour du seuil, celui-ci n'étant qu'un moyen pour provoquer le ressaut et le localiser en un endroit précis.

Les profils de vitesses apportent une lumière sur le ressaut forcé par seuil et surtout la nouveauté par rapport à la littérature existante est la mise en évidence du rouleau de fond et son analyse. Le mouvement tourbillonnaire dans cette zone est expliqué à partir des mesures des directions des lignes de courant et illustré à l'aide des photographies d'essais d'érosion. La compréhension du ressaut forcé par seuil comme phénomène hydraulique devient alors possible.

Le chapitre 6 traitera des applications pratiques de dimensionnement de bassins amortisseurs avec seuil.

RESSAUT HYDRAULIQUE  
FORCE PAR SEUIL

CHAPITRE 6

PRINCIPES  
DE DIMENSIONNEMENT



C H A P I T R E 6

PRINCIPES DE DIMENSIONNEMENT

6.1 INTRODUCTION

6.11 Généralités

Les chapitres 4 et 5 ont essayé d'approfondir la connaissance du ressaut forcé par seuil en tant que phénomène hydraulique, aussi bien qualitativement que quantitativement, par l'expérimentation en laboratoire. Dans le chapitre 6, une base de dimensionnement des bassins amortisseurs avec seuil est présentée.

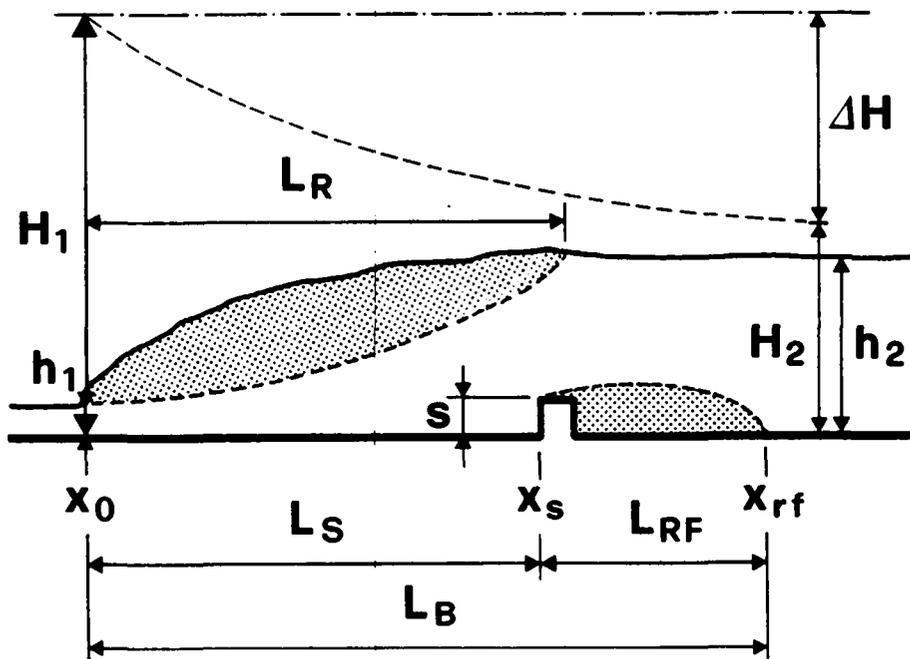


Figure 6.1 : Ressaut forcé par seuil : définition des termes.  $H_1$  charge amont,  $H_2$  charge aval,  $\Delta H$  perte de charge.  $h_1$  hauteur d'eau amont,  $h_2$  hauteur d'eau aval,  $s$  hauteur du seuil,  $x_0$  position du pied du ressaut,  $x_s$  position du seuil,  $x_{rf}$  position de la fin du rouleau de fond à l'aval,  $L_R$  longueur du rouleau de surface,  $L_S$  position du seuil par rapport au pied du ressaut,  $L_{RF}$  longueur du rouleau de fond aval,  $L_B$  distance entre le pied du ressaut et la fin du rouleau aval.

Dans la conception d'un bassin dissipateur, les hauteurs d'eau, les dimensions du bassin et du seuil, et le rendement de l'ouvrage sont d'un intérêt particulier pour que la dissipation d'énergie ait bien lieu à l'intérieur du bassin et que la zone à l'aval de celui-ci soit suffisamment protégée contre les effets érosifs de l'eau. Ce chapitre tente d'apporter ces éléments, sous forme de figures et d'équations exprimant le rapport des hauteurs conjuguées, la longueur du bassin, la position du seuil et l'efficacité relative en fonction du nombre  $F_1$  et de la hauteur relative du seuil  $S$ , pour les trois types de ressaut forcé par seuil : types A, B et B<sub>min</sub>. La Figure 6.1 présente les différents termes intervenant dans l'analyse; cette figure diffère de celle du §2.22 : elle a été complétée pour le rouleau de fond à l'aval du seuil, comme mis en évidence au chapitre 5.

Un exemple de dimensionnement est exposé à la fin du chapitre.

#### 6.12 Procédure des essais

Dans le but d'augmenter le nombre de Froude et de pouvoir simultanément contrôler la hauteur d'eau amont  $h_1$ , la vanne plane décrite au §3.27 est installée dans la partie horizontale du canal. La procédure des essais est la même que celle décrite pour le ressaut classique au §3.62, mais avec un seuil mis en place. Les grandeurs suivantes sont relevées : charge à l'amont de la vanne  $H_0$ , hauteur d'eau aval  $h_2$ , position du pied du ressaut  $x_0$  et position de la fin du rouleau de fond  $x_{rf}$ . Les essais sont répétés pour les seuils de hauteur  $s=12.5, 25, 38, 50$  et  $75$  mm, dont l'emplacement est fixe.

La hauteur d'eau amont  $\bar{h}_1$ , correspondant à cette procédure, est calculée à partir de la charge  $H_0$  et du débit, selon l'équation de Bernoulli. A partir de cette valeur, le nombre de Froude  $\bar{F}_1$ , le rapport des hauteurs conjuguées  $\bar{Y}$  et la hauteur relative du seuil  $\bar{S}$  sont calculés.  $\bar{h}_1$  correspond à la hauteur d'eau juste à l'aval de la vanne, à une distance d'environ deux fois l'ouverture de la vanne. Entre cette

dernière et le pied du ressaut subsiste une certaine distance le long de laquelle la hauteur d'eau change suite au frottement sur le fond et les parois, mais ce frottement est négligé dans une première approche.

### 6.13 Essais préliminaires

Les résultats pour le ressaut forcé type A sont présentés à la Figure 6.2, par la représentation habituelle  $\bar{Y} = f(\bar{F}_1, \bar{S})$ . Pour les différents  $\bar{S}$ , les points semblent s'aligner sur des courbes parallèles, s'éloignant de la courbe de Bélanger avec  $\bar{S}$  grandissant. Une singularité apparaît toutefois : certains points pour  $\bar{S}=4$  sont plus près de la courbe de Bélanger que ceux pour  $\bar{S}=2$  ! D'où cela peut-il provenir ? En recherchant la cause dans les feuilles de mesures, il ressort que la position du pied du ressaut a été changée, ce dernier se trouvant plus rapproché de la vanne pour les essais incriminés que pour les autres. Ceci signifie que l'effet du frottement entre la vanne et le pied du ressaut est loin d'être négligeable, spécialement pour les hauteurs d'eau  $\bar{h}_1$  petites. Dans les essais discutés,  $\bar{h}_1$  a varié entre 6 et 38 mm, et  $s$  entre 12.5 et 75 mm. Le nombre de Froude  $\bar{F}_1$  correspondant à  $\bar{h}_1$  a varié entre 5 et 13.

Deux possibilités se présentent pour la détermination appropriée de la hauteur d'eau  $h_1$  au pied du ressaut : 1) calculer la courbe de remous entre la vanne et le pied du ressaut ; 2) refaire des mesures en déplaçant la vanne au pied du ressaut pour chaque essai (la position du seuil est fixe à cause de l'emplacement des trous de fixation dans le canal).

La première solution a été testée, mais n'a pas donné de résultats satisfaisants. Par conséquent, la manière la plus sûre a été adoptée. En plaçant impérativement le pied du ressaut le plus près possible de la vanne, les problèmes rencontrés précédemment ont été surmontés ! Cette façon de faire a déjà été adoptée pour le ressaut classique au §3.6, où l'effet de frottement a été mis en évidence.

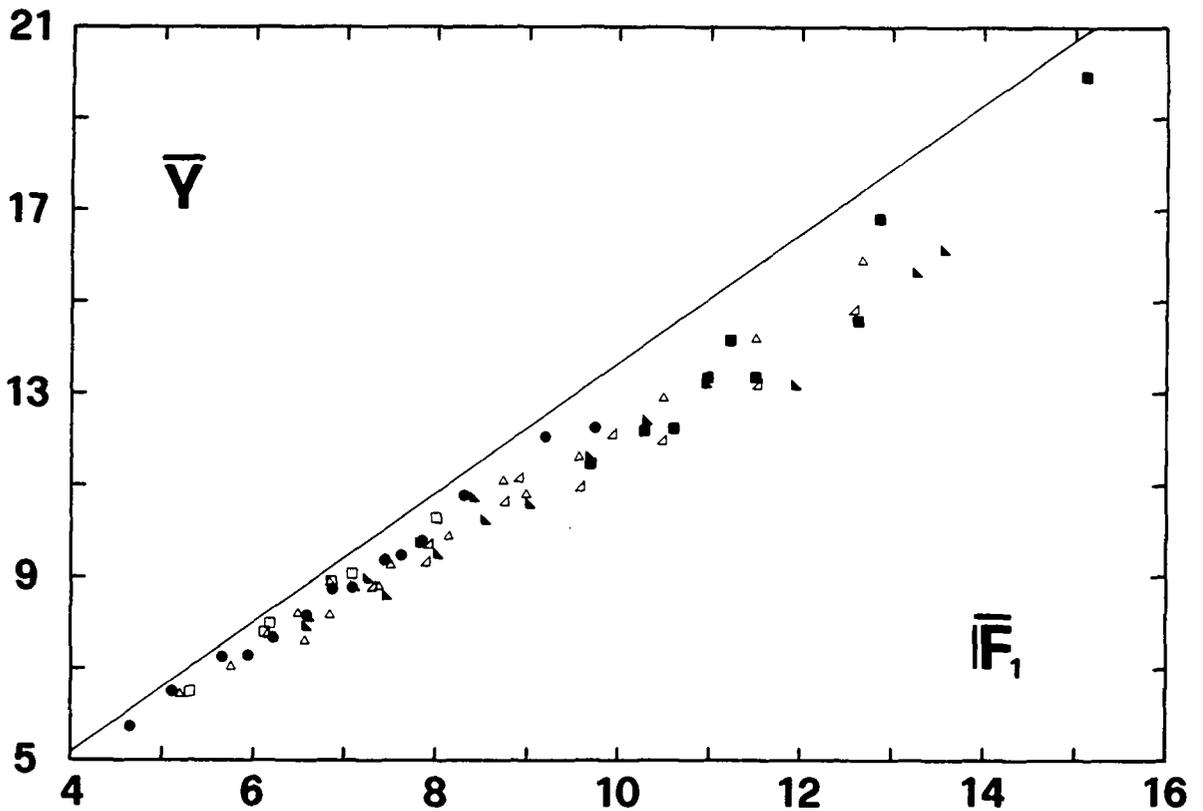


Figure 6.2 : Ressaut forcé type A; rapport des hauteurs conjuguées  $Y=f(\bar{F}_1, \bar{S})$ , mesures brutes. Notations pour  $\bar{S}=s/\bar{h}_1$  : (—) 0 courbe de Bélanger, ( $\square$ ) 0.5, ( $\bullet$ ) 1, ( $\triangle$ ) 1.5, ( $\blacktriangle$ ) 2, ( $\blacktriangle$ ) 2.5, ( $\blacktriangle$ ) 3, ( $\circ$ ) 3.5, ( $\blacksquare$ ) 4, ( $\blacktriangle$ ) 5, ( $\blacktriangle$ ) 6.

## 6.2 HAUTEURS CONJUGUEES DU RESSAUT FORCE PAR SEUIL

### 6.21 Limite de formation

Lors des essais, la limite de formation du ressaut forcé est atteinte pour une combinaison donnée entre  $F_1$  et  $S$  (cf. Ch.2); au-delà de cette limite, le seuil devient un déversoir, l'écoulement à l'aval n'influence plus celui à l'amont du seuil et passe par un état torrentiel au-dessus du seuil.

Ci-après, une expression de cette limite est développée. En admettant la condition critique  $F = 1$  au droit du seuil avec la hauteur critique  $h_c = h_2 - s$ , celle-ci peut s'écrire :

$$(6.1) \quad F^2 = 1 = \frac{q^2}{g(h_2 - s)^3} ;$$

en divisant par  $h_1$  et en réécrivant les 2 membres de droite avec nos notations, on obtient :

$$(6.2) \quad (Y-S)^3 = F_1^2.$$

Avec  $Y_\ell$  comme rapport des hauteurs conjuguées correspondant à la hauteur relative limite du seuil  $S_\ell$ , l'équ. (6.2) pour ce cas limite s'écrit alors :

$$(6.3) \quad Y_\ell = F_1^{2/3} + S_\ell.$$

La hauteur  $S_\ell = f(F_1)$  a été déterminée expérimentalement par [13]; la courbe passant par ces points est présentée à la Figure 6.3 et peut être approchée par l'équation :

$$(6.4) \quad S_\ell = 0.163 \cdot F_1^{1.645}, \quad 0 < S_\ell < 5.$$

Sur cette Figure 6.3, les points expérimentaux pour  $S=2,3,4$  de cette étude sont indiqués et sont situés sur la courbe d'équ. (6.4). Il n'y a pas de point pour  $S=1$ , car les installations ne permettent pas de descendre jusqu'à  $F_1=3$ .

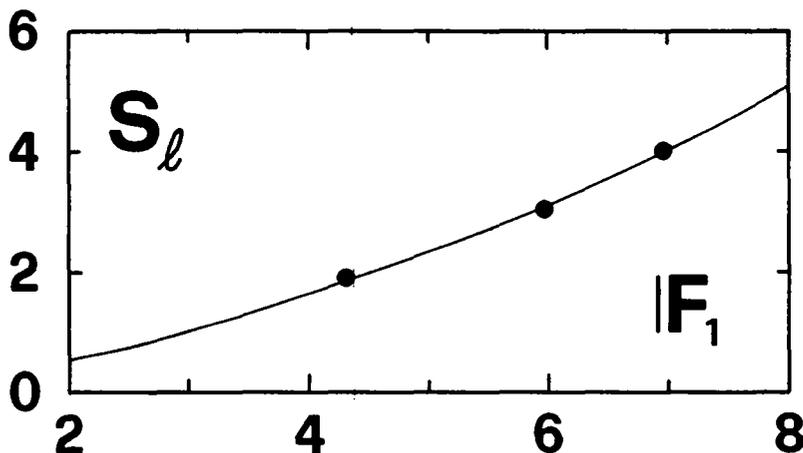


Figure 6.3 : Hauteur limite relative du seuil  $S_\ell = f(F_1)$ , selon l'équ. (6.4) d'après [13]; (●) points expérimentaux.

Les points  $(Y_\ell, F_1)$  à partir de l'équ. (6.4), correspondants pour  $S=1, 2, 3$  et  $4$ , sont aussi indiqués sur les Figures 6.4-6.6 pour les 3 types de ressaut forcé.

## 6.22 Hauteurs conjuguées du ressaut forcé par seuil

Les essais préliminaires (cf. §6.13) ont montré l'importance de la position du pied du ressaut par rapport à la vanne plane; la limite de formation du ressaut forcé par seuil type A est analysée au §6.21. Il s'agit maintenant d'établir une relation entre les hauteurs conjuguées du ressaut forcé par seuil et le nombre de Froude. A cette fin, une première série d'essais est réalisée dans la configuration du canal avec la vanne plane (série 1).

Les essais similaires pour le ressaut classique (cf. §3.6) ont fait ressortir l'effet de frottement sur les hauteurs conjuguées. Les résultats ci-après concernant le ressaut forcé par seuil contiennent cet effet de frottement : les équations expérimentales présentées ne sont donc valables que pour nos installations. Pour généraliser le résultat, une deuxième série est exécutée (cf. §6.23) dans la configuration du canal avec le déversoir standard, pour laquelle le frottement est négligeable.

La nouvelle procédure des essais est donc la suivante : la vanne à position interchangeable est mise en place à la position telle que le pied du ressaut forcé se trouve immédiatement à l'aval, la position du seuil étant fixe. Cependant, l'écoulement de la vanne n'était jamais noyé. L'ouverture de la vanne a été choisie pour obtenir le rapport  $S = 1, 2, 3$  et  $4$ ; parce que  $S=4$  est un rapport déjà considérable en pratique, aucun essai pour  $S>4$  n'a été effectué. Le débit maximal supporté par la configuration est installé pour provoquer un ressaut forcé (type A, B ou  $B_{min}$ ). Les mesures sont exécutées comme pour le ressaut classique (cf. §3.6). Ainsi de nouveaux essais sont faits, en adoptant ce modus operandi. En tout, 45 essais pour chaque type de ressaut ont été effectués.

Les mesures concernant les principes de dimensionnement pour les ressauts forcés par seuil types A, B et  $B_{min}$  sont données aux annexes 8.5.36-8.5.40.

A la Figure 6.4 pour le ressaut forcé type A, les points expérimentaux pour les divers  $S>0$  sont regroupés sur des courbes

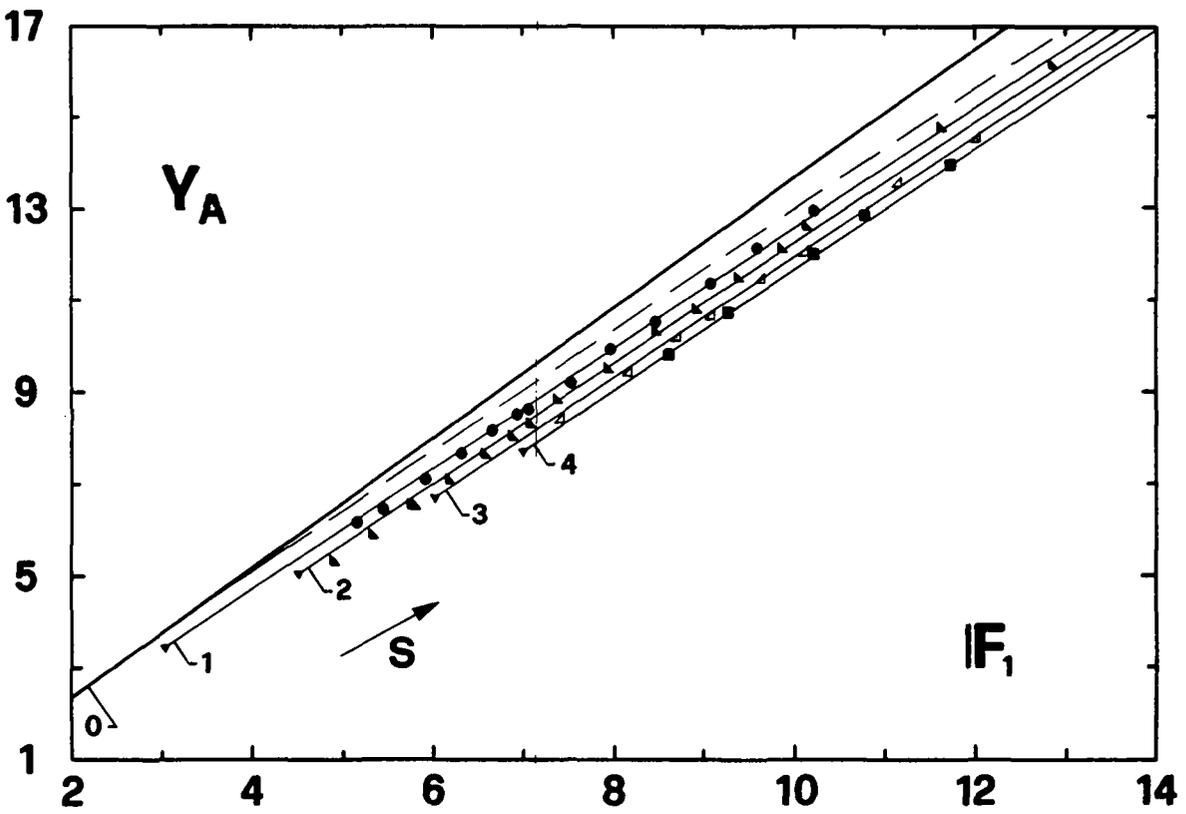


Figure 6.4 : Ressaut forcé type A. Rapport des hauteurs conjuguées  $Y_A = f( F_1, S)$ . Notations voir Figure 6.2; ( $\blacktriangleright$ ) points limites de formation du ressaut d'après l'équ. (6.3). (--) courbe du ressaut classique selon l'équ. (3.9).

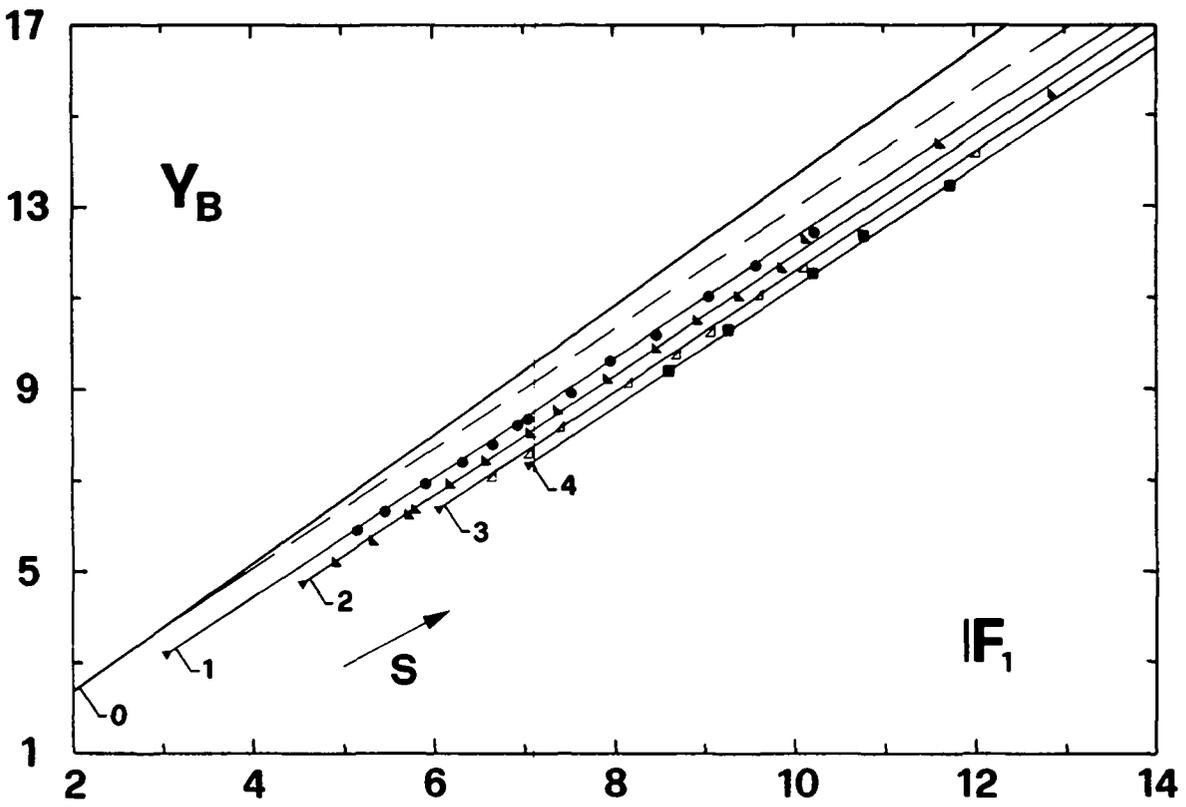


Figure 6.5 : Ressaut forcé type B. Rapport des hauteurs conjuguées  $Y_B = f( F_1, S)$ . Notations voir Figures 6.2 et 6.4.

presque parallèles à la courbe expérimentale pour le ressaut classique (cf. Figure 3.28). Plus  $S$  est grand, plus la courbe correspondante s'éloigne de la courbe  $S=0$ . La corrélation linéaire des diverses courbes expérimentales  $Y=f(F_1)$  avec  $S$  fixé est toujours supérieure à 0.99. Il importe de dire que leurs pentes calculées ont des valeurs proches les unes des autres, du même ordre que la pente de la courbe  $S=0$ ; celle-ci est admise aussi pour les courbes expérimentales et apparaît dans l'équ. (6.5).

Les courbes pour les diverses hauteurs de seuil relatives  $S$  peuvent être approchées à l'aide de l'équation suivante :

$$(6.5) \quad Y_A = 1.307 \cdot F_1 - 0.142 - 0.4 \cdot S^{0.85}.$$

Pour le cas  $S=0$ , l'équ. (3.9) est retrouvée.

Pour le ressaut forcé type B, des courbes analogues sont présentées sur la Figure 6.5, avec un décalage vers le bas plus important et avec une pente également identique à celle de la courbe expérimentale pour le ressaut classique. Elles peuvent être exprimées par l'équation :

$$(6.6) \quad Y_B = 1.307 \cdot F_1 - 0.142 - 0.6 \cdot S^{0.75}.$$

Pour  $S=0$ , l'équ. (3.9) est retrouvée.

Finalement, pour le cas du ressaut forcé type  $B_{\min}$  (cf. Figure 6.6), les mêmes remarques que pour le cas B sont valables, la pente des droites reste encore égale à la valeur 1.307 selon l'équ. (3.9) mais le décalage vers le bas devient encore plus grand. L'équation les décrivant est la suivante :

$$(6.7) \quad Y_{B_{\min}} = 1.307 \cdot F_1 - 0.142 - 0.85 \cdot S^{0.65}.$$

Pour ces essais dans la configuration du canal avec vanne plane (série 1), le rapport  $Y_{RFs}$  des hauteurs conjuguées du ressaut forcé par seuil peut donc être représenté par :

$$(6.8) \quad Y_{RFs} = Y_{RC} - \Delta Y_s$$

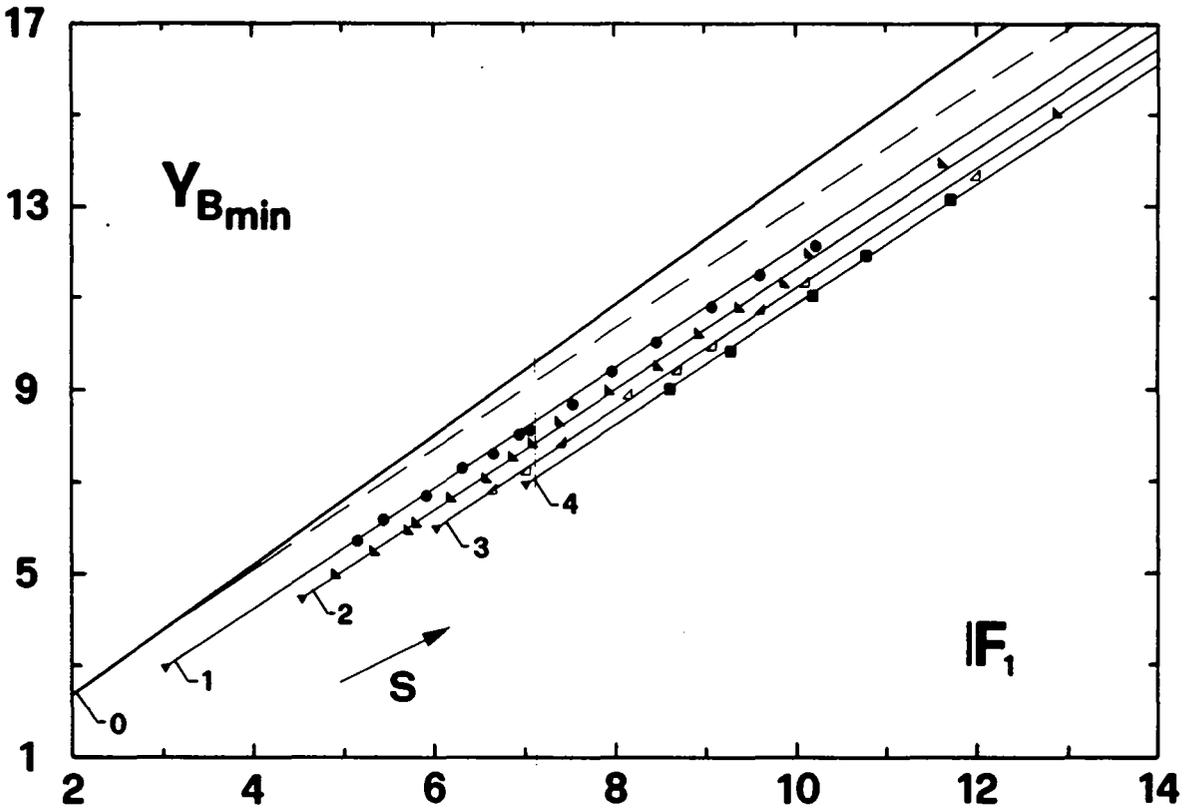


Figure 6.6 : Ressaut forcé type  $B_{min}$ . Rapport des hauteurs conjuguées  $Y_{B_{min}} = f(F_1, S)$ . Notations voir Figures 6.2 et 6.4.

où  $Y_{RF_S}$  est donné par les équ. (6.5)-(6.7),  $Y_{RC}$  par l'équ. (3.9) et  $\Delta Y_S$  est l'effet du seuil défini par :

$$(6.9) \quad \Delta Y_S = \alpha \cdot S^\beta,$$

où  $\alpha$  et  $\beta$  ne sont que des fonctions du type de ressaut comme indiqué au tableau 6.1. Il convient de constater que  $\Delta Y_S$  ne dépend pas du nombre de Froude amont  $F_1$  mais de  $S$  seulement.

	Type A	Type B	Type $B_{min}$
$\alpha$	0.40	0.60	0.85
$\beta$	0.85	0.75	0.65

Tableau 6.1 : Valeurs des coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  de l'équ. (6.9) pour les trois types de ressaut forcé par seuil.

Comme il ressort de l'équ. (3.9), l'effet du frottement  $\Delta Y_f$  proprement dit s'exprime par :

$$(6.10) \quad \Delta Y_f = Y - Y_{RC} ,$$

où  $Y$  est défini par l'équ. (2.3) et  $Y_{RC}$  par l'équ. (3.9). L'équ. (6.10) s'écrit donc pour la série 1 des essais de ce chapitre :

$$(6.11) \quad \Delta Y_f = 0.107 \cdot F_1 - 0.358.$$

Ainsi, l'effet du seuil  $\Delta Y_S$  a pu être séparé des effets de frottement  $\Delta Y_f$  et du ressaut classique  $Y_{RC}$ .

La relation générale des hauteurs conjuguées  $Y_S$  pour un ressaut forcé par seuil est donnée par l'équation générale suivante :

(6.12)

$$Y_S = Y - \Delta Y_S$$

où  $Y=f(F_1, \Lambda, \omega)$  est défini par l'équ. (3.10) contenant les hauteurs conjuguées avec l'effet de frottement et  $\Delta Y_S=f(S)$  par l'équ. (6.9) correspondant à l'effet du seuil.

Les résultats expérimentaux sont de plus présentés à la Figure 6.7 en termes de  $\Delta Y_S$  selon l'équ. (6.12).  $\Delta Y_{S,m}$  donne l'écart sur le rapport des hauteurs conjuguées des mesures,  $\Delta Y_{S,c}$  celui du calcul selon l'équ. (6.9). Cette représentation permet de vérifier les résultats à une échelle plus importante que sur les Figures 6.4-6.6. Les trois types de ressaut forcé par seuil sont représentés pour divers  $S$ . Les points se trouvent très proches de la droite  $\Delta Y_{S,m}=\Delta Y_{S,c}$ ; l'écart moyen sur  $\Delta Y_S$  est de  $\pm 0.10$ , tandis que l'écart maximal est de  $\pm 0.35$ . La dispersion est la plus grande pour  $S=2$  dans les trois types de ressaut. Elle peut provenir de ce que certains points expérimentaux correspondant pour le ressaut classique ne se situent pas exactement sur la droite donnée par l'équ. (3.9); ceci signifie que la valeur est sous-estimée ou surestimée respectivement pour ces points en ce qui concer-

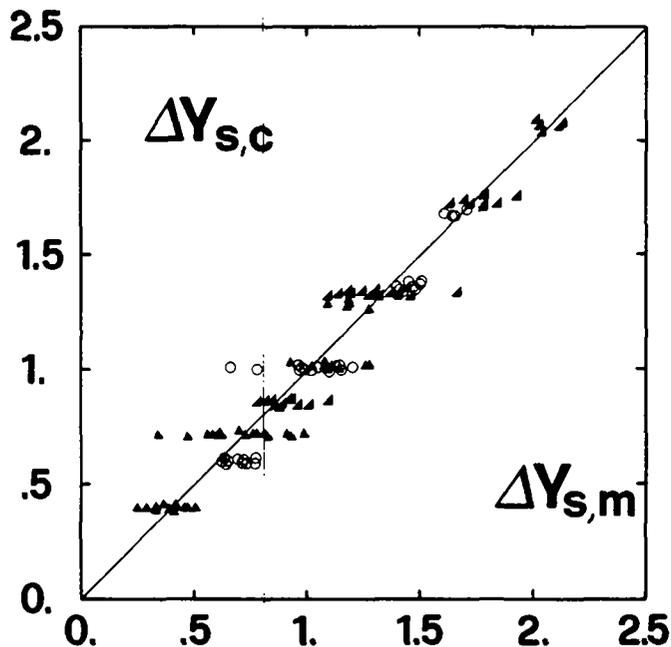


Figure 6.7 : Comparaison entre l'effet du seuil  $\Delta Y_{s,m}$  mesuré et  $\Delta Y_{s,c}$  calculé selon l'équ. (6.9) (série 1). Notations : ( $\blacktriangle$ ) ressaut forcé type A, ( $\circ$ ) type B, ( $\blacktriangle$ ) type  $B_{min}$ . (—) droite  $\Delta Y_{s,c} = \Delta Y_{s,m}$ .

ne l'effet du frottement  $\Delta Y_f$ . Sinon la Figure 6.7 montre la bonne concordance entre les valeurs expérimentales et les équations empiriques proposées comme solution avec l'équ. (6.9).

### 6.23 Confirmation par d'autres essais

Comme pour le ressaut classique (cf. §3.6), une vérification (série 2 des essais) a été effectuée pour le ressaut forcé par seuil avec des hauteurs d'eau amont  $h_1$  plus importantes à des vitesses  $V_1$  presque identiques dans la configuration du canal avec déversoir standard. Ainsi l'effet du frottement  $\Delta Y_f$  est devenu presque négligeable pour le ressaut classique et les points devraient s'aligner sur des courbes parallèles à celle de Bélanger avec le décalage  $\Delta Y_{s,c}$  selon l'équ. (6.9). Celui-ci est comparé à la Figure 6.8 à l'effet du seuil  $\Delta Y_{s,m}$  selon cette seconde série de mesures, comme présenté à la Figure 6.7. Les valeurs expérimentales s'ajustent assez bien sur la droite  $\Delta Y_{s,c} = \Delta Y_{s,m}$ , sauf pour quelques points du ressaut type  $B_{min}$  avec un léger décalage. Le nombre de points de mesures est faible car il est limité par les installations et les hauteurs d'eau  $h_1$  requises. Le nombre de

Froude  $F_1$  a varié entre 3.9 et 5.75; pour certaines de ces valeurs,  $S$  approchait de  $S_\lambda$  défini par l'équ. (6.4). Près de ces valeurs limites, il devient difficile de distinguer les divers types de ressaut forcé. Ceci peut expliquer certains écarts.

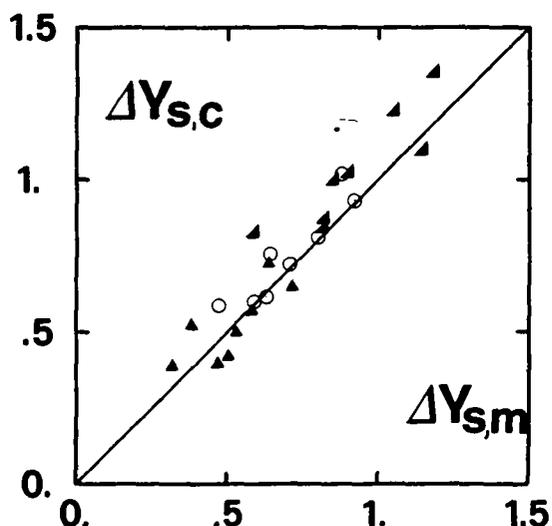


Figure 6.8 : Ecarts  $\Delta Y_s$  des hauteurs conjuguées pour la série 2.  $\Delta Y_{s,m}$  d'après les mesures,  $\Delta Y_{s,c}$  calcul selon équ. (6.9). Notations : cf. Figure 6.7; (—) droite  $\Delta Y_{s,m} = \Delta Y_{s,c}$ . (Mesures à l'annexe 8.5.42)

### 6.3 LONGUEURS DE BASSIN

Pour ces essais, les longueurs  $L_S$  et  $L_B$  (voir définition à la Figure 6.1) sont reportées dans les Figures 6.9 et 6.10, en les rendant aussi relatives à la hauteur  $h_1$ . Ces longueurs relatives  $\lambda_S$  et  $\lambda_B$  sont exprimées en fonction du nombre de Froude  $F_1$ . Pour tous les diagrammes, les points expérimentaux semblent s'aligner autour d'une droite, avec un écart moyen  $\Delta\lambda = \pm 5$  dans le domaine d'étude, similaire à celui du ressaut classique (cf. §3.63).

$\lambda_S = L_S/h_1$  détermine la position du seuil par rapport au pied du ressaut. Pour les trois types,  $\lambda_S$  croît quasi linéairement avec  $F_1$ , la pente de la courbe étant plus forte pour le type A et la moindre pour le type  $B_{min}$ . Quelques

rare points pour le seuil  $s=75$  mm sont nettement plus haut que les autres car il est difficile d'y différencier nettement les divers types de ressaut. Sur la Figure 6.9, la courbe de l'équ. (3.11) est représentée : la courbe du ressaut forcé type A est juste au-dessous; par contre, les courbes pour les types B et  $B_{min}$  sont plus décalées vers le bas.

$\lambda_B = L_B/h_1$  détermine la longueur du bassin entre le pied du ressaut et la fin du rouleau de fond à l'aval du seuil. Les courbes présentent une pente plus forte que celles pour  $\lambda_S$ . La position  $x_{RF}$  de la fin du rouleau de fond à l'aval du seuil est aussi sujette à des fluctuations instantanées et des valeurs moyennes sont mesurées. L'erreur sur cette position compense, semble-t-il, celle sur la position du pied du ressaut, d'où la moindre dispersion. Sur la Figure 6.10, la courbe pour les longueurs relatives du ressaut classique  $\lambda_J = L_J/h_1$  est donnée par [06] :

$$(6.13) \quad \lambda_J = 6 \cdot Y,$$

où  $Y=f(F_1)$  correspond à l'équation de Bélanger (2.3).

Les courbes pour les divers types de ressaut forcé sont toujours situées au-dessous de celle du ressaut classique. Ce fait indique non pas seulement un effet de réduction de la hauteur d'eau aval  $h_2$ , mais aussi une réduction nette de la longueur du ressaut forcé par rapport au ressaut classique. Pour les trois types de ressaut forcé, les courbes sont données, suite à une analyse de régression, par les équations suivantes, avec le domaine de validité  $5 < F_1 < 13$  :

$$1) \text{ ressaut forcé type A} \quad : \quad \lambda_S = 6.27 \cdot F_1 - 5.75 \quad (6.14)$$

$$\lambda_B = 8.68 \cdot F_1 - 11.23 \quad (6.15)$$

$$2) \text{ ressaut forcé type B} \quad : \quad \lambda_S = 5.29 \cdot F_1 - 5.37 \quad (6.16)$$

$$\lambda_B = 8.44 \cdot F_1 - 12.97 \quad (6.17)$$

$$3) \text{ ressaut forcé type } B_{min} \quad : \quad \lambda_S = 4.64 \cdot F_1 - 4.84 \quad (6.18)$$

$$\lambda_B = 6.93 \cdot F_1 - 6.83 \quad (6.19)$$

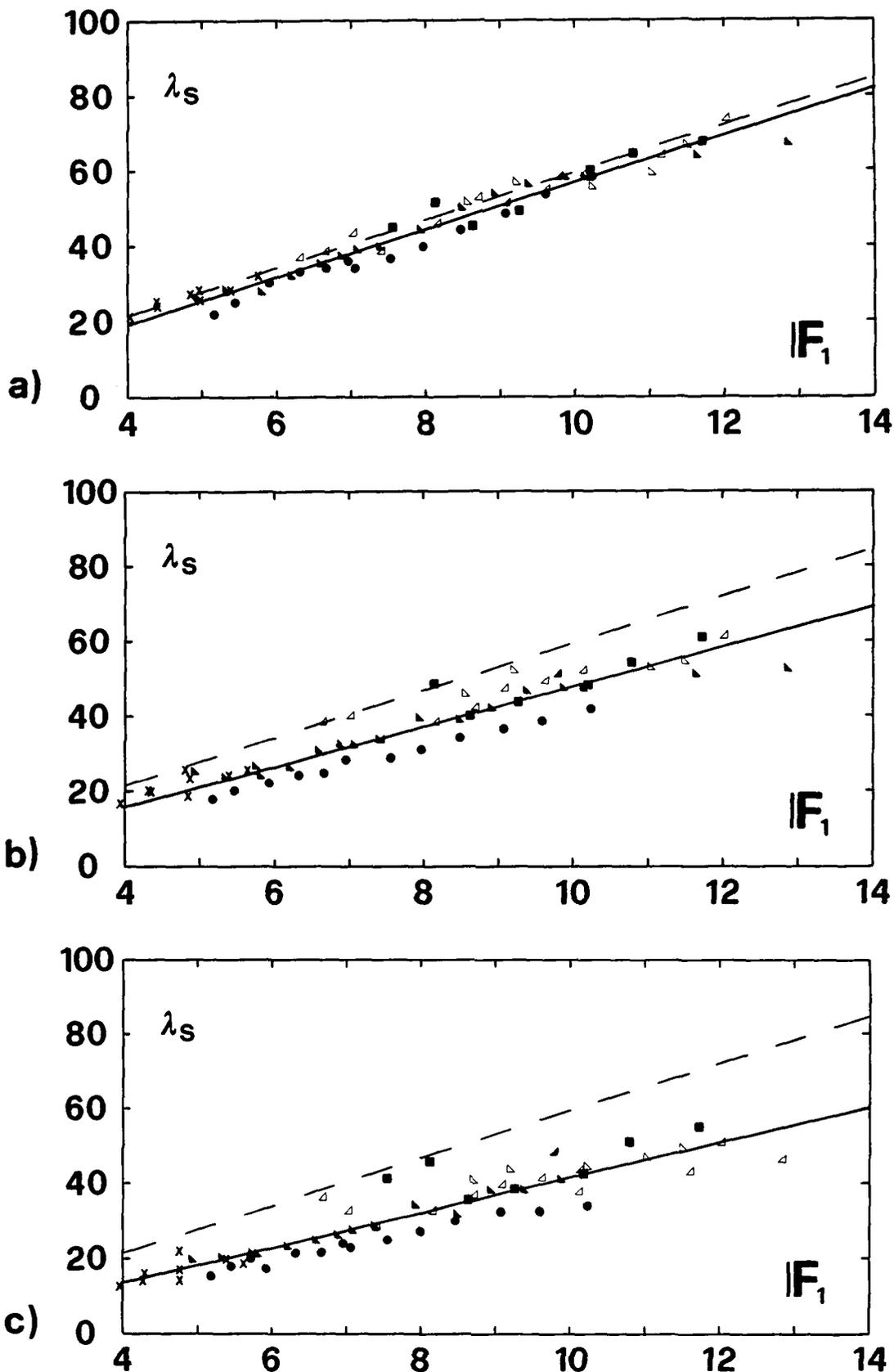


Figure 6.9 : Longueur relative  $\lambda_s = f(F_1)$  pour a) ressaut forcé type A, b) ressaut forcé type B et c) ressaut forcé type B<sub>min</sub>. Notations voir Fig. 6.2. (—) courbe selon équ. (6.14), (6.16) et (6.18) respectivement. (---) courbe selon équ. (3.11). (x) points de contrôle de la série 2.

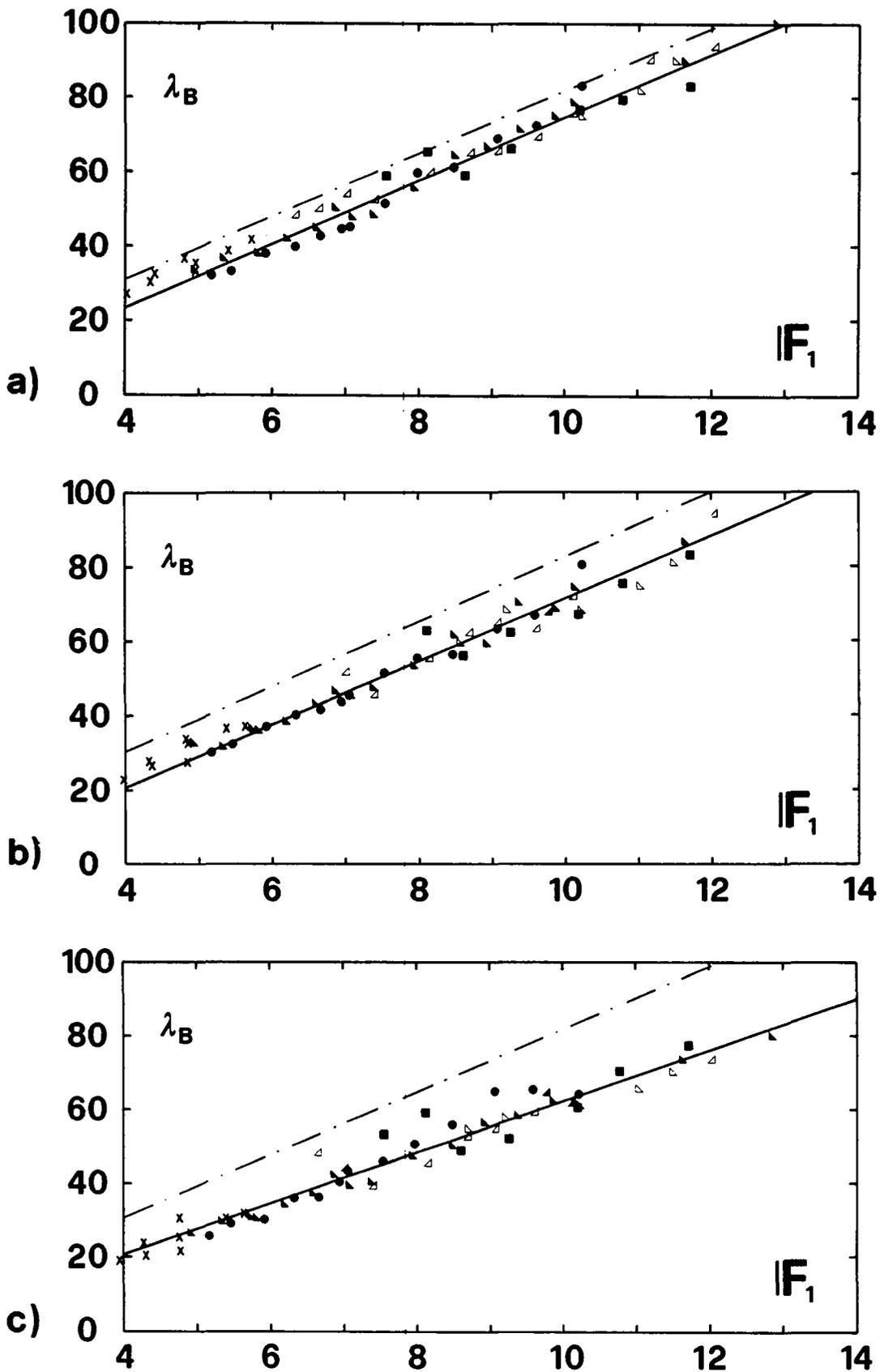


Figure 6.10 : Longueur relative de bassin  $\lambda_B = f(F_1)$  pour a) ressaut forcé type A, b) ressaut forcé type B et c) ressaut forcé type Bmin. Notations voir Figure 6.2. (—) courbe selon équ. (6.15), (6.17) et (6.19) respectivement. (-.-) courbe selon équ. (6.13) d'après [06]. (x) points de contrôle de la série 2.

La corrélation des différentes courbes est de 0.942, 0.854 et 0.794 pour les longueurs relatives  $\lambda_S$  correspondant respectivement aux ressauts types A, B et  $B_{min}$ . La dispersion des résultats augmentent lorsque l'on passe du ressaut type A à celui type  $B_{min}$ , comme déjà expliqué ci-dessus.

Pour les longueurs relatives  $\lambda_B$ , la corrélation est de 0.971, 0.962 et 0.934 respectivement pour les ressauts types A, B et  $B_{min}$ ; elle est meilleure que celle pour  $\lambda_S$ . Pour le ressaut type B, l'écart est plus important par rapport au type  $B_{min}$  que par rapport au type A. Ceci provient du fait que le rouleau de fond est très allongé pour le type B, même plus que pour le type A. Ainsi la courbe correspondante n'est pas à peu près entre les deux autres, mais plus proche de celle du type A. Comme le montrent les Figures 6.9 et 6.10, les longueurs relatives  $\lambda_S$  et  $\lambda_B$  sont peu dépendantes de S, quel que soit  $F_1$ . Ceci est donc un résultat intéressant et comparable à l'effet  $\Delta Y_S$  selon l'équ. (6.9) qui est indépendant de  $F_1$ . De plus les longueurs sont exprimées par des équations linéaires.

#### 6.4 EFFICACITE DU DISSIPATEUR

Connaissant les hauteurs d'eau et les longueurs de bassin, il reste à déterminer l'efficacité de l'ouvrage : elle est définie par l'équ. (2.4) qui s'énonce comme suit dans les notations utilisées :

$$(6.20) \quad \eta = 1 - \frac{2Y_S + \left(\frac{F_1}{Y_S}\right)^2}{2 + F_1^2}$$

Le rapport  $Y_S = f(F_1, \Lambda, \omega, S)$  est défini par l'équ. (6.12), avec les coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  donnés au tableau 6.1 pour les divers types de ressaut. En l'introduisant dans l'équ. (6.20),  $\eta$  est alors exprimé en fonction de  $F_1$ ,  $\Lambda$ ,  $\omega$  et S. Le résultat est présenté sur la Figure 6.11 pour le cas particulier  $\Lambda=0$ , i.e. sans frottement. Les courbes commencent aux points limi-

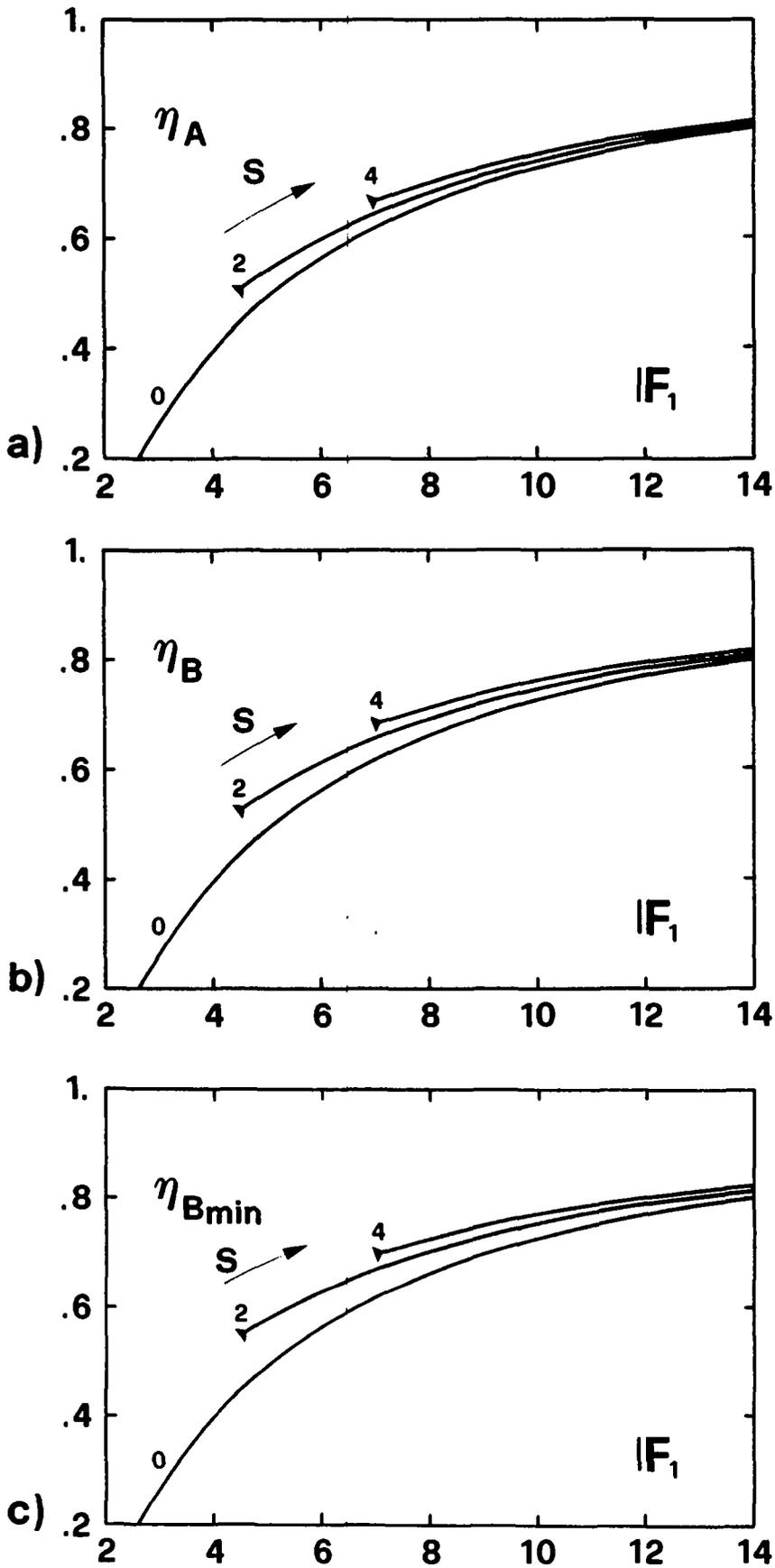


Figure 6.11 : Efficacité du bassin  $\eta=f(F_1, \Lambda, \omega, S)$  pour le ressaut forcé type A, b) ressaut forcé type B et c) ressaut forcé type  $B_{min}$ . Effet du seuil uniquement ( $\Lambda=0$ ).

tes définis à la Figure 6.4. L'efficacité augmente avec  $F_1$  et  $S$ , et est plus élevée pour le ressaut forcé type  $B_{\min}$  que pour le type B ou encore le type A. L'effet de  $S$  tend à diminuer avec  $F_1$  croissant.

## 6.5 DISCUSSION DES RESULTATS

### 6.51 Hauteurs conjuguées

Les essais ont montré l'importance de l'attention à leur apporter, notamment pour la position du pied du ressaut par rapport à l'endroit où la hauteur  $h_1$  est déterminée. Cette distance doit être la moindre possible pour les faibles hauteurs d'eau, sinon une erreur peut s'introduire dans  $h_1$  et par la suite dans tous les paramètres  $F_1$ ,  $S$ ,  $Y$ ,  $\lambda$ , et conduit à des résultats erronés.

Le tableau 6.2 compare, pour  $F_1 = 4, 8, 12$  et  $S = 2, 4$ , les valeurs du rapport des hauteurs conjuguées  $Y$  pour les trois types étudiés et le cas du ressaut classique. D'abord les valeurs absolues sont calculées à l'aide de l'équ. (6.12) pour le cas particulier  $\Lambda=0$  (pas d'effet de frottement) et ensuite en pourcents relatifs aux valeurs du ressaut forcé type B.

$F_1$	$S$	$Y_A$	%	$Y_B$	%	$Y_{B_{\min}}$	%	$Y_{RC}$	%
4	2	4.4	+7.3	4.1	0	3.8	-7.3	5.2	26.8
8	2	10.1	+3.1	9.8	0	9.5	-3.1	10.8	10.2
12	2	15.7	+1.3	15.5	0	15.1	-2.6	16.5	6.5
8	4	9.5	+4.4	9.1	0	8.7	-4.4	10.8	18.7
12	4	15.2	+2.7	14.8	0	14.4	-2.7	16.5	11.5

Tableau 6.2 : Comparaison des rapports  $Y$  des hauteurs conjuguées selon l'équ. (6.12) en valeurs absolues et en % relatifs par rapport au ressaut forcé type B.  $Y_{RC}$  : rapport des hauteurs conjuguées pour le ressaut classique selon l'équ. (2.3). Sans effet de frottement.

Le ressaut forcé type B apparaît comme type moyen entre les types A et  $B_{\min}$ , les courbes sont parallèles et les écarts relatifs diminuent pour  $F_1$  grandissant. Néanmoins les différences ne sont pas très marquées entre les divers types; mais par rapport au ressaut classique, les gains sont d'autant plus grands que le nombre de Froude  $F_1$  est faible et  $S$  grand.

Les résultats de Macha [30] sont bien différents : ils montrent que les courbes correspondantes  $Y=f(F_1)$  pour  $S$  donné s'éloignent de plus en plus de celle de Bélanger, lorsque  $F_1$  augmente (cf. Figure 6.12). La diminution conséquente de  $Y$  est très importante. De plus, l'effet de  $S$  sur  $Y$  n'est pas convergent comme selon l'équ. (6.12).  $\beta$  selon l'équ. (6.9) est donc plus grand que l'unité. Toutefois des remarques ont été faites sur ses essais au chapitre 2 et ses résultats sont donc sujets à caution.

Les différentes courbes des Figures 6.4-6.6 restent parallèles pour  $F_1$  croissant, contrairement à ce que propose Rand [41]. La Figure 2.21 au chapitre 2 montre que la courbe de Bélanger est l'asymptote des courbes pour les divers  $S$  et que cette convergence est très rapide. L'effet du seuil disparaît donc lorsque  $F_1$  devient suffisamment grand. Les différents types de ressaut forcé sont distingués par le facteur de longueur  $K$  (cf. équ. (2.12); pour le dimensionnement,  $K$  compris entre 0.2 et 0.7 est recommandé, suivant les conditions du lit de la rivière à l'aval. Les points limites de formation du ressaut forcé définis par l'équ. (6.4) correspondent à  $K=0.4$ . Pour le ressaut forcé type A, ce facteur prendrait donc au maximum la valeur  $K=0.4$ . Mais, comme montré au §6.3, la longueur du ressaut forcé type A est proche de celle du ressaut classique; dans ce cas,  $K$  doit donc être près de l'unité. Il y a contradiction. D'autre part, Rand donne comme longueur maximale du ressaut forcé 1.25 fois la longueur du ressaut classique : le ressaut forcé serait plus long que le ressaut classique ! Aucune attention n'est portée sur le rouleau de fond derrière le seuil.

La Figure 6.12 compare les résultats de Macha [30] et de Rand [41] avec ceux de la présente étude. Les remarques concernant les deux auteurs cités ont été faites plus haut. Il ressort de la Figure 6.12 que nos résultats se situent entre les deux autres, mais plutôt du côté de ceux de Rand; ceux de Macha sont plus décalés vers le bas suite à sa probable erreur sur le frottement dont l'effet a été négligé.

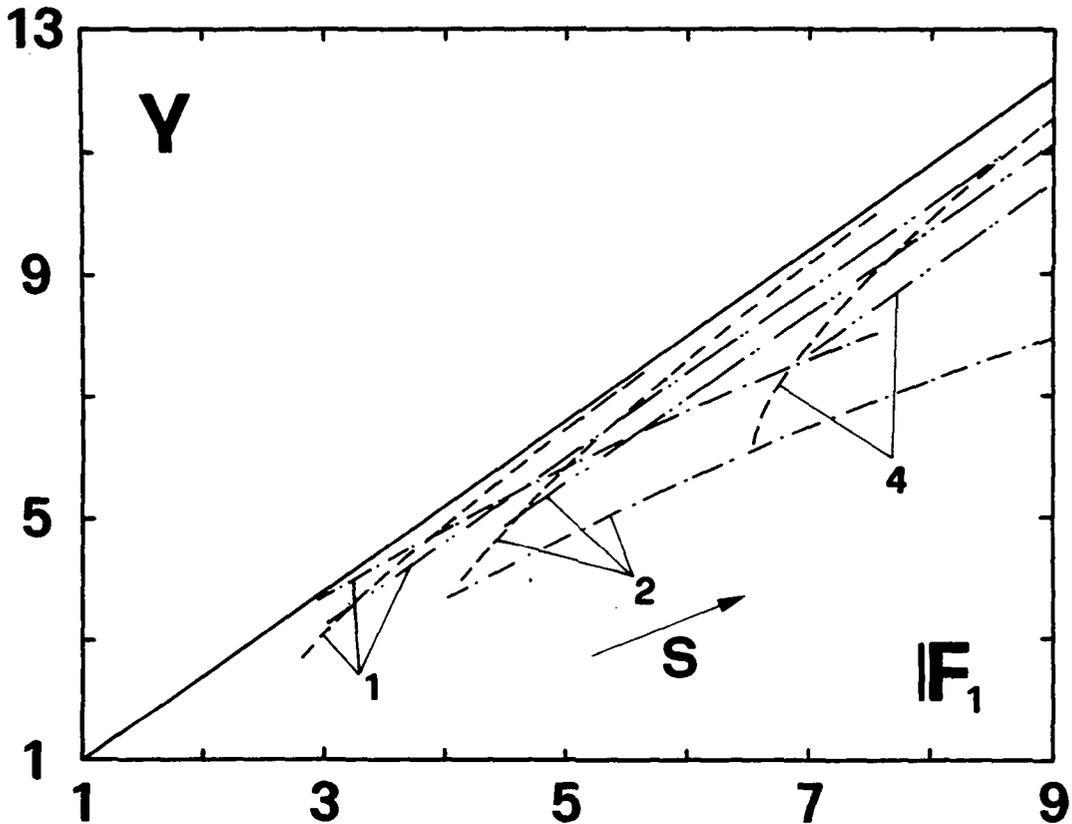


Figure 6.12 : Ressaut forcé par seuil - comparaison des hauteurs conjuguées selon divers auteurs : (--) Rand [41], (-.-) Macha [30], (-...-) selon l'équ. (6.12) pour le ressaut forcé par seuil type B (sans frottement).

Les courbes avec  $S$  donné commencent à peu près dans la même région de nombre de Froude pour les trois résultats présentés à la Figure 6.12; ceci signifie que la limite inférieure de formation du ressaut forcé par seuil est reconnue.

Rand [42] présente (cf. Figure 2.22) un diagramme  $Y=f(K,S)$  avec  $F_1$  fixe, dont la compréhension est difficile. Par exemple, pour  $F_1=9$ ,  $S=2$  et  $K=0.4$ , correspondant à peu près au ressaut forcé type A, le rapport des hauteurs conjuguées vaut

$Y=11.85$ , contre  $Y=12.23$  selon l'équation de Bélanger et  $Y_A=11.51$  selon l'équ. (6.12). La différence n'est pas négligeable.

Iwasa et al. [25] ont établi des courbes pour les hauteurs conjuguées du ressaut forcé avec le paramètre  $C_d \cdot S$ , où  $C_d$  est le coefficient de traînée et  $S$  la hauteur relative du seuil. Une telle représentation devient indépendante de  $S$  et la différenciation entre les divers types disparaît. La limite inférieure des essais est donnée par la relation  $Y = F_1^{2/3}$ ; elle est plus basse que celle définie par l'équ. (6.3). Les auteurs ont de plus travaillé avec des valeurs de  $S$  jusqu'à 15 ! Par comparaison, Macha [30] fixe la limite pratique à  $S=2.5$  !

McCorquodale et Regts [31] proposent également des courbes basées sur le paramètre  $C_d \cdot S$ , mais ils imposent la distance entre le pied du ressaut et le seuil. La valeur maximale testée est  $L_s/h_1=16$ . Pour  $F_1 > 4$ , il s'agit d'un ressaut forcé plus court que le ressaut type  $B_{min}$ . La comparaison avec nos résultats n'est pas possible.

Rajaratnam et Murahari [40] donnent une relation entre le paramètre  $C_d \cdot S$  et la longueur relative  $\lambda_s$ ; cette relation s'est avérée être peu dépendante de  $F_1$ . La Figure 6.13 montre ce résultat pour une seule série d'essais avec  $S=1.9$ . Les points calculés selon les équ. (6.5)-(6.7) et (6.14)-(6.19)

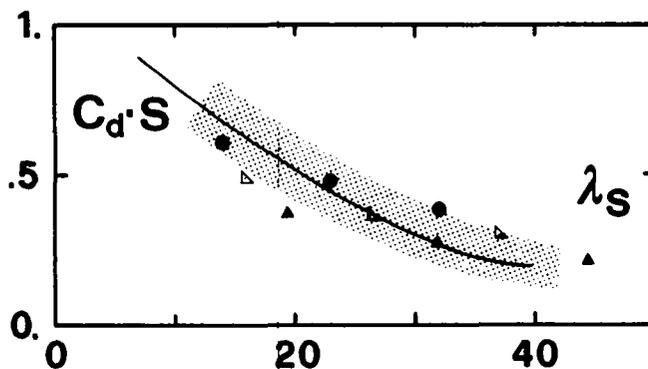


Figure 6.13 : Relation entre  $C_d \cdot S$  et  $\lambda_s$ ; (—) courbe expérimentale avec fuseau selon [40]; points selon les équ. (6.5)-(6.7) et (6.14)-(6.19) pour  $F_1 = 4, 6, 8$  avec (▲) ressaut forcé type A, (△) type B, (●) type  $B_{min}$ .

y sont indiqués pour  $F_1 = 4, 6, 8$ ; ils se situent dans le fuseau des essais des auteurs considérés. Mais, d'une part, aucune limite inférieure n'est établie pour la formation du ressaut forcé; d'autre part, il n'est pas possible de distinguer les divers types de ressaut forcé avec une telle représentation. Leurs longueurs relatives  $\lambda_S$  ont varié entre 7 et 38 pour  $S=1.9$  : des ressauts sont donc plus courts que le ressaut forcé type  $B_{min}$ . Par conséquent, une érosion importante d'un fond meuble est à craindre.

Ranga Raju et al. [46] proposent une approche particulière : la force moyenne  $\phi$  exercée sur des blocs standardisés rapportée à la force de pression à l'aval est exprimée par  $\phi=f(S, e, \lambda_S)$  où  $e$  est le coefficient d'espacement ( $e=1$  pour les seuils). Sinniger et Hager [60] donnent des expressions pour  $\phi$  basées sur les évaluations de Ranga Raju et al. En introduisant  $\phi$  dans l'équation de la quantité de mouvement, une relation est obtenue pour les hauteurs conjuguées. Les résultats concernent les blocs ( $e<1$ ); ils ont été étendus aux seuils ( $e=1$ ). La Figure 6.14 présente ces résultats concernant le ressaut forcé type A, avec  $S=1, 2, 4$ ,  $e=1$  et  $\lambda_S$  donné par l'équ. (6.14). Ils y sont comparés avec ceux tirés de l'équ. (6.12) en négligeant l'effet du frottement. Les courbes selon [60] sont proches et du même type (linéaire) que celles des présents essais, étant donné le fuseau considérable des corrélations selon [46]. La concordance est très bonne. Des résultats analogues pour les ressauts forcés types B et  $B_{min}$  sont obtenus. Ainsi par une approche complètement différente, nos résultats sont confirmés sur la base de ceux de Ranga Raju et al.

Ohtsu [34] a développé la relation expérimentale suivante exprimant les hauteurs conjuguées du ressaut forcé par seuil :

$$(6.21) \quad Y_S = Y \left[ 1 - 1.9 \cdot F_1 \cdot \left( \frac{S}{\lambda_S} \right)^2 \right],$$

où  $Y$  est donné par l'équ. (2.3),  $S$  la hauteur relative du seuil et  $\lambda_S$  la distance relative entre le pied du ressaut forcé et le seuil.

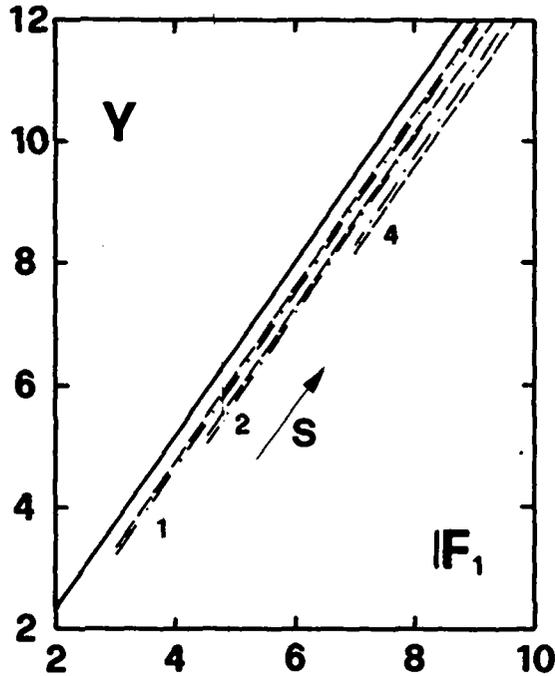


Figure 6.14 : Ressaut forcé type A; comparaison des hauteurs conjuguées (-.-) selon [46,60] et (- -) d'après l'équ. (6.12). Effet de frottement négligé.

Les courbes correspondantes s'éloignent de celle de Bélanger pour  $S$  grandissant, contrairement à nos résultats; mais leurs pentes sont presque identiques, de même que l'allure générale. Par contre, aucune limite de formation du ressaut n'est donnée. De plus, l'effet de frottement est négligé.

#### 6.52 Longueurs du ressaut forcé

Les longueurs  $\lambda_S$  et  $\lambda_B$  en fonction de  $F_1$  obtenues sont décrites par des droites. Elles sont peu dépendantes de  $S$  et le frottement ne semble pas avoir d'influence non plus. Le tableau 6.3 présente, pour  $F_1 = 5, 8, 12$ , la comparaison des valeurs absolues des longueurs relatives calculées par les équ. (6.14) à (6.19), et les pourcents par rapport au ressaut forcé type B.

Pour  $\lambda_S$ , les différences restent pratiquement indépendantes de  $F_1$  entre les ressauts forcés types A et Bmin par rapport au ressaut type B. Pour  $\lambda_B$ , les écarts relatifs diminuent avec  $F_1$  croissant pour le ressaut type A et augmentent pour le ressaut type Bmin.

	$F_1$	$\lambda_A$	%	$\lambda_B$	%	$\lambda_{B_{min}}$	%
$\lambda_S$	5	25.6	+21	21.1	0	18.4	-13
	8	44.4	+20	37.0	0	32.3	-13
	12	69.5	+20	58.1	0	50.8	-13
$\lambda_B$	5	32.2	+10	29.2	0	27.6	-5
	8	58.2	+7	54.6	0	48.6	-11
	12	92.9	+5	88.3	0	76.3	-14

Tableau 6.3 : Longueurs relatives  $\lambda_S$  et  $\lambda_B$  : comparaison des valeurs absolues et des pourcents pour les trois types de ressauts forcés. Le ressaut forcé type B sert de référence.

La courbe expérimentale de Bradley et Peterka [06] pour le ressaut classique  $L_j/h_1$  est presque parallèle à la droite  $\lambda_B=f(F_1)$  pour le ressaut forcé type A dans notre domaine d'étude, avec un décalage de  $\Delta\lambda=7$  vers le haut, pour les diverses sortes de bassins amortisseurs (cf. Figure 6.15). Le décalage provient de ce que les auteurs ont mesuré une longueur "située quelque part à l'aval du rouleau", mal définie; d'autre part, leur écart relatif moyen est  $\Delta\lambda=\pm 5$ , comme pour nos essais.

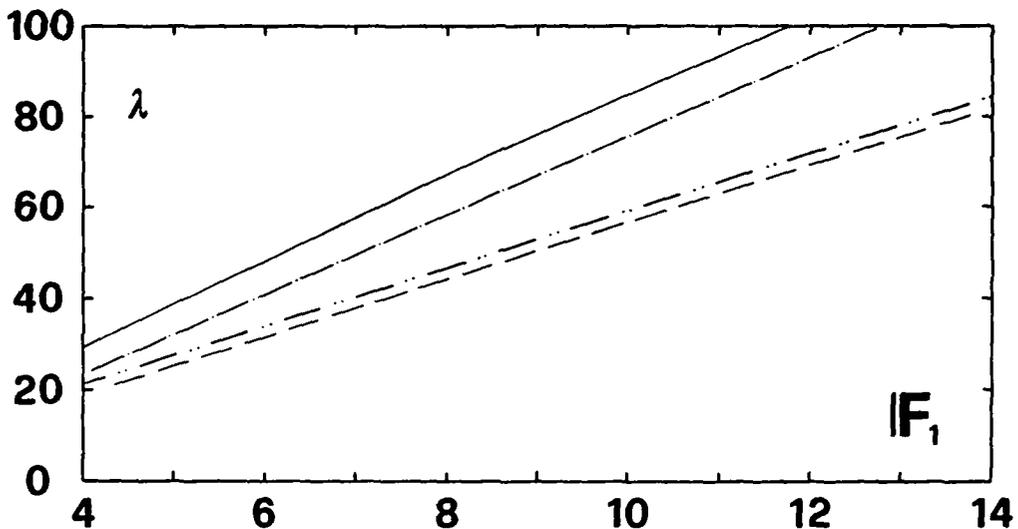


Figure 6.15 : Comparaison des longueurs relatives  $\lambda$  : (—)  $\lambda_j$  selon équ. (6.13) d'après [06] et (-.-.-)  $\lambda_R$  selon équ. (6.12) pour le ressaut classique; (-.-)  $\lambda_B$  selon équ. (6.15), (---)  $\lambda_S$  selon l'équ. (6.14) pour le ressaut forcé type A.

Dans ses essais, Macha [30] a imposé la longueur entre le pied du ressaut et le seuil, notamment  $L_S/s=11,13.5,16$ ; tous ses résultats sont donnés sous forme adimensionnelle, il n'est pas possible de retrouver les niveaux d'eau  $h_1$  et  $h_2$  ni les longueurs.

Rand [41] propose une solution pour les longueurs relatives indépendantes de  $S$  avec le facteur  $K$  défini par l'équ. (2.8). Si  $K=0.4$  correspond au ressaut forcé type A, alors les résultats de Rand donnent la relation  $\lambda_S=5 \cdot F_1$  et, par comparaison, l'équ. (6.14) est  $\lambda_S=6.27 \cdot F_1 - 5.75$ . La différence entre les deux augmentent avec  $F_1$  croissant; les longueurs d'après [41] sont donc toujours inférieures pour  $4 < F_1 < 14$ . D'autre part, avec  $K > 0.5$ , les longueurs du ressaut forcé d'après Rand sont plus élevées que celles du ressaut classique !

Ohtsu [34] a mesuré les longueurs de la zone de séparation qui correspond à  $L_B$  et de l'écoulement non-uniforme  $L_U$  (voir Figure 2.27). Les longueurs sont ramenées à la perte de charge  $\Delta H$  et exprimées en fonction de l'efficacité  $\eta$ , i.e.  $L/\Delta H=f(\eta)$ . Il a procédé de même pour la longueur d'écoulement non-uniforme. Ces deux courbes sont des droites logarithmiques. Par comparaison, le résultat pour le ressaut forcé type A se situe entre ces deux courbes, comme le montre la Figure 6.17.

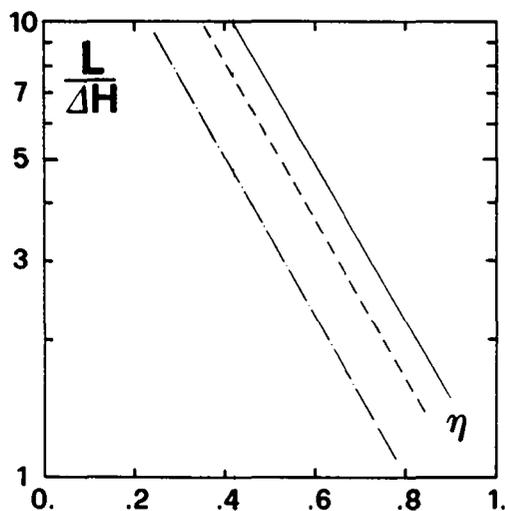


Figure 6.16 : Comparaison des longueurs rapportées à la perte de charge  $L/\Delta H$ , (—) longueur  $L_U$  selon [34], (-.-) longueur  $L_B$  selon [34], (---)  $L_B$  selon l'équ. (6.15).

### 6.53 Efficacité

Le tableau 6.4 donne pour  $F_1 = 4.5, 8, 12$  et  $S = 2, 4$ , la comparaison des efficacités absolues calculées à l'aide des équ. (6.20) et (6.12), et relatives en pourcent par rapport au ressaut forcé type B, ce dernier servant de référence. L'effet de frottement est négligé (cas  $\Lambda=0$ ).

$F_1$	S	$\eta_A$	%	$\eta_B$	%	$\eta_{B_{min}}$	%	$\eta_{RC}$	%
4.5	2	.515	-3.7	.535	0	.564	+5.4	.456	-14.8
8.0	2	.700	-1.0	.707	0	.719	+1.7	.678	-4.1
8.0	4	.714	-1.2	.723	0	.739	+2.2	.678	-6.2
12.0	2	.793	-0.4	.796	0	.802	+0.8	.783	-1.6
12.0	4	.800	-0.5	.804	0	.811	+0.9	.783	-2.6

Tableau 6.4 : Efficacité du bassin amortisseur : comparaison entre les trois types de ressaut forcé et le ressaut classique ( $S=0$ ), en valeurs absolues et pourcents relatifs. Sans frottement.

Les valeurs du tableau 6.4 sont choisies de manière à recouvrir tout le domaine présenté à la Fig. 6.11. Il en ressort que le ressaut forcé type B correspond à peu près à la moyenne entre les types A et  $B_{min}$ . Les écarts relatifs sont maximaux pour  $F_1$  petits et minimaux pour  $F_1$  grands. Par rapport au ressaut classique, les gains sont d'autant plus grands que  $F_1$  est faible.

Les résultats de Rand [43] pour l'efficacité ne sont pas dépendants de S mais de son coefficient K, bien que l'allure générale soit similaire. Par contre, il n'y a pas de convergence de  $\eta$  vers  $\eta_{RC}$  pour  $F_1$  croissant.

Othsu [34] donne deux courbes-enveloppes à l'intérieur desquelles sont distribuées des courbes pour différents Y; celle inférieure correspond à l'équ. (6.20) pour Y de Bélanger. Une bonne corrélation existe avec nos résultats.

## 6.54 Recommandations

Les ressauts forcés par seuil type A, type B et type  $B_{min}$  ont été présentés aux chapitres 4 et 5; dans le présent chapitre, les résultats des essais ont montré que, par rapport au ressaut classique, le ressaut forcé nécessite une moindre hauteur d'eau à l'aval et une longueur de bassin plus courte, et se révèle plus efficace dans son rendement, avec le grand avantage de fixer la position du ressaut.

En comparant les trois types de ressaut forcé entre eux, le type  $B_{min}$  apparaît avoir tous les avantages : il requiert la hauteur d'eau à l'aval la plus faible, nécessite la moindre longueur de bassin et est le plus efficace; par contre, les photographies (cf. §5.6) montrant les essais d'érosion le soulignent, il peut provoquer une forte érosion à l'aval du seuil, même dans la configuration avec protection du radier. Ceci signifie que le ressaut forcé type  $B_{min}$  n'est projetable que pour des cours d'eau avec un lit faiblement érodable ou bien avec un lit bien protégé sur une distance supérieure à  $\lambda_B$  correspondant au type  $B_{min}$ . Le ressaut forcé type A, à l'opposé par rapport aux deux autres types, ne semble posséder que des inconvénients : majeure hauteur d'eau, longueur de bassin supérieure, efficacité moindre; toutefois, il n'engendre qu'une très petite érosion, ce qui constitue un aspect favorable non négligeable, pour l'utilisation dans des cours d'eau avec des lits facilement érodables. Entre les deux, le ressaut forcé type B se dessine comme un "compromis helvétique", il combine les avantages de l'un et de l'autre, ce qui n'est possible qu'avec une atténuation des deux. C'est une solution intermédiaire valable pour des cours d'eau à lit peu érodable.

## 6.6 EXEMPLE DE CALCUL

### Exposé du problème

Soit un canal horizontal avec un ouvrage ayant les caractéristiques suivantes :  $q = 6 \text{ m}^2/\text{s}$  et  $H = 12 \text{ m}$ . Déterminez les

dimensions du bassin et du seuil, ainsi que son efficacité, sachant que le lit de la rivière est peu érodable et que la hauteur d'eau à l'aval ne doit pas dépasser 3.7 m.

### Marche du calcul

#### 1. Conditions amont

A partir du débit et de la charge, les valeurs suivantes sont calculées :  $h_1 = 0.4$  m et  $F_1 = 7.6$ . Comme hypothèse, l'effet du frottement est considéré comme négligeable; au point 4, cette affirmation sera vérifiée.

#### 2. Paramètres de base

Le rapport des hauteurs conjuguées maximal permis est  $Y < 3.7/0.4 = 9.25$ . Le lit de la rivière est peu érodable : le ressaut forcé type B est conseillé. L'équ. (6.12) avec les valeurs du tableau 6.1 pour le ressaut forcé type B donne  $S > 1.98$ . En choisissant  $S = 2$ , la hauteur du seuil est  $s = 0.8$  m.

#### 3. Détermination des longueurs et de l'efficacité

Pour les longueurs, les équ. (6.16) et (6.17) donnent :

$$\lambda_S = 35, \text{ d'où } L_S = 14 \text{ m,}$$

$$\lambda_B = 51, \text{ d'où } L_B = 21 \text{ m.}$$

L'efficacité est obtenue à partir des équ. (6.20) et (6.12) :  
 $\eta_B(F_1 = 7.6) = 0.683$ .

#### 4. Frottement

En appliquant le critère de l'équ. (8.3.22) étendu au cas du ressaut forcé par seuil, il résulte que l'effet de frottement peut être négligé pour  $\omega < 0.6$ , en d'autres termes pour une largeur de bassin  $B > 0.67$  m !

## 5. Schéma du bassin

Le bassin dissipateur a donc les dimensions représentées à la Figure 6.17.

Par comparaison, le ressaut classique nécessite pour  $F_1 = 7.6$  la hauteur d'eau aval  $h_2 = 4.10$  m (+10.8%). De plus la longueur de ce ressaut devient selon l'équ. (6.13) :  $L_j = 6h_2 = 24.6$  m (+17.1%). L'efficacité est de 0.648 (-5.2%). Le ressaut forcé prouve donc ses avantages : moindre hauteur d'eau aval, plus court et plus efficace.

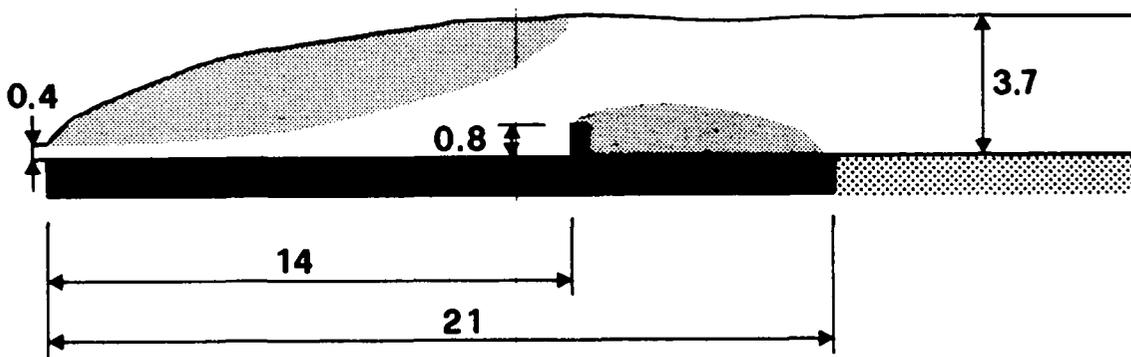


Figure 6.17 : Coupe longitudinale du bassin amortisseur avec dimensions en mètres.

## 6.7 CONCLUSION

Ce chapitre présente les résultats des essais spécifiques pour établir des principes de dimensionnement des bassins amortisseurs avec seuil. L'étude a porté sur les ressauts forcés types A, B et  $B_{min}$ .

Le rapport des hauteurs conjuguées est donné par la fonction  $Y = f(F_1, \Lambda, \omega, S)$  correspondant à des droites pour les trois types selon l'équ. (6.12). Le type A fournit les rapports des hauteurs conjuguées  $Y$  les plus élevés, le type  $B_{min}$  les moins élevés et le type B des valeurs intermédiaires. Les effets du seuil proprement dit et du frottement ont pu être séparés. Le dernier dépend du paramètre géométrique  $\omega$  et du paramètre hydraulique  $\Lambda$ .

Les longueurs relatives du bassin et du positionnement du seuil sont peu dépendantes de  $S$  et du frottement. Elles se

ramèment à des fonctions linéaires  $\lambda=f(F_1)$  pour les trois types de ressaut forcé. Les longueurs sont maximales pour le type A, minimales pour le type  $B_{min}$  et intermédiaires pour le type B.

L'efficacité du dissipateur est exprimée par la fonction  $\eta=f(F_1, S)$ , correspondant à une augmentation de  $\eta$  avec  $F_1$  et  $S$ . Le type  $B_{min}$  est le plus efficace et le type A le moins, le type B se situe entre les deux.

Le ressaut forcé type  $B_{min}$  aurait donc tous les avantages : moindre hauteur aval, bassin plus court et efficacité plus grande. Mais cela ne va pas sans conséquence du point de vue de l'érosion du fond de la rivière à l'aval : les vitesses de l'écoulement près du fond sont élevées et peuvent engendrer sur le lit du cours d'eau une érosion dangereuse pour l'ouvrage. Ceci a été mis en évidence par les essais avec lit de gravier dans le canal avec et sans protection à l'aval du seuil (cf. §5.6).

A la suite, les recommandations suivantes sont proposées :

- 1) pour des cours d'eau avec lit facilement érodable, le ressaut forcé type A est nécessaire,
- 2) pour des cours d'eau avec lit peu érodable, le ressaut forcé type B est utilisable,
- 3) pour des cours d'eau avec lit très peu érodable, le ressaut forcé type  $B_{min}$  est possible.

Des principes de dimensionnement clairs ont été établis. Leur application est aisée. Une lacune est ainsi comblée dans la littérature en ce qui concerne les bassins amortisseurs avec seuil continu. Le deuxième but fixé est de la sorte atteint (cf. chapitre 1).

Le chapitre suivant résumera les principaux résultats obtenus par cette recherche sur le ressaut forcé par seuil.

RESSAUT HYDRAULIQUE  
FORCE PAR SEUIL

CHAPITRE 7

CONCLUSION



## C H A P I T R E 7

-----

### C O N C L U S I O N

#### 7.1 ENVIRONNEMENT

Le sujet de ce travail est le ressaut hydraulique forcé par seuil continu dans un canal horizontal prismatique de section rectangulaire. Il est rattaché au domaine de la dissipation d'énergie qui fait partie lui-même des constructions hydrauliques. Cette finalité d'aspect pratique inhérent à la science de l'ingénieur est restée constamment en point de mire. La recherche a été avant tout axée sur l'expérimentation et l'applicabilité des résultats obtenus. Ces résultats ont été élaborés par la théorie des écoulements dans des canaux découverts. Ainsi, la liaison entre les mesures sur des modèles réduits et des prototypes est garantie.

#### 7.2 RAPPEL DES OBJECTIFS

Les objectifs de cette recherche expérimentale sont :

- 1) approfondir la connaissance du ressaut forcé par seuil en tant que phénomène hydraulique, et
- 2) proposer des principes de dimensionnement pour les bassins amortisseurs avec seuil.

#### 7.3 PRINCIPAUX RESULTATS

##### 7.31 Connaissance du ressaut forcé par seuil

1) Une classification des différents types de ressaut forcé par seuil est présentée (Figure 4.1). Elle est plus complète que d'autres propositions. Le ressaut forcé type A, défini ci-après au point 4a), correspond pratiquement au ressaut classique (sans seuil), avec une moindre hauteur d'eau aval; en abaissant successivement le plan d'eau aval, le ressaut se

retire et diminue de longueur jusqu'à se transformer en une onde stationnaire au-dessus du seuil.

2) Pour le ressaut forcé type A, l'onde et trois types intermédiaires, la répartition de la composante horizontale des vitesse axiales est donnée (Figure 4.11). Elle met en évidence les zones des rouleaux de surface et de fond, là où les vitesses sont négatives. Plus la longueur du rouleau de surface diminue, plus les vitesses restent élevées près du fond et leurs directions sont inclinées autour du seuil. Du point de vue dissipateur efficace, trois types de ressaut forcé par seuil sont ainsi retenus : ils sont décrits au point 4) ci-dessous. Pour les cinq types de ressaut cités plus haut, la distribution axiale des pressions sur le fond montre que la force exercée sur la face amont du seuil est d'autant plus grande que le rouleau de surface est court, et que la pression chute fortement sur sa face supérieure, pouvant engendrer des souspressions (Figure 4.13).

3) Une analyse préliminaire a montré que la largeur du seuil n'a qu'une influence négligeable sur les hauteurs conjuguées, comparée à celle de sa hauteur (§4.3).

4) Une nouvelle classification, se basant non seulement sur les profils de surface mais aussi sur la répartition des vitesses près du fond à l'aval du seuil, est proposée. Trois types de ressaut forcé par seuil (§4.6) ont été retenus pour une étude détaillée du phénomène :

a) le ressaut type A défini comme ressaut pour lequel le rouleau de surface se termine au droit du seuil et dont la surface de l'eau est presque horizontale au-delà, en analogie au ressaut classique (sans seuil);

b) le ressaut type B, plus court que le type A, avec apparition momentanée d'un deuxième rouleau de surface à l'aval du seuil et dont les vitesses près du fond sont faibles; l'écoulement principal à l'aval reste proche de la surface:

c) le ressaut type  $B_{\min}$ , plus court que le précédent, avec la présence permanente du deuxième rouleau de surface complètement formé à l'aval; le courant principal est encore situé dans la partie supérieure de l'écoulement.

Pour passer du ressaut type A aux types B et  $B_{\min}$ , le plan d'eau aval est abaissé progressivement, en fixant l'écoulement amont et la dimension du seuil; en allant plus bas que le niveau correspondant au type  $B_{\min}$ , le courant principal au-delà du seuil est guidé vers le fond : ce cas correspond au ressaut forcé par seuil type C et n'est pas acceptable à cause de la très forte érosion qu'il peut engendrer à l'aval.

5) Une étude de la répartition transversale des vitesses a montré une différence significative seulement dans la zone du rouleau de fond à l'aval du seuil (Figures 5.3-5.4); ceci a conduit à une investigation de cette zone quant aux lignes de courant : les mouvements de l'écoulement à l'intérieur du rouleau de fond sont mis en évidence (Figures 5.5-5.7). Une esquisse de présentation illustrée du mouvement général de l'écoulement dans la zone à l'aval du seuil est proposée pour la meilleure compréhension de l'écoulement à l'intérieur du ressaut (Figure 5.8).

6) Une étude portant sur l'érosion possible à l'aval du seuil avec un lit meuble a montré l'importance de protéger le fond du cours d'eau (cf. Figures 5.9-5.11), même pour le ressaut forcé type A. En prolongeant le radier au-delà du seuil jusque vers l'extrémité du rouleau de fond, l'érosion est sensiblement diminuée, aussi pour le ressaut type  $B_{\min}$ . Pour le type C, elle est encore importante pour des lits facilement érodables, alors que pour le type A elle a pratiquement disparu. Avec des connaissances plus précises sur la qualité du lit d'un cours d'eau, le choix peut se porter sur l'un ou l'autre des types de ressaut forcé.

7) L'analyse des pressions statiques et dynamiques a abouti aux résultats suivants :

- a) la pression sur le fond ne correspond pas au niveau d'eau à cause de la présence d'air dans l'écoulement, mais la distribution de la pression statique à l'intérieur de l'écoulement a une pente égale à celle hydrostatique (Figures 5.13a-5.14a);
- b) la pression dynamique (ou charge) diminue très fortement dans la première moitié du ressaut (Figures 5.13b-5.14b); le seuil ne participe que peu à cette perte de charge mais il sert surtout à fixer la position du ressaut;

c) la répartition des pressions sur la face amont du seuil a une allure presque uniforme; elle a montré que la force sur le seuil est d'autant plus grande que le rouleau de surface est court (Figure 5.15). Sur la face aval, la pression a une distribution hydrostatique, légèrement inférieure à celle correspondant à la hauteur d'eau aval.

### 7.32 Principes de dimensionnement

1) Des essais préliminaires portant sur le ressaut classique ont permis de déterminer le rapport des hauteurs conjuguées  $Y=h_2/h_1$  en tenant compte de l'effet de frottement qui provoque un décalage vers le bas par rapport à la courbe de Bélanger  $Y_{RC}$  (cf. équ. 2.3). Une équation généralisée pour le ressaut classique a pu être approchée par :

$$(7.1) \quad Y = \sqrt{2} \cdot F_1 (1 - (E/1.7)) - 0.5$$

dans laquelle on reconnaît l'équation de Bélanger pour  $E=0$ , avec  $4 < F_1 < 14$ .  $E$  est défini par  $E=0.02712 \cdot \zeta \cdot \Lambda \cdot I$ , où  $\zeta$  est un facteur de correction,  $I=I(Y, \omega)$  une solution numérique de l'intégrale définie du frottement,  $\Lambda$  le paramètre hydraulique défini par  $\Lambda = (v/q)^{1/4} \cdot \lambda_R \cdot \omega^{-1/16}$ , avec  $v$  la viscosité cinématique,  $q$  le débit spécifique par unité de largeur,  $\lambda_R$  la longueur relative du rouleau et  $\omega$  le paramètre géométrique défini par  $\omega = h_1/B$ , avec  $h_1$  la hauteur d'eau au pied du ressaut et  $B$  la largeur du canal. L'équ. (7.1) peut donc s'exprimer sous la forme  $Y = Y(F_1, \Lambda, \omega)$ .

L'effet de frottement  $\Delta Y_f$  sur les hauteurs conjuguées peut alors s'écrire sur la base de l'équ. (7.1) :

$$(7.2) \quad \Delta Y_f = \sqrt{2} F_1 (E/1.7)$$

et s'exprime donc sous la forme  $\Delta Y_f = \Delta Y_f(F_1, \Lambda, \omega)$ .

Une limite  $\Lambda_\lambda$  du paramètre hydraulique a été déterminée pour laquelle l'effet de frottement peut être considéré comme négligeable; elle est approchée par  $\Lambda_\lambda = 1.382 / (1 + 3.8\omega)$ . Pour  $\Lambda < \Lambda_\lambda$ , on peut donc négliger l'effet du frottement.

2) Les hauteurs conjuguées du ressaut forcé pour diverses hauteurs relatives  $S=s/h_1 < 4$  du seuil sont approchées par des courbes parallèles à celle de référence du ressaut classique (équ. 6.5-6.7), en tenant compte de l'effet de frottement comme retrouvé sur le modèle. Lorsque  $S$  augmente, l'écart entre les diverses courbes diminue. L'effet du seuil  $\Delta Y_S$  sur les hauteurs conjuguées est mis en évidence et s'est avéré ne dépendre que de  $S$  :

$$(7.3) \quad \Delta Y_S = \alpha \cdot S^\beta,$$

où  $\alpha$  et  $\beta$  sont donnés pour les trois types de ressaut par :

	Type A	Type B	Type B <sub>min</sub>
$\alpha$	0.40	0.60	0.85
$\beta$	0.85	0.75	0.65

Dans tous les cas, le rapport des hauteurs conjuguées pour le ressaut forcé par seuil est inférieur à celui du ressaut classique correspondant (équ. 6.12).

3) Les deux effets du frottement  $\Delta Y_f$  (caractérisé par le nombre de Froude et les paramètres géométrique  $\omega$  et hydraulique  $\Lambda$ ) et du seuil  $\Delta Y_S$  (caractérisé par la hauteur relative  $S$  du seuil et le type de ressaut forcé) ont ainsi pu être séparés. L'application des résultats concernant les hauteurs conjuguées a été vérifiée par une deuxième série d'essais (Figure 6.8) réalisés dans une échelle d'un ordre de grandeur élevé : ils ont confirmé la validité des résultats présentés auparavant. Les hauteurs conjuguées du ressaut forcé par seuil sont ainsi exprimées par une équation généralisée sous la forme  $Y_S = Y_{RC}(F_1, \omega, \Lambda, S)$  qui se différencie de l'équ. (7.2) du ressaut classique par l'apparition de la hauteur relative du seuil  $S$ . Cette relation peut s'écrire de la manière suivante pour faire ressortir les deux effets du frottement et du seuil

$$(7.4) \quad Y_S = Y_{RC} - \Delta Y_f - \Delta Y_S.$$

4) Les longueurs relatives  $\lambda_S=L_S/h_1$  fixant la position du seuil par rapport au pied du ressaut et  $\lambda_B=L_B/h_1$  la distance entre celui-ci et la fin du rouleau de fond, sont approchées par des droites :

$$(7.5) \quad \lambda_i = \alpha \cdot F_1 + \beta,$$

où  $i$  indique soit la position du seuil ( $\lambda_S$ ) soit la longueur du bassin ( $\lambda_B$ ),  $\alpha$  et  $\beta$  sont des facteurs dépendant du type de ressaut forcé par seuil :

	$\lambda_S$		$\lambda_B$	
	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
Type A	6.27	-5.75	8.68	-11.23
Type B	5.29	-5.37	8.44	-12.97
Type B <sub>min</sub>	4.64	-4.84	6.93	-6.83

Les longueurs du ressaut forcé par seuil sont dans tous les cas inférieures à celles du ressaut classique correspondant, pour le domaine  $4 < F_1 < 14$  (Figure 6.12). Il est à noter que les longueurs sont indépendantes de la hauteur relative  $S$ .

5) L'efficacité d'un dissipateur à seuil est d'autant plus élevée que  $S$  est important (Figure 6.11) et toujours supérieure à celle du ressaut classique. D'autre part, elle est la plus grande pour le ressaut forcé type B<sub>min</sub>, puis pour le type B et enfin pour le type A.

6) Comparé au ressaut classique dans des conditions amont identiques, le ressaut forcé par seuil a donc prouvé ses avantages : il requiert une moindre hauteur d'eau aval, la longueur de bassin nécessaire est inférieure et son efficacité est plus élevée.

7) Les résultats présentés permettent de dimensionner un bassin amortisseur avec seuil dans son ensemble lorsque les caractéristiques de l'écoulement à l'amont et à l'aval sont connues (cf. exemple au §6.6).

RESSAUT HYDRAULIQUE  
FORCE PAR SEUIL

CHAPITRE 8

ANNEXES



## 8.1 BIBLIOGRAPHIE

-----

- [01] ARANDJELOVIC, D., "Hydrodynamic loading of sill", Proc. of the Intern. Conf. HYDROSOFT 84, 1984.
- [02] BAHKMETEFF, B.A., MATZKE, A.E., "The hydraulic jump in terms of dynamic similarity", Trans. ASCE, vol. 101, 1936, 630-680.
- [03] BASCO, D.R., "Optimized geometry for baffle blocks in hydraulic jumps", Proc. XIV IAHR Congress, Paris, 1971, vol. 2, B18,1-8.
- [04] BERRYHILL, R.H., "Stilling basin experiences of the Corps of Engineers", Proc. ASCE, J. Hydr. Div., vol. 83, 1957, 1264/1-36, 1456/25.
- [05] BOCK, J., "Einfluss der Querschnittsform auf die Widerstandsbeiwerte offener Gerinne", Technischer Bericht 2, Inst. Hydromechanik und Wasserbau, TH Darmstadt, éd. O. Kirschmer, Darmstadt, 1966.
- [06] BRADLEY, J.N., PETERKA, A.J., "The hydraulic design of stilling basins : hydraulic jumps on a horizontal apron (Basin I)", Proc. ASCE, J. Hydr. Div., vol 83, 1957, 1401/1-24.
- [07] BRESSE, J.A.C., "Cours de mécanique appliquée. Seconde partie : Hydraulique", Mallet-Bachelier, Paris, 1860.
- [08] BRETZ, N.V., "Dissipation d'énergie à l'aval d'un évacuateur", Ingénieurs et architectes suisses, vol. 3, 1985, 39-46.
- [09] CHOW, V.T., "Open channel Hydraulics" McGraw-Hill, New-York, 1959.
- [10] CITRINI, D., "Il salto di Bidone", L'Energia Elettrica, 1939, 441-465, 517-527.

- [11] COMMITTEE ON HYDRAULIC STRUCTURES, "Energy dissipators for spillway and outlet works", Proc. ASCE, vol. 90, 1964, HY1 121-147, HY4 359-363, HY5 201-222; vol. 91, 1965, HY2 292-300.
  
- [12] ELEVATORSKI, E.A., "Hydraulic energy dissipators", McGraw-Hill, New-York, 1959.
  
- [13] FORSTER, J.W., SKRINDE, R.A., "Control of the hydraulic jump by sills", Trans. ASCE, vol. 115, 1950, 973-1022.
  
- [14] GIBSON, A.H., "The formation of standing waves in an open channel", Minutes of Proc. of the Inst. of Civil Eng., vol. CXCVII, 1914, 233-242.
  
- [15] HAGER, W.H., "B-jumps at abrupt channel drops", Proc. ASCE, J. Hydr. Eng., vol. 111, 1985, 861-866.
  
- [16] HAGER, W.H., "Fließformeln für turbulente Strömungen", Wasserwirtschaft, Heft 2, 1988.
  
- [17] HAGER, W.H., BASLER, B., WANOSCHEK, R., "Incipient jump condition for ventilated sill flow", Proc. ASCE, J. Hydr. Eng., vol. 112, 1986, 953-963.
  
- [18] HAGER, W.H., BRETZ, N.V., "Hydraulic jump at positive and negative steps", J. Hydr. Research, vol. 24, 1986, 237-254; vol. 25, 1987, 407-413.
  
- [19] HAGER, W.H., BRETZ, N.V., "Geschwindigkeits-Messung unter beträchtlicher Stromlinienkrümmung und hoher Geschwindigkeit", Wasser-Energie-Luft, vol. 78, 1986, 272-276.
  
- [20] HAGER, W.H., SINNIGER, R., "Flow characteristics of the hydraulic jump in a stilling basin with an abrupt bottom rise", J. Hydr. Research, vol. 23, 1985, 101-113; vol. 24, 1986, 207-215.
  
- [21] HAGER, W.H., WANOSCHEK, R., "The hydraulic jump in triangular channels", J. Hydr. Research, vol. 25, 1987.

- [22] HARLEMAN, D.R.F., "Effect of baffle piers on stilling basin performance", J. Boston Soc. of Civil Eng., 1955, 84-99.
  
- [23] HERBRAND, K., "Der Wechselsprung unter dem Einfluss der Luftbeimischung", Die Wasserwirtschaft, Heft 9, 1969, 254-260.
  
- [24] IDEL'CIK, I., "Memento des pertes de charge", Eyrolles, Paris, 1968.
  
- [25] IWASA, Y., NAGAKAWA, H., NAKANO, A., "Several features of hydraulic jump formed by weir with trapezoidal section", Proc. XI IAHR Congress, Leningrad, 1965, vol.1, 1.36.
  
- [26] KARKI, K.S., "Supercritical flow over sills", Proc. ASCE, J. Hydr. Div., vol. 102, 1976, HY10 1449-1459; vol. 103, 1977, HY3 584-585.
  
- [27] KARKI, K.S., CHANDER, S., MALHOTRA, R.C., "Supercritical flow over sills at incipient jump conditions", Proc. ASCE, J. Hydr. Div., vol. 98, 1972, HY10 1753-1764; vol. 99, 1973, HY8 1278-1279; vol. 100, 1974, HY3 481-482.
  
- [28] KENNISON, K.R., "The hydraulic jump in open channel flow at high velocity", Trans. ASCE, vol. 42, 1916, 338-420.
  
- [29] KHADER, M.H.A., ELANGO, K., "Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump", J. Hydr. Research, vol. 12, 1974, 469-489.
  
- [30] MACHA, L., "Untersuchungen über die Wirksamkeit von Tosbecken", Thèse présentée à la T.U. Berlin, Mittl. 61, 1963.
  
- [31] McCORQUODALE, J.A., REGTS, E.H., "A theory for the forced hydraulic jump", Trans. of the Eng. Inst. of Canada, vol. 11, no C-1, 1968.
  
- [32] MOORE, W.L., MORGAN, C.W., "Hydraulic jump at an abrupt drop", Trans. ASCE, vol. 124, 1959, 507-524.

- [33] NARAYANAN, R., SCHIZAS, L.S., "Force fluctuations on sill of hydraulic jump", Proc. ASCE, J. Hydr. Div., vol. 106, 1980, HY4 589-599.
- [34] OTHSU, I., "Forced hydraulic jump by a vertical sill", Trans. Japan Soc. Civ. Eng., vol. 13, 1981, 165-168.
- [35] PILLAI, N.R., UNNY, T.E., "Shapes for appurtenances in stilling basins", Proc. ASCE., J. Hydr. Div., vol. 90, 1964, HY3 1-21, HY6 343-347; vol. 91, 1965, HY1 164-166, HY5 135-139.
- [36] RAJARATNAM, N., "The forced hydraulic jump", Water Power, 1964, Jan. 14-19, Febr. 61-65.
- [37] RAJARATNAM, N., "The hydraulic jump", Advances in Hydrosciences, ed. V.T. Chow, vol. 4, Academic Press, New-York, 1967, 197-280.
- [38] RAJARATNAM, N., "Hydraulic jump on rough beds", Trans. Eng. Inst. of Canada, vol. 11, 1968, A-2/I-VII.
- [39] RAJARATNAM, N., SUBRAMANYA, K., "Profile of the hydraulic jump", Proc. ASCE, J. Hydr. Div., vol. 94, 1968, HY3 663-673; vol. 95, 1969, HY1 546-557, HY2 725-727; vol. 96, 1970, HY2 579-581.
- [40] RAJARATNAM, N., MURAHARI, V., "A contribution to forced hydraulic jumps", J. Hydr. Research, vol. 9, 1971, 217-239.
- [41] RAND, W., "An approach to generalized design of stilling basins", Trans. New-York Academy of Sciences, vol. 20, 1957, 2, 173-191.
- [42] RAND, W., "Flow over a vertical sill in an open channel", Proc. ASCE, J. Hydr. Div., vol. 91, 1965, HY4 97-122.
- [43] RAND, W., "Flow over a dentated sill in an open channel", Proc. ASCE, J. Hydr. Div., vol. 92, 1966, HY5 135-153; vol. 93, 1967, HY3 229-230; vol. 94, 1968, HY1 307-308.

- [44] RAND, W., "Efficiency and stability of forced hydraulic jump", Proc. ASCE, J. Hydr. Div., vol. 93, 1967, HY4 117-127; vol. 94, 1968, HY3 774, HY6 1529-1530.
- [45] RAND, W., "Sill-controlled flow transitions and extent of erosion", Proc. ASCE, J. Hydr. Div., vol. 96, 1970, HY4 927-939.
- [46] RANGA RAJU, K.G., KITAAL, M.K., VERMA, M.S., GANESHAN, V.R., "Analysis of flow over baffle blocks and end sills", J. Hydr. Research, vol. 18, 1980, 227-241.
- [47] RESCH, F.J., LEUTHEUSSER, H.J., "Mesures de turbulence dans le ressaut hydraulique", La Houille Blanche, vol. 26, 1971, 17-31.
- [48] RESCH, F.J., LEUTHEUSSER, H.J., "Mesures de tensions de Reynolds dans le ressaut hydraulique", J. Hydr. Research, vol. 10, 1972, 409-428.
- [49] ROUSE, H., INCE, S., "History of hydraulics", Iowa Inst. of Hydr. Res., The University of Iowa, Iowa City, Iowa, 1957.
- [50] ROUSE, H., SIAO, T.T., NAGARATNAM, S., "Turbulence characteristics of the hydraulic jump", Trans. ASCE, vol. 124, 1959, 926-966.
- [51] SAFRANEZ, K., "Wechselsprung und die Energievernichtung des Wassers", Der Bauingenieur, Heft 49, 1927, 898-905.
- [52] SAFRANEZ, K., "Untersuchungen über den Wechselsprung", Der Bauingenieur, Heft 37, 1929, 649-651; Heft 38, 1929, 668-678.
- [53] SAFRANEZ, K., "Energieverzehrung der Deckwalze", Der Bauingenieur, Heft 20, 1930, 352-355.
- [54] SAFRANEZ, K., "Länge des Wassersprunges", Wasserkraft und Wasserwirtschaft, Heft 24, 1933, 277-282.

- [55] SCHEUER, L., "Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Kavitationsbeginn an Oberflächenrauheiten", Mittl. Inst. für Wasserbau und Wasserwirtschaft, R.W.T.H. Aachen, Mitt. 57, 1985.
- [56] SCHROEDER, R., "Die turbulente Strömung im freien Wechselfprung", Inst. für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Mittl. 59, TU Berlin, Ed. H. Press, Berlin, 1963.
- [57] SHARP, J.J., "Observations on hydraulic jumps at rounded steps", Proc. ASCE, J. Hydr. Div., vol. 100, 1974, HY6 787-795.
- [58] SHUKRY, A., "The efficacy of floor sills under drowned hydraulic jumps", Proc. ASCE, J. Hydr. Div., vol. 83, 1957, HY3 1260/1-18, HY5 1417/31, HY6 1456/15-23.
- [59] SILVESTER, R., "Hydraulic jump in all shapes of horizontal channels", Proc. ASCE, J. Hydr. Div., vol. 90, 1964, HY1 23-55, HY4 339-358, HY5 177-186, HY6 265-268.
- [60] SINNIGER, R., HAGER, W.H., "Constructions hydrauliques - écoulements stationnaires", éd. PPR, Lausanne, à paraître 1988.
- [61] STEIN, U., "Zur Untersuchung der Strömungskavitation unter Berücksichtigung von Turbulenz, Wirbelbildung und Blasendynamik", Mittl. 43, Inst. Wasserbau und Wasserwirtschaft, R.W.T.H. Aachen, 1982.
- [62] STEVENS, "Determining the energy lost in the hydraulic jump", Eng. News-Record, vol. 94, 1925, 23, 928-929; vol. 98, 1927, 3, 126; 13, 538-539.
- [63] VISCHER, D., "Energievernichter im Wasserbau", Schweizer Ingenieur und Architekt, vol. 102, 1984, Heft 40.

## 8.2 ETALONNAGE DE LA SONDE DE PRESSION

-----

La sonde de pression est soumise à des essais préliminaires en vue d'étudier l'influence de l'angle par rapport à l'écoulement sur les mesures. L'angle dans le plan vertical et celui dans le plan horizontal sont traités séparément. De plus, des mesures de pressions dynamique et statique le long du canal sont présentées pour différents écoulements. Les valeurs mesurées lors de l'étalonnage sont données à la fin du §8.2.

### 8.21 Influence de l'angle $\theta$

L'angle dans le plan horizontal  $\theta$  varie pour ces essais entre  $-30^\circ$  et  $+30^\circ$ . La sonde est positionnée en un point dans l'écoulement et les mesures sont effectuées, pour quatre cas d'écoulement. Les pressions statiques  $\Delta h(\theta) = h(\theta)/h(\theta=0)$  sont présentées à la Figure 8.2.1. Pour les plus faibles vitesses,  $\Delta h > 1$  pour  $\theta \leq \pm 20^\circ$ , i.e. la pression statique augmente avec l'angle pour ces valeurs. Pour les autres vitesses, la pression décroît de façon presque symétrique dès que  $\theta$  varie, la souspression sur le tube de Prandtl étant supérieure à la surpression lorsque ce dernier est de biais par rapport aux lignes de courant. Pour les grandes vitesses, la pression est très sensible à l'orientation de la sonde. Pour  $\Delta h > 0.95$ , l'angle  $\theta$  peut varier de  $\pm 10^\circ$  : c'est le domaine de validité accepté.

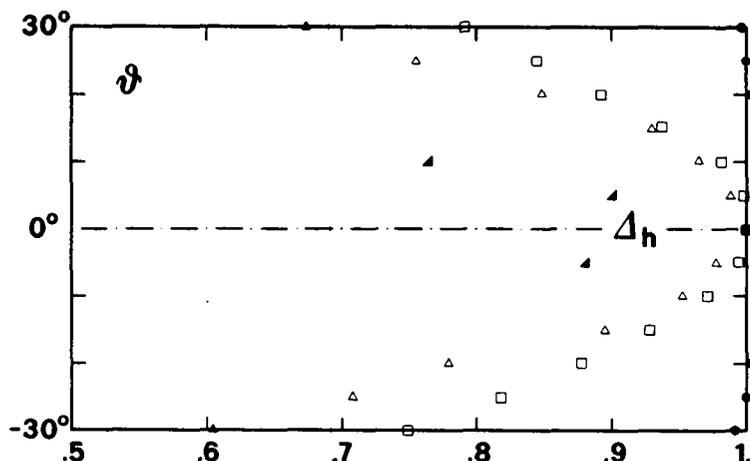


Figure 8.2.1 : Tarage de la sonde de pression. Pressions statiques  $\Delta h(\theta) = h(\theta)/h(\theta=0)$  avec variation de l'angle  $\theta$  dans le plan horizontal. Notations : cf. Figure 8.2.3.

Les pressions dynamiques  $\Delta H(\theta)=H(\theta)/H(\theta=0)$  sont montrées à la Figure 8.2.2. Plus la vitesse augmente, plus  $\Delta H$  croît avec l'angle, presque symétriquement. Le domaine utilisable  $\Delta H > 0.95$  correspond à  $\theta < \pm 20^\circ$ . La pression dynamique est moins sensible à l'orientation de la sonde que celle statique. Pour la première, l'orifice se situe à l'extrémité amont de la sonde et sa surface diminue avec l'angle par rapport au sens de l'écoulement, alors que pour la deuxième, c'est la différence entre les souspression et surpression de part et d'autre du tube qui intervient.

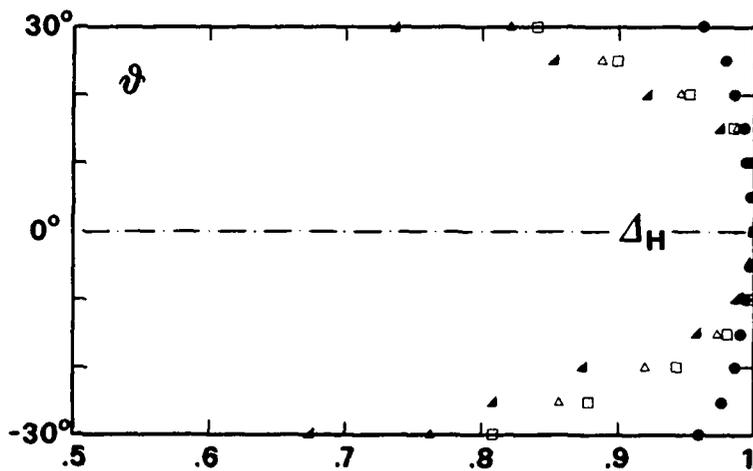


Figure 8.2.2 : Tarage de la sonde de pression. Pressions dynamiques  $\Delta H(\theta)=H(\theta)/H(\theta=0)$  avec variation de l'angle  $\theta$  dans le plan horizontal. Notations : cf. Figure 8.2.3.

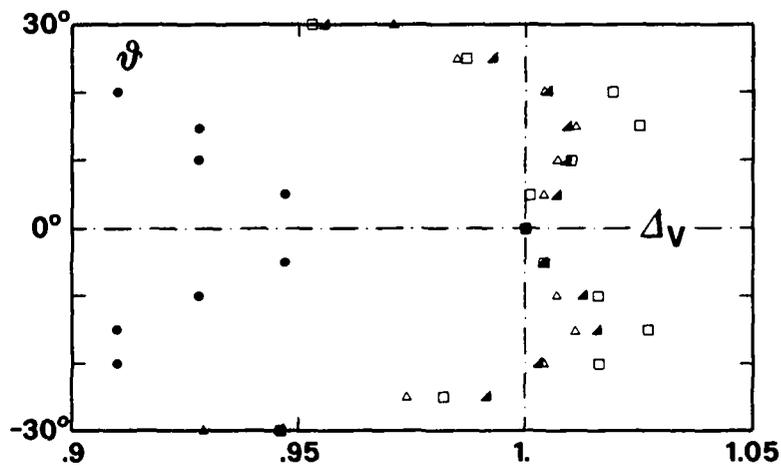


Figure 8.2.3 : Tarage de la sonde de pression. Vitesses  $\Delta V=V(\theta)/V(\theta=0)$  avec variation de l'angle  $\theta$  dans le plan horizontal. Notations : ( $\blacktriangle$ ) vitesse moyenne  $V=3.83$  m/s, ( $\square$ ) 2.66, ( $\bullet$ ) 0.75, ( $\triangle$ ) 1.65.

Les vitesses relatives  $\Delta V(\theta) = V(\theta)/V(\theta=0)$ , avec  $V = \sqrt{2g(H-h)}$ , sont indiquées à la Figure 8.2.3. Vu que la pression statique diminue plus rapidement que celle dynamique, la vitesse relative  $\Delta V$  augmente d'abord pour  $\theta \leq \pm 15^\circ$  puis décroît au-delà. Le domaine de validité correspond à  $\theta \leq \pm 25^\circ$ , sauf dans le cas de la plus faible vitesse.

## 8.22 Influence de l'angle $\phi$

La même procédure que pour l'angle  $\theta$  est répétée pour l'angle  $\phi$  dans le plan vertical. La mesure de pression n'est pas possible pour certains angles à cause des dimensions de la sonde. Les figures ci-dessous sont donc incomplètes, mais, en analogie avec celles pour l'angle  $\theta$ , les diagrammes peuvent être complétés par symétrie de façon satisfaisante.

La Figure 8.2.4 présente les pressions statiques relatives  $\Delta h(\phi)$ . Plus la vitesse de l'écoulement augmente, plus  $\Delta h$  diminue rapidement avec l'angle, de manière comparable à la Figure 8.2.1 pour l'angle  $\theta$ , avec les mêmes remarques.

La Figure 8.2.5 montre les pressions dynamiques relatives  $\Delta H(\phi)$ . La ressemblance avec la Figure 8.2.2 est manifeste, à part quelques valeurs supérieures à 1 pour les grandes vitesses. Le domaine utilisable  $\Delta H > 0.95$  correspond à  $\phi \leq \pm 15^\circ$ .

Les vitesses relatives  $\Delta V(\phi)$  sont présentées à la Figure 8.2.6. Comme la pression statique décroît plus rapidement que la pression dynamique,  $\Delta V$  augmente d'abord pour  $\phi \leq \pm 10^\circ$ , puis diminue d'autant plus vite que l'angle croît. L'intervalle de confiance à 5% correspond à  $\phi \leq \pm 25^\circ$ , même pour les faibles vitesses contrairement à ce qui se passe avec l'angle  $\theta$ .

En comparant l'effet des angles  $\theta$  et  $\phi$ , il ressort que le domaine de confiance de 5% correspond dans les deux cas à une variation de l'angle de  $\pm 25^\circ$ , excepté pour les faibles vitesses avec  $\theta$ . Ce qui signifie que, lors d'une mesure de vitesse avec la sonde de pression, une erreur de quelques degrés dans le positionnement de la sonde n'influence que peu le résultat.

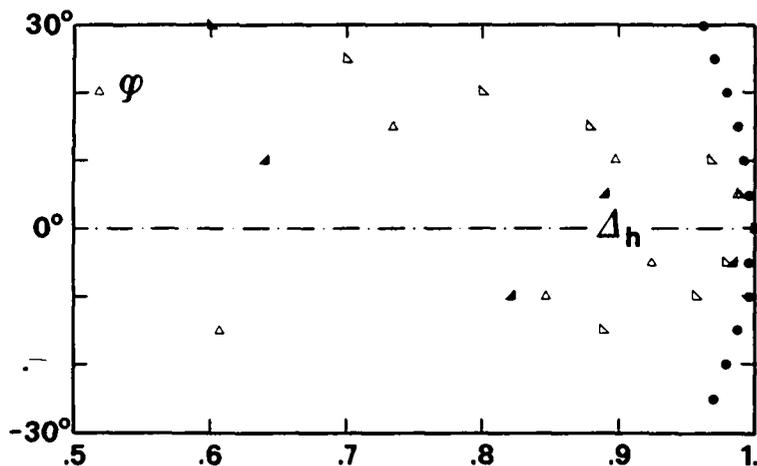


Figure 8.2.4 : Comme Fig. 8.2.1 avec variation de l'angle  $\phi$  dans le plan vertical. Notations : cf. Figure 8.2.6.

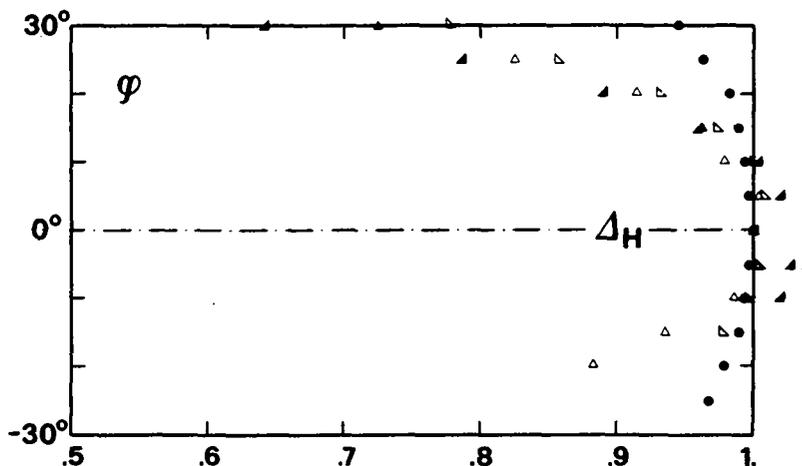


Figure 8.2.5 : Comme Fig. 8.2.2 avec variation de l'angle  $\phi$  dans le plan vertical. Notations : cf. Figure 8.2.6.

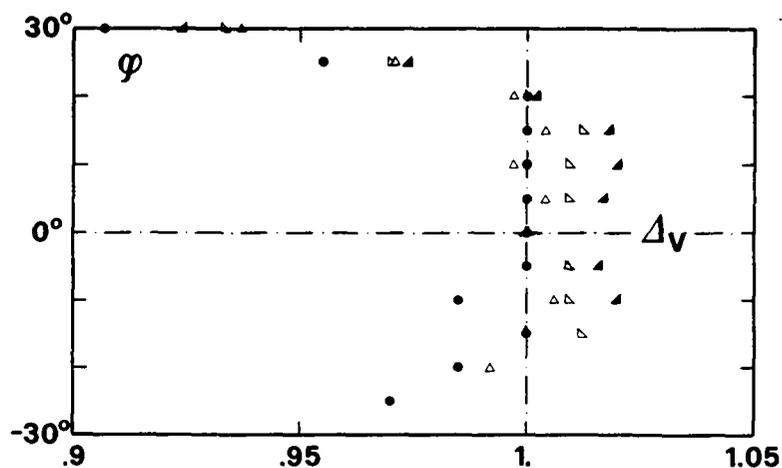


Figure 8.2.6 : Comme Fig. 8.2.3 avec variation de l'angle  $\phi$  dans le plan vertical. Notations : ( $\blacktriangle$ ) vitesse moyenne  $V=3.58$  m/s, ( $\bullet$ ) 0.817, ( $\blacktriangledown$ ) 1.82, ( $\triangle$ ) 2.77.

### 8.23 Lignes de charge et de pression le long du canal

Les pressions dynamique (charge) et statique (pression) sont analysées le long du canal entre les positions  $x=5.0$  m et  $x=12.0$  m. Les résultats sont présentés à la Figure 8.2.7 pour les débits  $Q=40, 60, 100$  et  $160$  l/s. Les pertes de charge sont d'autant plus grandes que les débits, donc les hauteurs sont faibles : 15% pour 160 l/s et 62% pour 40 l/s. Les lignes de charge sont des courbes à tendance générale décroissante, dont la pente diminue avec la coordonnée longitudinale.

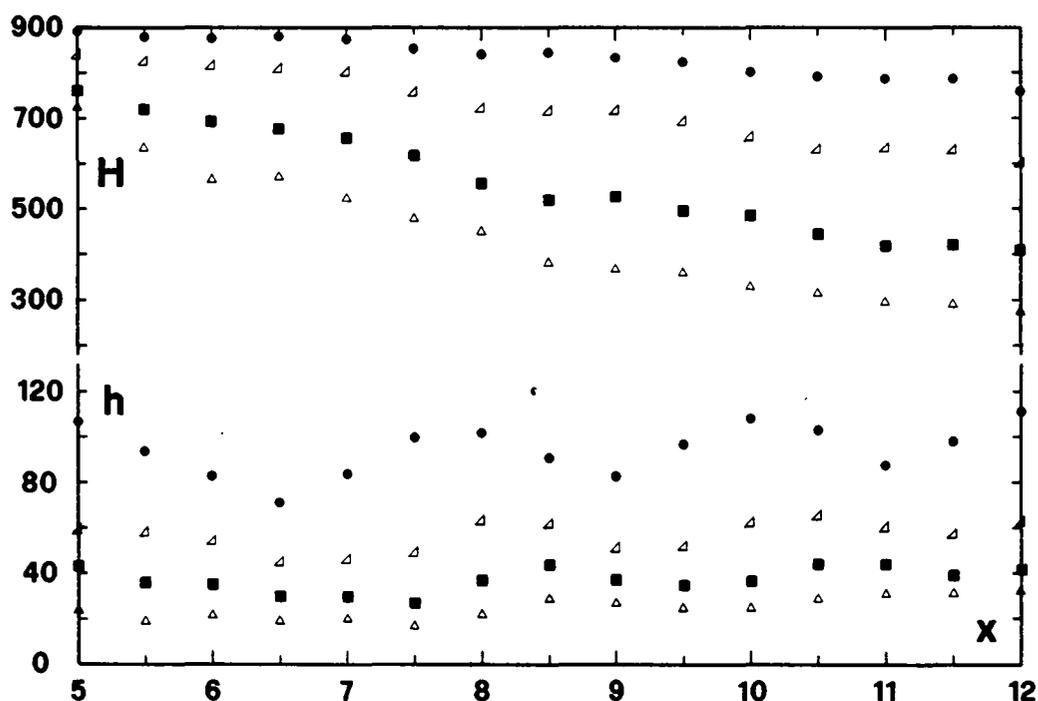


Figure 8.2.7 : Lignes de charge  $H$  et de pression  $h$  le long du canal pour les débits (●) 160 l/s, (△) 100 l/s, (■) 60 l/s, (▲) 40 l/s; les échelles verticales sont différentes pour  $H$  et  $h$ .

Les lignes de pression sont beaucoup plus irrégulières et ce d'autant plus que le débit est élevé. Ceci est dû principalement aux ondes de choc engendrées sur le déversoir et qui se propagent le long du canal en diagonale, d'où les hauts et les bas des lignes de pression. La tendance générale des lignes est l'augmentation de l'amont vers l'aval, en correspondance avec les pertes de charge.

Table 8.2.1 : Mesures pour l'angle  $\theta$ .

V m/s	$\theta$	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
3.83	H mm	540	647	700	767	790	800	800	805	802	780	738	683	590
	h mm	-130	-90	-53	-6	21	45	51	46	39	18	-18	-55	-95
	$\Delta H$	0.68	0.81	0.88	0.96	0.99	1.00	1.00	1.01	1.00	0.98	0.92	0.85	0.74
	$\Delta h$	-2.55	-1.76	-1.04	-0.12	0.41	0.88	1.00	0.90	0.76	0.35	-0.35	-1.08	-1.86
	$\Delta V$	0.946	0.992	1.003	1.016	1.013	1.004	1.000	1.007	1.009	1.009	1.005	0.993	0.956
2.66	H mm	705	765	821	854	868	871	871	871	869	857	830	783	732
	h mm	382	417	448	473	495	507	510	509	501	478	455	431	404
	$\Delta H$	0.81	0.88	0.94	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	0.95	0.90	0.84
	$\Delta h$	0.75	0.82	0.88	0.93	0.97	0.99	1.00	1.00	0.98	0.94	0.89	0.85	0.79
	$\Delta V$	0.946	0.982	1.016	1.027	1.016	1.004	1.000	1.001	1.010	1.025	1.019	0.987	0.953
0.75	H mm	280	285	288	289	290	291	292	291	290	290	288	286	281
	h mm	261	263	264	265	265	265	263	265	265	265	264	263	262
	$\Delta H$	0.96	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.98	0.96
	$\Delta h$	0.99	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01	1.00	1.01	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00
	$\Delta V$	0.809	0.871	0.910	0.910	0.928	0.947	1.000	0.947	0.928	0.928	0.910	0.891	0.809
1.65	H mm	171	192	206	218	222	223	224	224	223	221	212	199	184
	h mm	52	61	67	77	82	84	86	85	83	80	73	65	58
	$\Delta H$	0.76	0.86	0.92	0.97	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.95	0.89	0.82
	$\Delta h$	0.60	0.71	0.78	0.90	0.95	0.98	1.00	0.99	0.97	0.93	0.85	0.76	0.67
	$\Delta V$	0.929	0.974	1.004	1.011	1.007	1.004	1.000	1.004	1.007	1.011	1.004	0.985	0.956

Table 8.2.2 : Mesures pour l'angle  $\phi$ .

V m/s	$\phi$	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
3.58	H mm	-	-	-	-	867	865	860	868	861	815	760	685	562
	h mm	-	-	-	-	80	87	87	83	56	24	-12	-59	-108
	$\Delta H$	-	-	-	-	1.008	1.006	1.000	1.009	1.001	0.948	0.884	0.797	0.653
	$\Delta h$	-	-	-	-	0.920	1.000	1.000	0.954	0.644	0.276	-0.138	-0.678	-1.241
	$\Delta V$	-	-	-	-	1.009	1.003	1.000	1.008	1.020	1.012	0.999	0.981	0.931
0.817	H mm	-	262	265	268	269	270	271	270	269	268	266	261	256
	h mm	-	230	232	234	236	236	237	236	235	234	232	230	228
	$\Delta H$	-	0.97	0.98	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.96	0.94
	$\Delta h$	-	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96
	$\Delta V$	-	0.970	0.985	1.000	0.985	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.955	0.907
1.82	H mm	-	-	-	253	258	260	259	261	259	252	241	222	201
	h mm	-	-	-	80	86	88	90	89	87	79	72	63	54
	$\Delta H$	-	-	-	0.98	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	0.97	0.93	0.86	0.78
	$\Delta h$	-	-	-	0.89	0.96	0.98	1.00	0.99	0.97	0.88	0.80	0.70	0.60
	$\Delta V$	-	-	-	1.012	1.009	1.009	1.000	1.009	1.009	1.012	1.000	0.970	0.933
2.77	H mm	-	-	415	439	463	471	470	472	460	452	430	388	341
	h mm	-	-	30	48	67	73	79	78	71	58	41	19	-2
	$\Delta H$	-	-	0.88	0.93	0.99	1.00	1.00	1.00	0.98	0.96	0.91	0.83	0.73
	$\Delta h$	-	-	0.38	0.61	0.85	0.92	1.00	0.99	0.90	0.73	0.52	0.24	-0.03
	$\Delta V$	-	-	0.992	1.000	1.006	1.009	1.000	1.004	0.997	1.004	0.997	0.971	0.937

Table 8.2.3 : Mesures le long du canal

Q	100 l/s		40 l/s		160 l/s		60 l/s	
x	H	h	H	h	H	h	H	h
m	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
5.0	839	59	725	24	890	107	762	43
5.5	824	58	634	19	879	94	719	36
6.0	816	54	564	22	874	83	693	35
6.5	810	45	570	19	879	71	677	30
7.0	800	46	525	20	875	84	656	30
7.5	757	49	478	17	853	100	618	27
8.0	722	63	451	22	840	102	553	37
8.5	714	62	381	29	844	91	520	44
9.0	715	51	366	27	832	83	529	37
9.5	692	52	361	25	826	97	495	35
10.0	658	62	328	25	800	108	483	37
10.5	630	65	313	29	792	103	444	44
11.0	633	60	296	31	787	88	418	44
11.5	630	57	289	31	787	98	422	39
12.0	600	62	275	32	759	111	411	42

### 8.3 EFFET DE FROTTEMENT SUR LES HAUTEURS CONJUGUEES DU RESSAUT CLASSIQUE

-----

#### 8.31 Introduction

L'équation de Bélanger (2.3) exprime le rapport des hauteurs conjuguées  $Y=h_2/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , en admettant que la force de frottement est négligeable. Comme démontré par Bradley [06], entre autres, et également par les essais décrits au §3.5, cette équation peut être considérée comme une bonne approximation de la réalité si la hauteur d'eau  $h_1$  est suffisamment grande et si la rugosité du canal est faible. Typiquement, la hauteur d'eau  $h_1$  devrait être plus grande que  $h_1 > 50$  mm .

Par contre, pour  $h_1$  plus petit, comme rencontré dans les essais présentés au §3.6, l'effet de frottement ne semble plus être négligeable. Le but de cette annexe est de quantifier cet effet en admettant un écoulement dans le domaine hydrauliquement lisse ou transitoire.

#### 8.32 Force de frottement

Avec  $W$  comme force de frottement entre les sections "1" et "2" du volume de contrôle, et  $\bar{W}=2W/(\rho g B h_1^2)$  comme force relative à la pression hydrostatique amont, l'équation de la quantité de mouvement s'écrit :

$$(8.3.1) \quad 1 + 2 F_1^2 = Y^2 + \frac{2 F_1^2}{Y} + \bar{W},$$

où  $F_1 = V_1 / (\sqrt{g h_1})$  est le nombre de Froude amont. La force de frottement peut être représentée par :

$$(8.3.2) \quad W = \rho g B \int_0^L f h(x) dx$$

où  $L$  est la longueur du ressaut à considérer. Parce que dans les essais exécutés la longueur du ressaut  $L_j$  n'a pas pu être évaluée avec suffisamment de précision et que la pente de

frottement  $J_f$  décroît fortement avec la vitesse  $V=q/(Bh)$ , la longueur du rouleau  $L_R$  sera prise en considération par la suite, telle que  $L=L_R$ . Ainsi la force de frottement  $W$  sera légèrement trop petite.

La fonction  $h(x)$  correspond à l'épaisseur de la lame d'eau de l'écoulement principal sous le rouleau de surface dans le ressaut classique. Cette définition se base sur la mise en valeur de la pente de frottement qui tient compte de la vitesse moyenne. Comme démontré au §3.5, la fonction  $y(\chi)$  où  $y=h/h_1$  et  $\chi=x/L_R$ , peut être approchée par :

$$(8.3.3) \quad y(\chi) = 1 + (Y-1)\chi^3.$$

L'écoulement dans un ressaut hydraulique est évidemment loin d'être un écoulement uniforme dans un canal découvert, pour lequel :

$$(8.3.4) \quad J_f = f \cdot \frac{V^2}{2g} \cdot \frac{1}{4R_h}.$$

Cependant, à défaut d'autres modèles de calcul, cette formulation est retenue également pour la description de la pente de frottement dans le ressaut. Pour des écoulements turbulents dans le régime pratiquement lisse et à des nombres de Reynolds plus petits que  $10^5$ , l'équation de Blasius modifiée

$$(8.3.5) \quad f = \zeta \cdot \frac{0.316}{R^{1/4}}$$

s'applique, où  $\zeta > 1$  est un facteur de correction qui tient compte (1) de l'écoulement dans le domaine hydrauliquement transitoire et (2) de la modification de l'écoulement à rouleau de surface comme rencontré dans un ressaut.

L'équation (8.3.5) avec  $R = 4R_h V / \nu$  s'applique uniquement pour des écoulements dans des conduites en charge. Cependant, en définissant

$$(8.3.6) \quad R = (4f_0 R_h V) / \nu$$

où

$$(8.3.7) \quad f_0 = (9/8)(R_h/B)^{1/4}$$

est le facteur de forme pour le canal rectangulaire selon Bock [05], l'équation (8.3.5) devient applicable.  $R_h = (Bh)/(B+2h)$  est le rayon hydraulique et  $\nu$  la viscosité cinématique.

En posant

$$(8.3.8) \quad y = h/h_1, \quad \omega = h_1/B,$$

on déduit pour

$$(8.3.9) \quad R_h/B = y\omega/(1+2y\omega), \quad f_0 R_h/B = (9/8)(R_h/B)^{5/4}.$$

Le coefficient de frottement devient alors :

$$(8.3.10) \quad f = 0.316 \cdot \zeta / \left[ \frac{4V}{\nu} \cdot \frac{9B}{8} \cdot \left( \frac{R_h}{B} \right)^{5/4} \right]^{1/4}.$$

En tenant compte de l'équ. (8.3.4), la pente de frottement peut être exprimée par :

$$(8.3.11) \quad J_f = 0.02712 \cdot \frac{q^{7/4} \nu^{1/4}}{gB^3} \cdot \frac{\zeta}{(h/B)^{7/4} (R_h/B)^{21/16}}$$

Avec l'équ. (8.3.3), la force de frottement normalisée s'écrit

$$(8.3.12) \quad \bar{W} = 2 \cdot 0.02712 \frac{\zeta L_R}{gh_1^4} (q^{7/4} \nu^{1/4}) \left( \frac{B}{h_1} \right)^{1/16} \cdot I$$

où  $I$  est l'intégrale définie suivante :

$$(8.3.13) \quad I = \int_0^1 \left\{ (1+2\omega y)^{21/16} / y^{33/16} \right\} dx.$$

L'équ. (8.3.12) s'écrit alors :

$$(8.3.14) \quad \bar{W} = 2 \cdot 0.02712 \cdot \zeta \cdot F_1^2 \cdot [\lambda_R \cdot (\nu/q)^{1/4} \cdot \omega^{-1/16}] \cdot I$$

La force de frottement relative dépend alors du nombre de Froude amont, de la longueur du rouleau, du rapport de la viscosité cinématique et du débit spécifique, et du rapport de la hauteur d'eau et de la largeur du canal au pied du ressaut. I est aussi une fonction de  $\omega$  et de  $Y$ . Il est à noter que  $v/q$  correspond au nombre de Reynolds pour  $\omega \rightarrow 0$ . La force de frottement  $\bar{W}$  est ainsi influencée par :

$$(8.3.15) \quad \bar{W} = \bar{W}(F_1, R_1, \text{géométrie}).$$

Par la suite, la substitution

$$(8.3.16) \quad \Lambda = (v/q)^{1/4} \cdot \lambda_R \cdot \omega^{-1/16}$$

sera adoptée comme paramètre de viscosité (ou paramètre hydraulique).

### 8.33 Evaluation de l'intégrale définie

En utilisant l'équ. (8.3.3) pour  $y(\chi)$ ,  $I(Y, \omega)$  selon l'équ. (8.3.13) peut être évaluée par une méthode numérique. Le résultat est présenté au Tableau 8.3.1 pour diverses valeurs de  $\omega$  et  $1 < Y < 15$ . On constate que  $I(Y, \omega)$  a l'ordre de l'unité et décroît avec  $Y$  et  $\omega$  croissants.

Y	$\omega$				
	0	0.05	0.1	0.15	0.2
3	0.6035	0.7022	0.8046	0.9103	1.0191
5	0.4922	0.5574	0.6661	0.7580	0.8529
7	0.4333	0.5104	0.5910	0.6746	0.7611
9	0.3950	0.4666	0.5414	0.6193	0.6999
11	0.3674	0.4347	0.5053	0.5788	0.6549
13	0.3462	0.4102	0.4774	0.5474	0.6200
15	0.3292	0.3905	0.4549	0.5221	0.5917

Tableau 8.3.1 : Intégrale définie I selon l'équ. (8.3.13).

En reportant  $I(Y)$  pour divers  $\omega$  sur une échelle double-logarithmique, on constate que les courbes résultantes peuvent être approchées par des droites. La pente moyenne  $\delta$  dépend uniquement de  $\omega$  et peut être définie par :

$$(8.3.17) \quad -\delta = 0.382 - 0.235\omega.$$

La valeur de I pour  $Y=3$  se détermine par l'approximation :

$$(8.3.18) \quad I_3 = 0.6035 + 2.035\omega.$$

Ainsi, l'intégrale définie  $I(Y, \omega)$  s'écrit :

$$(8.3.19) \quad I = (0.6035 + 2.025\omega) \left( \frac{Y}{3} \right)^{0.235\omega - 0.382}.$$

La Figure 8.3.1 compare  $I(Y, \omega)$  selon le Tableau 8.3.1 avec l'équ. (8.3.19) et une bonne concordance est constatée.

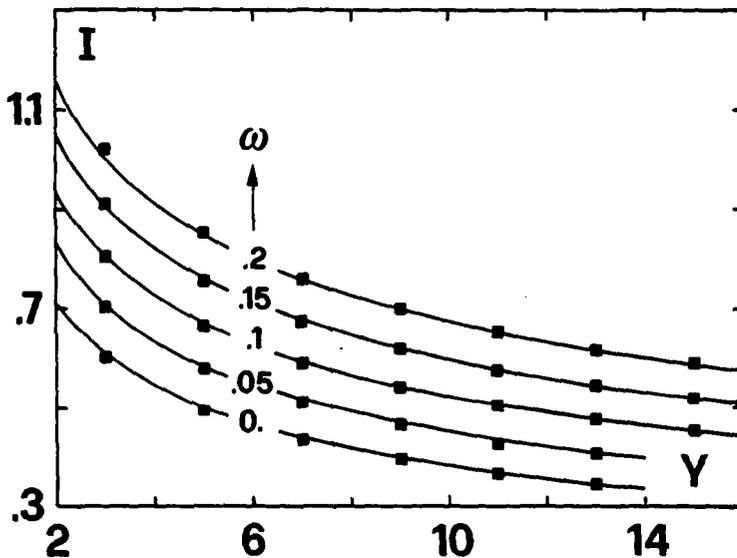


Figure 8.3.1 : Comparaison de  $I(Y, \omega)$  selon (■) le Tableau 8.3.1 et (—) l'équ. (8.3.19).

#### 8.34 Equation de Bélanger généralisée

En introduisant l'équ. (8.3.14) dans l'équ. (8.3.1) avec I comme exprimé par l'équ. (8.3.19), on trouve :

$$(8.3.20) \quad F_1^2 = \frac{Y^2 - 1}{2[1 - (1/Y) - 0.02712 \cdot \zeta \cdot \Lambda \cdot I]}.$$

Pour  $\Lambda=0$ , l'équation de Bélanger (2.3) est retrouvée. La Figure 8.3.2 montre  $Y(\Lambda, F_1)$  pour diverses valeurs de  $\Lambda$  et pour  $\omega=0, 0.05, 0.1$  et  $0.2$ . On constate que les courbes  $Y(F_1)$  représentent de nouveau des droites. Plus  $\lambda$  et  $\omega$  sont grands, plus le décalage par rapport à la courbe de Bélanger augmente.

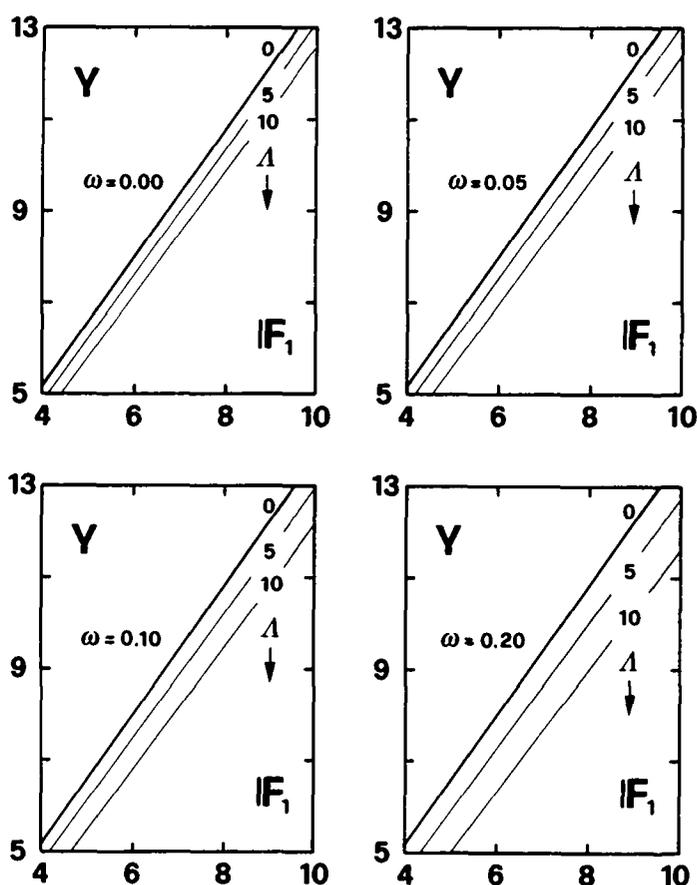


Figure 8.3.2 : Rapport des hauteurs conjuguées  $Y=f(F_1, \Delta, \omega)$  pour le ressaut classique selon l'équ. (8.3.20).  $\Delta=0$  : courbe de Bélanger selon équ. (2.3).

Une fois les conditions d'approche spécifiées ( $h_1, v, q$ ), la géométrie du canal ( $B$ ) donnée et la longueur du rouleau ( $L_R$ ) mesurée, la Figure 8.3.2 permet de déterminer la hauteur d'eau  $h_2$  à l'aval du ressaut. Parce que la force de frottement est proportionnelle à  $(h_1)^{-4}$  selon l'équ. (8.3.12), c'est surtout la zone proche du pied du ressaut qui influence  $Y(F_1)$ . Compte tenu que cette zone d'écoulement est similaire pour le ressaut forcé par seuil, cette approche peut être étendue, avec une bonne précision, à ce type de ressaut. La validité de cette extension est d'ailleurs confirmée par le parallélisme des courbes  $Y(F_1, S)$  selon les Figures 6.4-6.6.  $\lambda_R$  comme contenu dans la définition de  $\Delta$  peut alors être exprimé avec une des équations (6.14), (6.16) ou (6.18) en posant  $\lambda_R \rightarrow \lambda_S$ .

### 8.35 Valeur limite du paramètre hydraulique $\Lambda$

La Figure 8.3.2 a présenté le rapport des hauteurs conjuguées pour diverses valeurs des paramètres  $\omega$  et  $\Lambda$ . On se propose de déterminer une valeur limite  $\Lambda_\ell$  du paramètre hydraulique en fixant un décalage  $\Delta Y$  par rapport à la courbe de Bélanger, pour lequel l'effet de frottement peut être considéré comme négligeable.

En admettant un décalage  $\Delta Y=0.1$ , l'écart par rapport à la courbe de Bélanger est inférieur à 2.5% pour  $F_1 > 3$  et il diminue d'autre part avec  $F_1$  et  $\omega$  croissants.

Les courbes pour les divers  $\Lambda$  montrées à la Figure 8.3.2 indiquent un décalage croissant avec le nombre de Froude. Les courbes correspondant au décalage  $\Delta Y=0.1$  ne peuvent pas être dessinées sur ces diagrammes car très proches de la courbe de Bélanger; on peut donc les admettre parallèles à cette dernière.

Le Tableau 8.3.2 présente les valeurs limites  $\Lambda_\ell$  pour les divers  $\omega$  correspondant aux courbes décalées de  $\Delta Y=0.1$  par rapport à celle de Bélanger. Ces valeurs sont obtenues à partir de l'équ. (8.3.20) dans laquelle  $Y=Y_{RC}-\Delta Y$  avec  $Y_{RC}$  donné par l'équ. (2.3) et  $\Delta Y=0.1$ ,  $\zeta=1.4$  comme expliqué au §8.36 et  $F_1=8$  (valeur représentative). Le résultat est admis ainsi pour le domaine  $3 < F_1 < 10$ .

$\omega$	0.00	0.05	0.10	0.20
$\Lambda_\ell$	1.382	1.166	1.004	0.779

Tableau 8.3.2 : Valeurs limites  $\Lambda_\ell$  du paramètre hydraulique pour divers  $\omega$ , selon l'équ. (8.3.20) pour  $\Delta Y=0.1$ .

Une relation entre  $\Lambda_\ell$  et  $\omega$  du Tableau 8.3.2 a pu être approchée par :

$$(8.3.21) \quad \Lambda_\ell = 1.382 / (1 + 3.8\omega)$$

Ainsi un critère de sélection est établi, indiquant la valeur limite  $\Lambda_l$  pour laquelle l'effet de frottement peut être négligé :

$$(8.3.22) \quad \Lambda < \Lambda_l,$$

où  $\Lambda$  est donné par l'équ. (8.3.16) et  $\Lambda_l$  par l'équ. (8.3.21).

Ainsi lors du dimensionnement d'un bassin amortisseur, la comparaison selon l'équ. (8.3.22) permet de déterminer si l'influence du frottement sur l'écoulement est négligeable ou non. Ce critère établi pour le ressaut classique peut être étendu au cas du ressaut forcé par seuil, ainsi que toute l'approche concernant le frottement comme expliqué au §8.36.

### 8.36 Application au ressaut classique

L'équ. (8.3.20) peut être maintenant appliquée aux essais du ressaut classique dont les valeurs expérimentales sont données aux annexes 8.5.35 et 8.5.41. Cette équation est valable pour le ressaut classique avec un ajustement du facteur de correction  $\zeta$  pour tenir compte des conditions d'écoulement : forte turbulence, grandes fluctuations inhérentes au phénomène, zone de recirculation du rouleau de surface, non-uniformité.

Pour nos essais, ce facteur de correction a pris la valeur  $\zeta=1.4$ , pour laquelle la meilleure concordance a pu être observée. La comparaison des hauteurs conjuguées entre les essais et le calcul est présentée à la Figure 8.3.3. Mis à part trois points (sur 69 au total) qui sont légèrement décalés, les valeurs coïncident avec celles mesurées : l'approche proposée plus haut s'applique donc bien au cas du ressaut classique.

Ce résultat sera ensuite étendu au cas du ressaut forcé par seuil, car l'écoulement dans la zone du pied du ressaut est dans les deux cas similaire.

En posant  $E=0.02712 \cdot \Lambda \cdot I \cdot \zeta$  et en résolvant l'équ. (8.3.20) par rapport à  $Y$ , on obtient après transformation et simplification

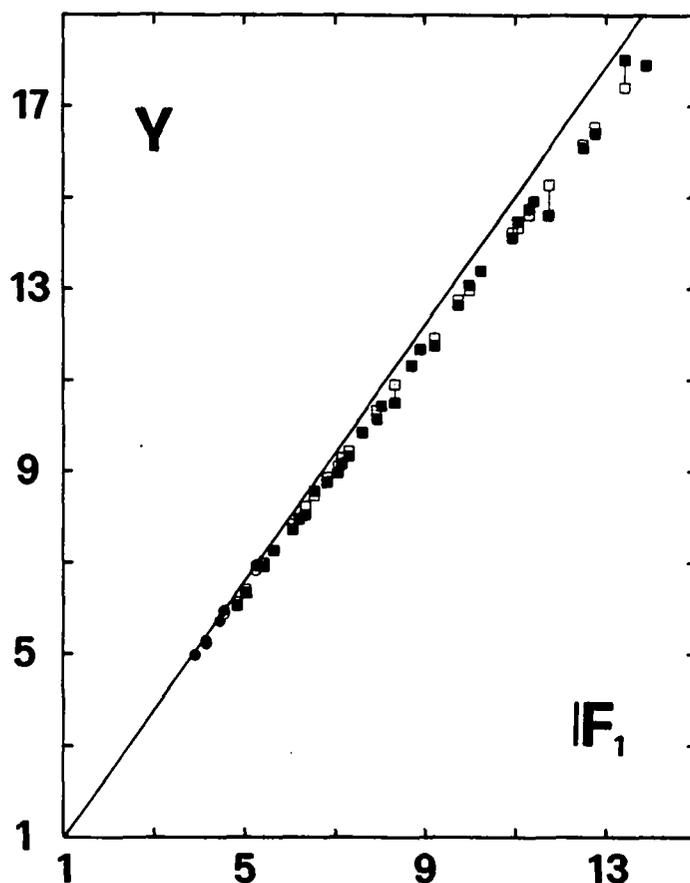


Figure 8.3.2 : Rapport des hauteurs conjuguées. Comparaison entre mesures et calcul selon l'équ. (8.3.20). Notations : (■) mesures avec  $h_1 < 26$  mm, (□) valeurs calculées correspondantes; (●) mesures avec  $h_1 > 33$  mm, (○) valeurs calculées correspondantes; (—) courbe de Bélanger selon l'équ. (2.3).

$$(8.3.23) \quad Y = \sqrt{2} \cdot F_1 [1 - (E/1.7)] - 0.5.$$

Cette équation garde la forme de celle de Bélanger qui est retrouvée lorsque  $E=0$ . Les points calculés à l'aide de l'équ. (8.3.23) correspondent aux courbes de la Fig. 8.3.2, avec un écart inférieur à  $\pm 5\%$ , pour  $4 < F_1 < 10$ . La précision est d'autant plus grande que  $\omega$  et  $\Lambda$  sont faibles.



#### 8.4 PHOTOGRAPHIES

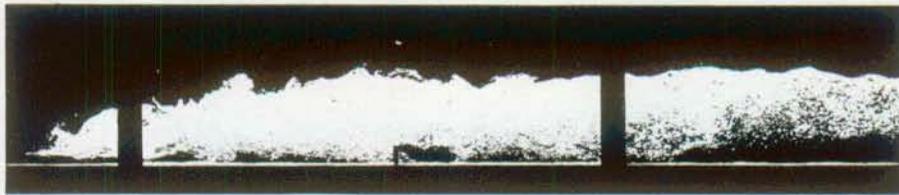
-----

Les photographies ont été réalisées lors de l'établissement de la classification (§4.2). L'écoulement se fait toujours de gauche à droite. Pour donner une échelle, la distance entre deux barreaux verticaux est de 1.20 m.

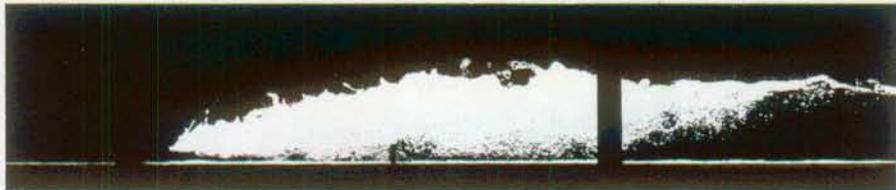
La première photographie de chaque table correspond au ressaut forcé type A. Les autres types sont obtenus par abaissement successif de la hauteur d'eau aval  $h_2$ , jusqu'à ce que l'écoulement à l'aval du seuil soit torrentiel et sans influence sur le ressaut. Les limites de cette dernière sont données pour chaque table.

Le nombre à côté de chaque photographie correspond au classement des négatifs et comprend les numéros de film et de photographie sur ce film.

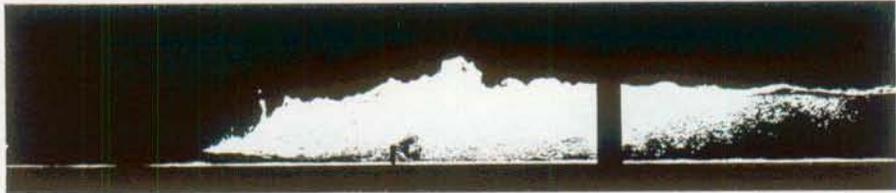
Table 8.4.1 - Seuil 50x12.5 mm -  $F_1 = 7.23$  -  $h_1 = 23$  mm  
204 >  $h_2$  (mm) > 48



21.01



21.09



21.07



21.05



21.03

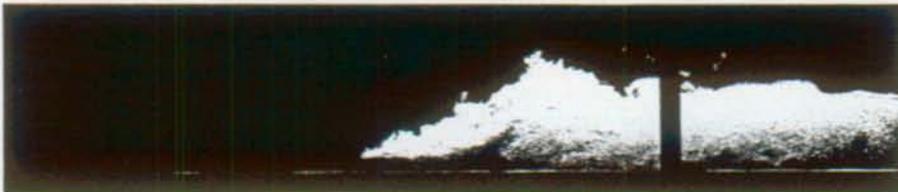
Table 8.4.2 - Seuil 50x12.5 mm -  $F_1 = 6.36$  -  $h_1 = 33$  mm  
259 >  $h_2$  (mm) > 61



21.11



21.21



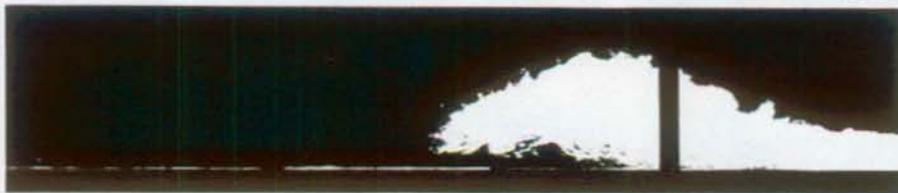
21.19



21.17

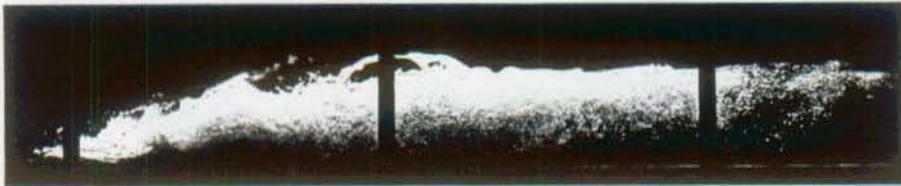


21.15

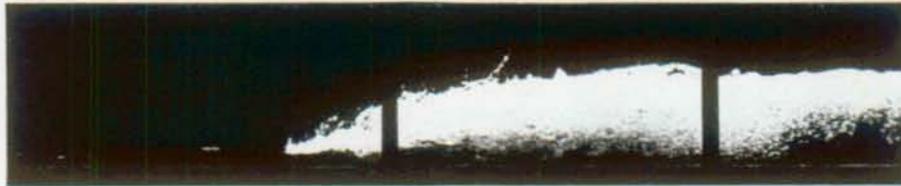


21.13

Table 8.4.3 - Seuil 50x12.5 mm -  $F_1 = 5.23$  -  $h_1 = 53$  mm  
 $352 > h_2$  (mm)  $> 80$



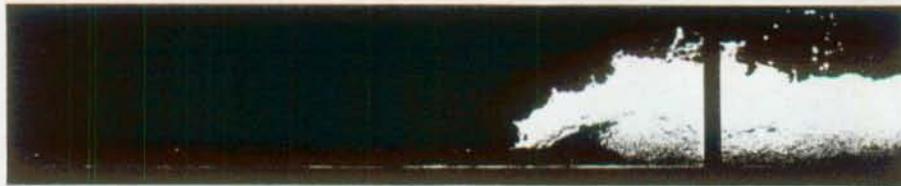
21.23



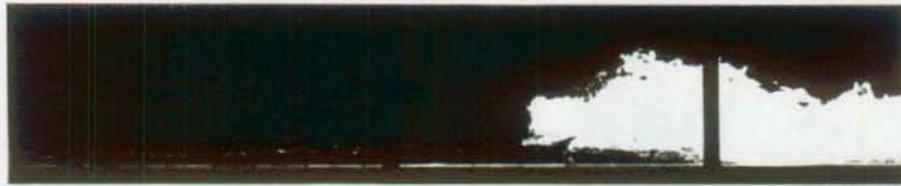
21.33



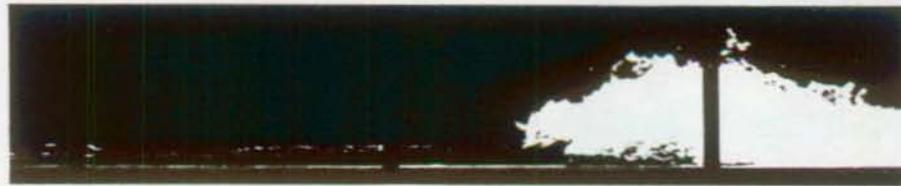
21.31



21.29

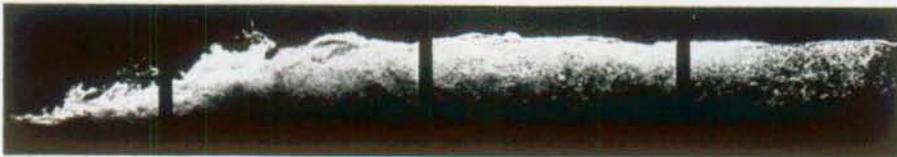


21.27

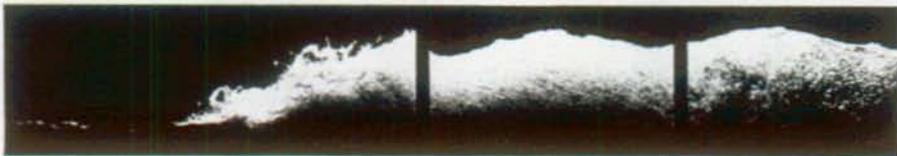


21.25

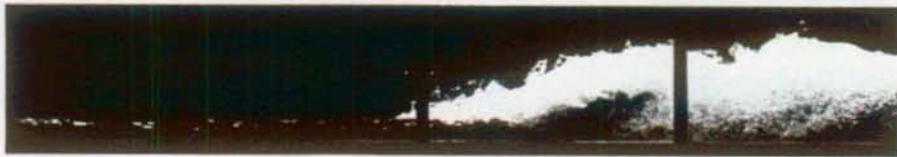
Table 8.4.4 - Seuil 50x12.5 mm -  $F_1 = 4.3$  -  $h_1 = 83$  mm  
456 >  $h_2$  (mm) > 100



21.35



22.10



22.08



22.06



22.04

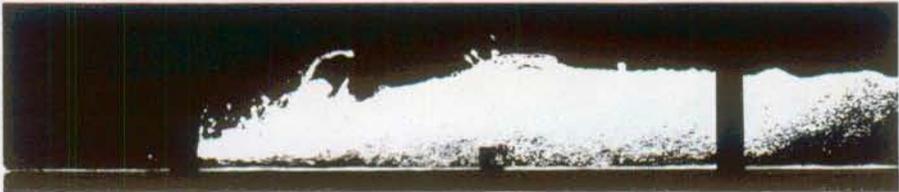


22.02

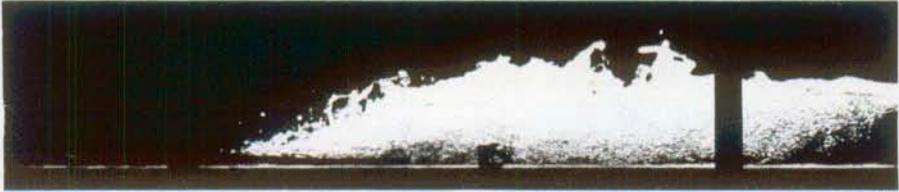
Table 8.4.5 - Seuil 50x25.0 mm -  $F_1 = 7.23$  -  $h_1 = 23$  mm  
206 >  $h_2$  (mm) > 47



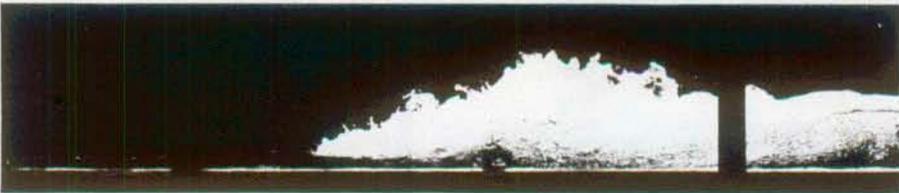
26.01



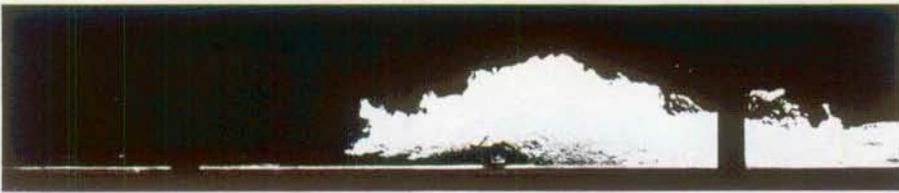
26.09



26.07



26.05



26.03

Table 8.4.6 - Seuil 50x25.0 mm -  $F_1 = 6.36$  -  $h_1 = 33$  mm  
260 >  $h_2$  (mm) > 58



22.12



22.22



22.20



22.18



22.16



22.14

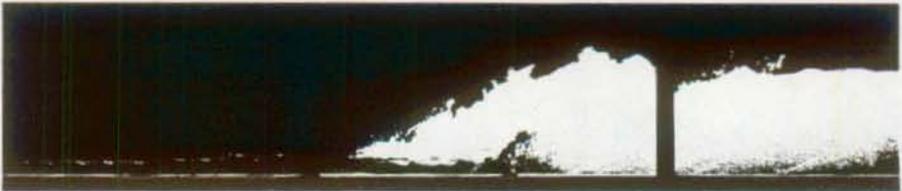
Table 8.4.7 - Seuil 50x25.0 mm -  $F_1 = 5.23$  -  $h_1 = 53$  mm  
 $380 > h_2$  (mm)  $> 78$



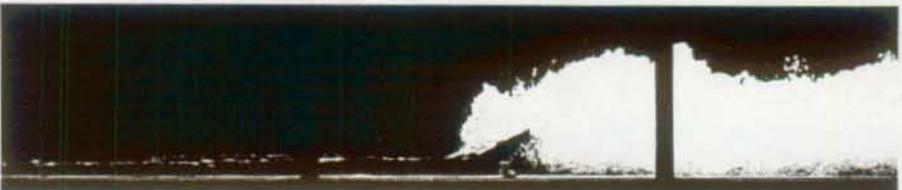
25.13



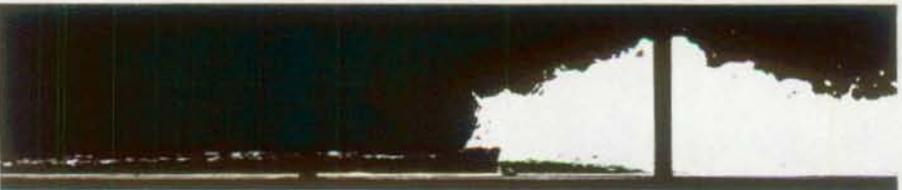
25.23



25.21



25.19

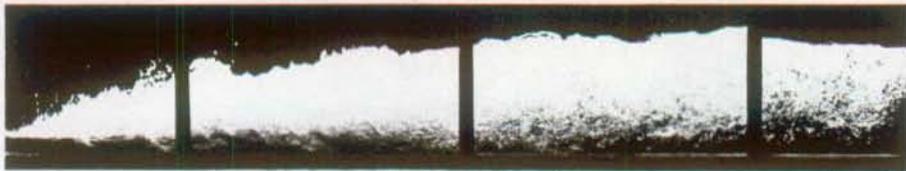


25.17



25.15

Table 8.4.8 - Seuil 50x25.0 mm -  $F_1 = 4.3$  -  $h_1 = 83$  mm  
454 >  $h_2$  (mm) > 106



25.01



25.11



25.09



25.07

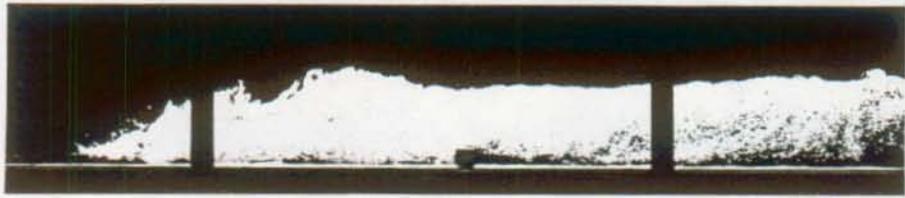


25.05

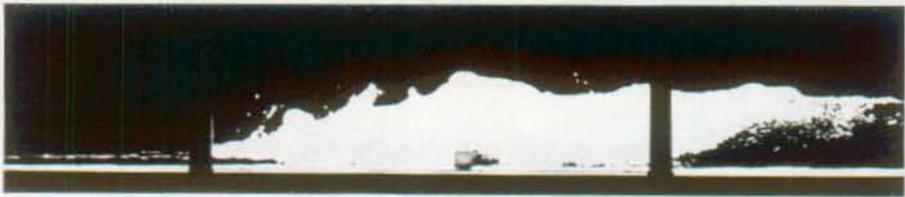


25.03

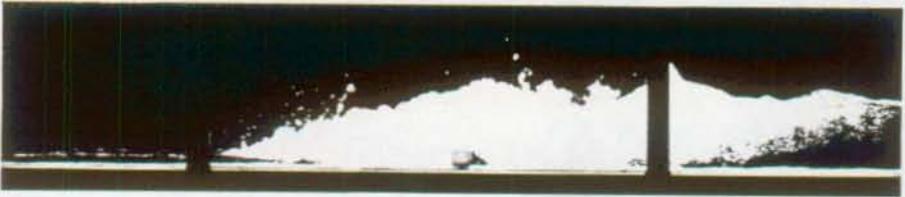
Table 8.4.9 - Seuil 50x50 mm -  $F_1 = 7.23$  -  $h_1 = 23$  mm  
208 >  $h_2$  (mm) > 47



28.15



28.13



28.11

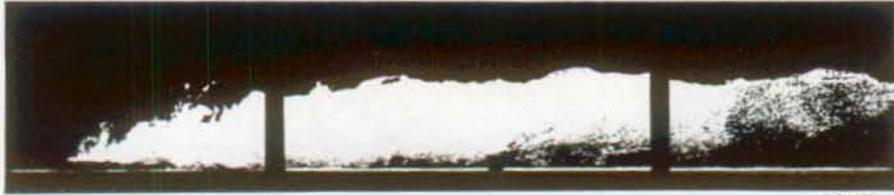


28.09



28.07

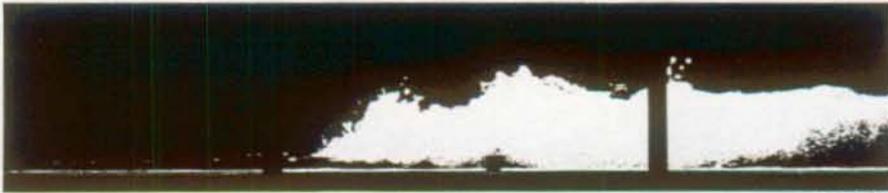
Table 8.4.10 - Seuil 50x50 mm -  $F_1 = 6.36$  -  $h_1 = 33$  mm  
 $265 > h_2$  (mm)  $> 56$



28.17



28.27



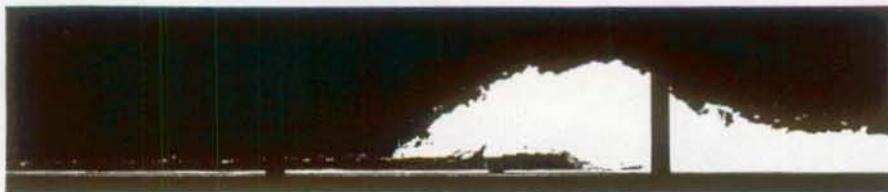
28.25



28.23



28.21



28.19

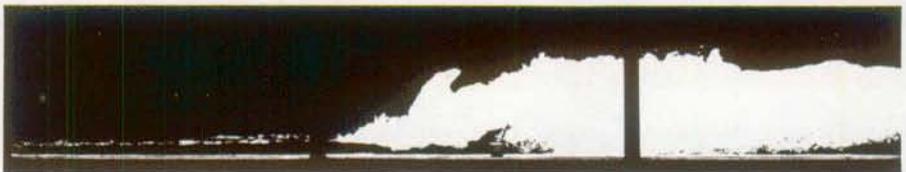
Table 8.4.11 - Seuil 50x50 mm -  $F_1 = 5.23$  -  $h_1 = 53$  mm  
 $354 > h_2$  (mm)  $> 74$



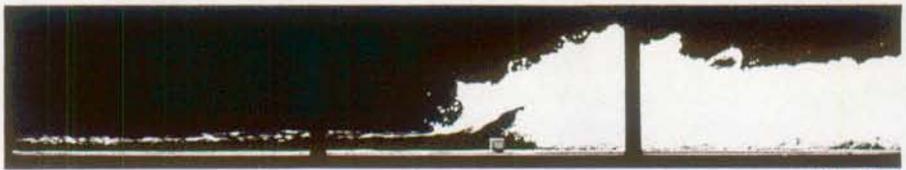
28.29



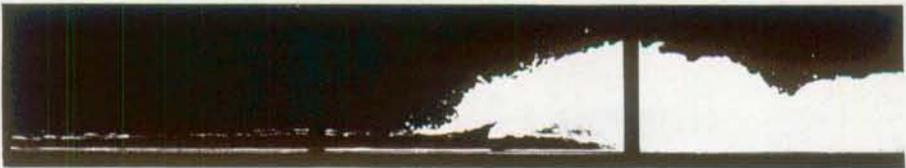
29.03



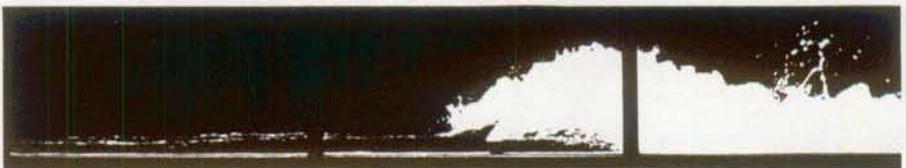
29.01



28.35

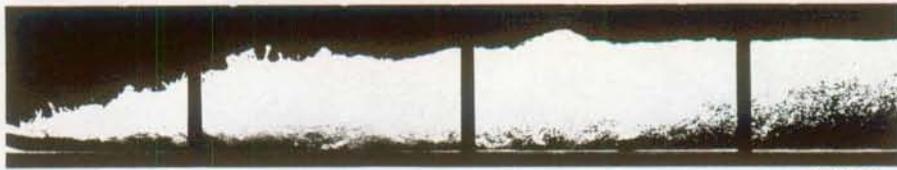


28.33

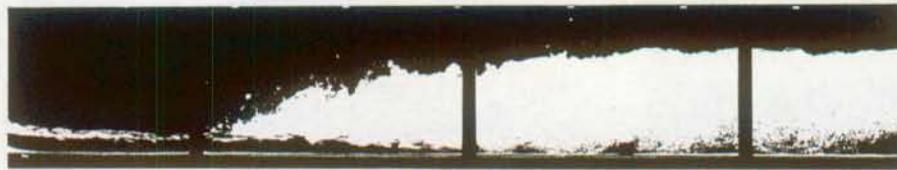


28.31

Table 8.4.12 - Seuil 50x50 mm -  $F_1 = 4.3$  -  $h_1 = 83$  mm  
456 >  $h_2$  (mm) > 105



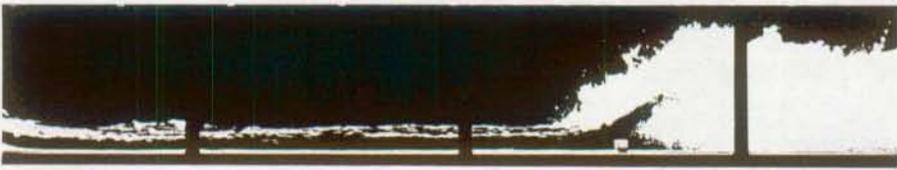
29.05



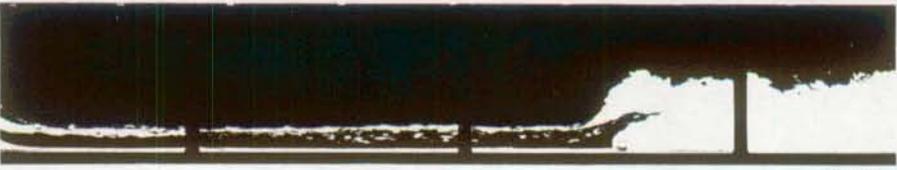
29.15



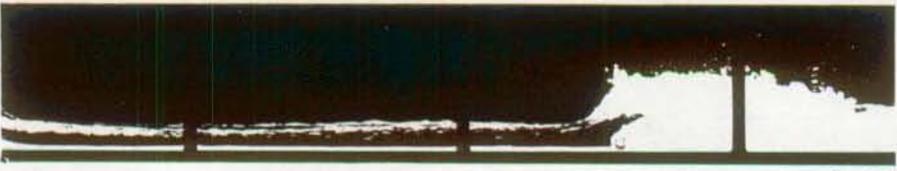
29.13



29.11



29.09

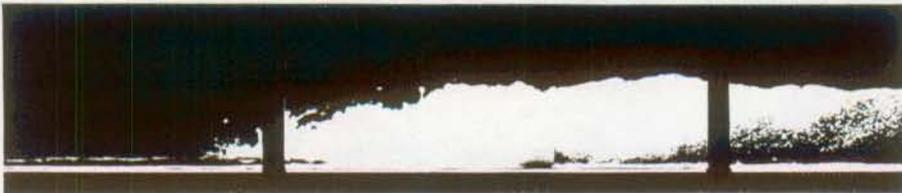


29.07

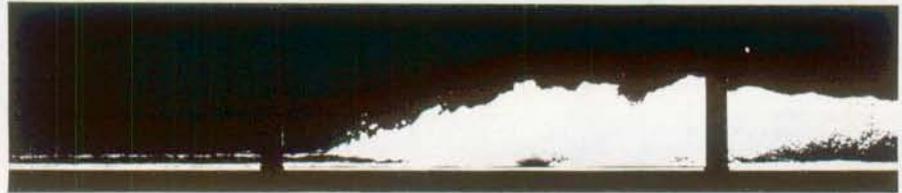
Table 8.4.13 - Seuil 50x100 mm -  $F_1 = 7.23$  -  $h_1 = 23$  mm  
208 >  $h_2$  (mm) > 46



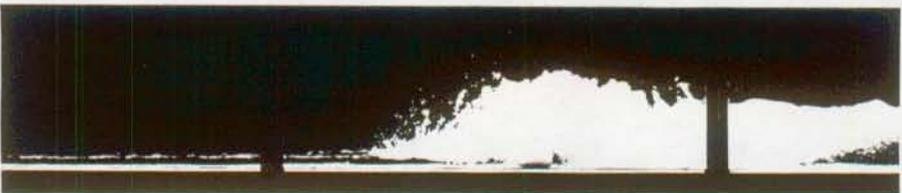
31.11



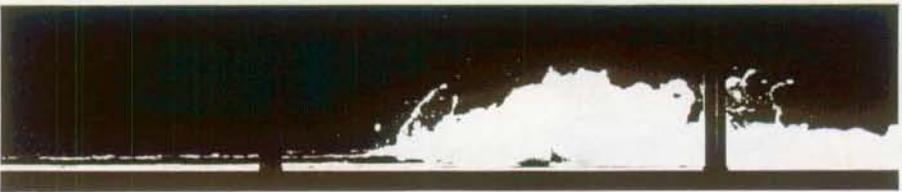
31.19



31.17



31.15

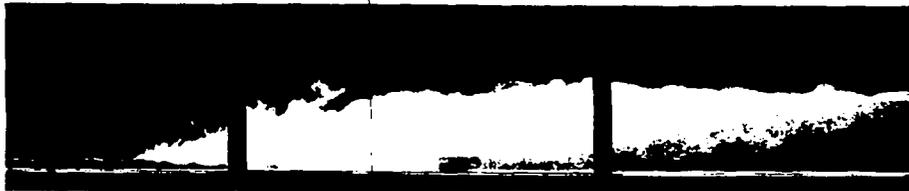


31.13

Table 8.4.14 - Seuil 50x100 mm -  $F_1 = 6.36$  -  $h_1 = 33$  mm  
266 >  $h_2$  (mm) > 55



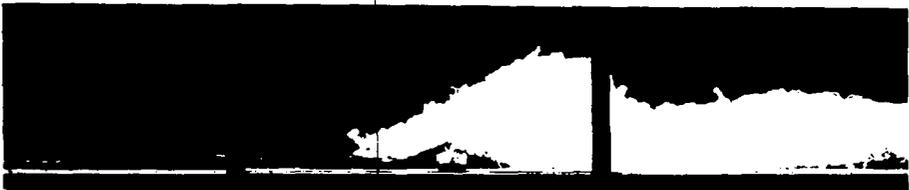
31.21



31.31



31.29



31.27



31.25



31.23

Table 8.4.15 - Seuil 50x100 mm -  $F_1 = 5.23$  -  $h_1 = 53$  mm  
 $352 > h_2$  (mm)  $> 73$



31.33



32.09



32.07



32.05



32.03



31.35

Table 8.4.16 - Seuil 50x100 mm -  $F_1 = 4.3$  -  $h_1 = 83$  mm  
454 >  $h_2$  (mm) > 102



32.11



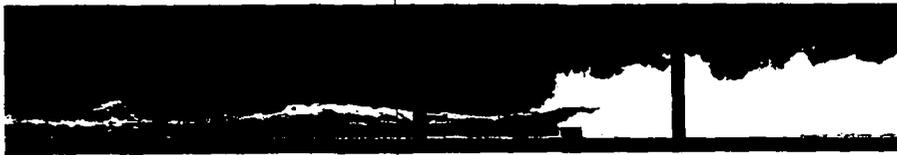
32.21



32.19



32.17



32.15



32.13

Table 8.4.17 - Seuil 75x19 mm -  $F_1 = 7.23$  -  $h_1 = 23$  mm  
205 >  $h_2$  (mm) > 137



22.24

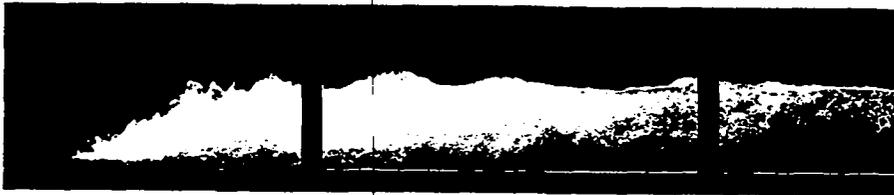


22.28

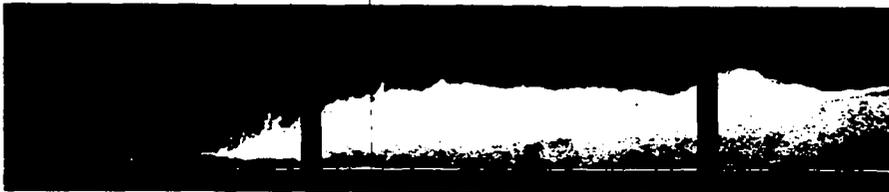


22.26

Table 8.4.18 - Seuil 75x19 mm -  $F_1 = 6.36$  -  $h_1 = 33$  mm  
268 >  $h_2$  (mm) > 68



22.30



22.36



22.34

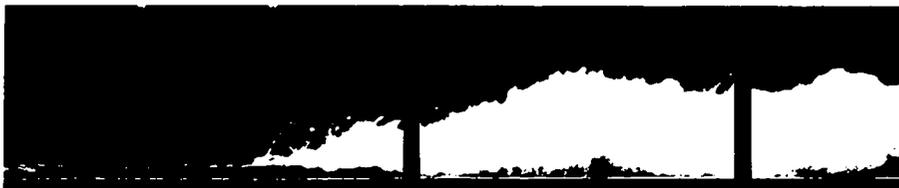


22.32

Table 8.4.19 - Seuil 75x19 mm -  $F_1 = 5.23$  -  $h_1 = 53$  mm  
355 >  $h_2$  (mm) > 81



23.06



23.12



23.10



23.08

Table 8.4.20 - Seuil 75x19 mm -  $F_1 = 4.3$  -  $h_1 = 83$  mm  
453 >  $h_2$  (mm) > 105



23.14



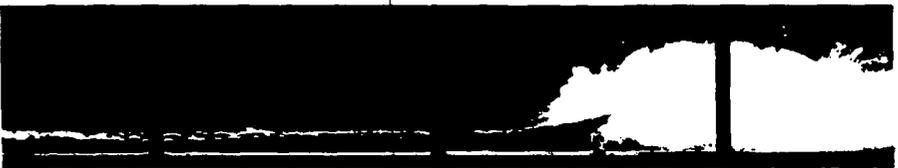
23.24



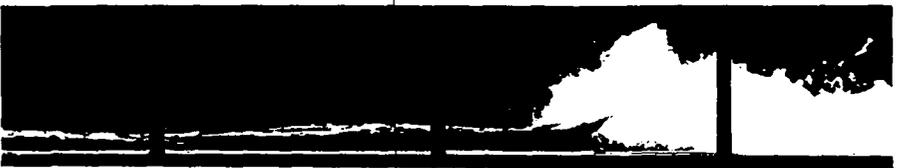
23.22



23.20



23.18



23.16

Table 8.4.21 - Seuil 75x38 mm -  $F_1 = 7.23$  -  $h_1 = 23$  mm  
 $200 > h_2$  (mm)  $> 136$



27.09



27.13



27.11

Table 8.4.22 - Seuil 75x38 mm -  $F_1 = 6.36$  -  $h_1 = 33$  mm  
265 >  $h_2$  (mm) > 63



27.15



27.21



27.19



27.17

Table 8.4.23 - Seuil 75x38 mm -  $F_1 = 5.23$  -  $h_1 = 53$  mm  
 $350 > h_2$  (mm)  $> 82$



27.23



27.29



27.27



27.25

Table 8.4.24 - Seuil 75x38 mm -  $F_1 = 4.3$  -  $h_1 = 83$  mm  
452 >  $h_2$  (mm) > 107

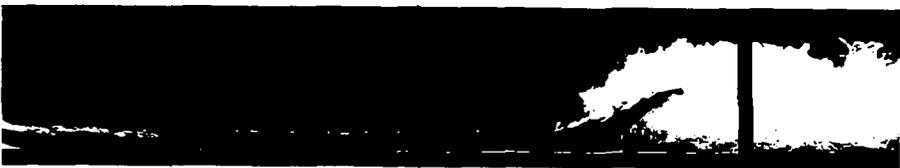


Table 8.4.25 - Seuil 75x75 mm -  $F_1 = 7.23$  -  $h_1 = 23$  mm  
 $203 > h_2$  (mm)  $> 133$



29.17



29.21



29.19

Table 8.4.26 - Seuil 75x75 mm -  $F_1 = 6.36$  -  $h_1 = 33$  mm  
261 >  $h_2$  (mm) > 65



29.23



29.24



29.27



29.25

Table 8.4.27 - Seuil 75x75 mm -  $F_1 = 5.23$  -  $h_1 = 53$  mm  
 $347 > h_2$  (mm)  $> 80$



29.31



30.01



29.35

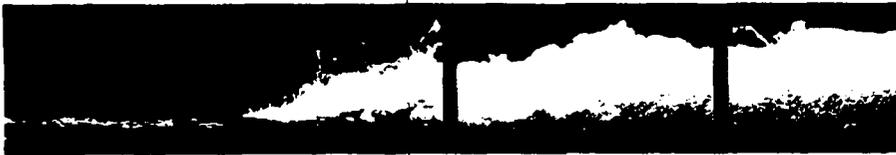


29.33

Table 8.4.28 - Seuil 75x75 mm -  $F_1 = 4.3$  -  $h_1 = 83$  mm  
453 >  $h_2$  (mm) > 108



30.03



30.13



30.11



30.09



30.07



30.05

Table 8.4.29 - Seuil 75x150 mm -  $F_1 = 7.23$  -  $h_1 = 23$  mm  
 $202 > h_2$  (mm)  $> 45$



32.29



32.27



32.25



32.23

Table 8.4.30 - Seuil 75x150 mm -  $F_1 = 6.36$  -  $h_1 = 33$  mm  
263 >  $h_2$  (mm) > 61



32.31



33.02



32.35



32.33

Table 8.4.31 - Seuil 75x150 mm -  $F_1 = 5.23$  -  $h_1 = 53$  mm  
351 >  $h_2$  (mm) > 84



33.04



33.10



33.08



33.06

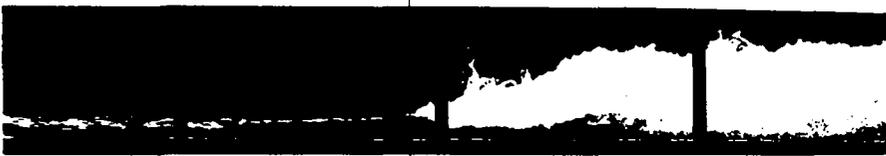
Table 8.4.32 - Seuil 75x150 mm -  $F_1 = 4.3$  -  $h_1 = 83$  mm  
450 >  $h_2$  (mm) > 110



33.12



33.22



33.20



33.18



33.16



33.14

Table 8.4.33 - Seuil 100x25 mm -  $F_1 = 7.23$  -  $h_1 = 23$  mm  
 $213 > h_2$  (mm)  $> 45$



23.34



23.30



23.28



23.26

Table 8.4.34 - Seuil 100x25 mm -  $F_1 = 6.36$  -  $h_1 = 33$  mm  
 $250 > h_2$  (mm)  $> 63$



23.34



24.03



24.01



23.36

Table 8.4.35 - Seuil 100x25 mm -  $F_1 = 5.23$  -  $h_1 = 53$  mm  
 $331 > h_2$  (mm)  $> 87$



24.05



24.11



24.09



24.07

Table 8.4.36 - Seuil 100x25 mm -  $F_1 = 4.3$  -  $h_1 = 83$  mm  
444 >  $h_2$  (mm) > 116



24.13



24.19



24.17



24.15

Table 8.4.37 - Seuil 100x50 mm -  $F_1 = 7.23$  -  $h_1 = 23$  mm  
 $214 > h_2$  (mm)  $> 45$



26.18



26.15



26.13



26.11

Table 8.4.38 - Seuil 100x50 mm -  $F_1 = 6.36$  -  $h_1 = 33$  mm  
 $251 > h_2$  (mm)  $> 64$



26.19



26.25



26.23



26.21

Table 8.4.39 - Seuil 100x50 mm -  $F_1 = 5.23$  -  $h_1 = 53$  mm  
 $334 > h_2$  (mm)  $> 89$



26.27



26.33



26.31



26.29

Table 8.4.40 - Seuil 100x50 mm -  $F_1 = 4.3$  -  $h_1 = 83$  mm  
448 >  $h_2$  (mm) > 117



27.01



27.07



27.05



27.03

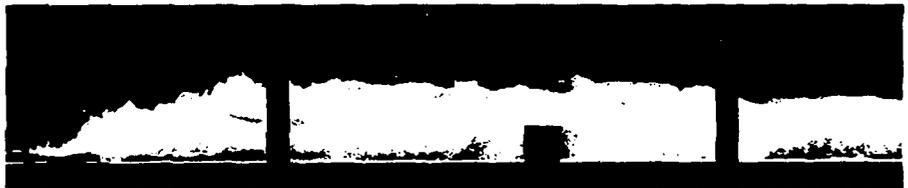
Table 8.4.41 - Seuil 100x100 mm -  $F_1 = 7.23$  -  $h_1 = 23$  mm  
 $210 > h_2$  (mm)  $> 46$



30.21



30.19



30.17



30.15

Table 8.4.42 - Seuil 100x100 mm -  $F_1 = 6.36$  -  $h_1 = 33$  mm  
248 >  $h_2$  (mm) > 63



30.23



30.29



30.27



30.25

Table 8.4.43 - Seuil 100x100 mm -  $F_1 = 5.23$  -  $h_1 = 53$  mm  
 $336 > h_2$  (mm)  $> 91$



30.31



31.01



30.35



30.33

Table 8.4.44 - Seuil 100x100 mm -  $F_1 = 4.3$  -  $h_1 = 83$  mm  
447 >  $h_2$  (mm) > 112



31.03



31.09



31.07



31.05

Table 8.4.45 - Seuil 100x200 mm -  $F_1 = 7.23$  -  $h_1 = 23$  mm  
211 >  $h_2$  (mm) > 47

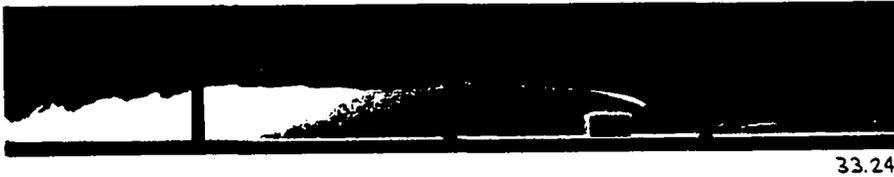


Table 8.4.46 - Seuil 100x200 mm -  $F_1 = 6.36$  -  $h_1 = 33$  mm  
 $227 > h_2$  (mm)  $> 63$



33.32



34.01

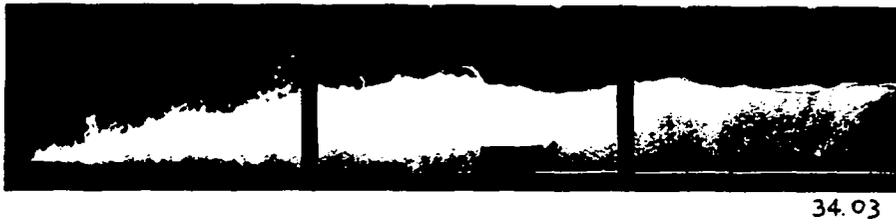


33.36



33.34

Table 8.4.47 - Seuil 100x200 mm -  $F_1 = 5.23$  -  $h_1 = 53$  mm  
 $332 > h_2$  (mm)  $> 88$



34.03



34.09



34.07



34.05

Table 8.4.48 - Seuil 100x200 mm -  $F_1 = 4.3$  -  $h_1 = 83$  mm  
446 >  $h_2$  (mm) > 109



34.11



34.19



34.17



34.15



34.13



## 8.5 TABLES DES MESURES

-----

Les tables de cette annexe 8.5 comprennent toutes les mesures (niveaux, vitesses, pressions, directions) des essais effectués. Elles se rapportent à une ou plusieurs figures dans le texte (chapitres 3 à 6). Les notations spéciales sont expliquées dans la légende de la table; pour les notations courantes, cf. pages XVII-XIX.



Table 8.5.2

Ressaut classique - mesures de vitesses dans la section médiane du canal (Fig. 3.25).

Q=100 l/s			Q=60 l/s			Q=200 l/s			Q=40 l/s		
x	z	V	x	z	V	x	z	V	x	z	V
mm	mm	m/s	mm	mm	m/s	mm	mm	m/s	mm	mm	m/s
6500	10	3.45	6500	10	3.51	6500	10	3.64	6500	10	3.35
	30	3.60		30	3.43		30	3.7		20	2.18
	50	3.50	6800	10	3.07		50	3.68	7000	10	1.70
6900	10	3.50		30	2.55		70	3.67		30	1.53
	30	3.50		50	1.4		90	3.65		50	1.14
	50	2.70		70	0.51	7200	10	2.92		70	0.70
	70	1.60		90	-0.41		60	3.1		90	0.40
	90	0.90		110	-0.38		110	2.48		110	-0.35
	110	-0.40	7050	10	2.1		160	1.44		130	-0.40
	130	-0.30		40	1.93		190	0.84	7250	10	1.04
7150	10	2.60		70	1.17		220	-0.57		30	1.14
	30	2.60		100	0.46		250	-0.52		50	1.02
	50	2.50		120	0.37	7700	10	2.22		70	0.83
	70	2.10		140	-0.43		60	2.53		90	0.65
	90	1.60		160	-0.42		110	2.2		110	0.48
	110	1.00	7300	10	1.52		160	1.56		130	0.34
	130	0.60		40	1.54		210	1.04		150	-0.26
	150	-0.45		70	1.39		260	0.6		170	-0.22
	170	-0.40		100	0.96		310	-0.52		190	-0.18
7650	10	1.60		130	0.51		360	-0.43	7500	10	0.45
	40	1.80		160	0.36	8200	10	1.52		40	0.66
	70	1.75		190	-0.29		60	1.94		70	0.70
	100	1.50		220	-0.22		110	1.83		100	0.71
	130	1.25	7550	10	0.84		160	1.63		130	0.68
	160	0.90		40	0.97		210	1.17		160	0.63
	190	0.60		70	1.15		260	0.81		190	0.51
	220	-0.40		100	1.05		310	0.64	7750	10	0.24
	250	-0.35		130	0.96		360	-0.42		40	0.27
8150	10	0.70		160	0.69		410	-0.28		70	0.37
	40	0.90		190	0.58	8700	10	1.12		100	0.49
	70	1.05		220	-0.42		60	1.23		130	0.56
	100	1.05	7800	10	0.4		110	1.41		160	0.61
	130	1.10		40	0.48		160	1.48		190	0.62
	160	1.00		70	0.62		210	1.32	8000	10	0.16
	190	0.95		100	0.68		260	1.09		40	0.18
	220	0.70		130	0.75		310	0.76		70	0.25
	250	0.65		160	0.69		360	0.58		100	0.31
	280	-0.45		190	0.75		410	-0.46		130	0.39
	310	-0.40		220	0.7		460	-0.34		160	0.55
8650	10	0.30	8050	10	0.28	9200	10	0.88		190	0.64
	40	0.48		60	0.4		60	1.07	8250	10	0.16
	70	0.60		110	0.5		110	1.13		40	0.20
	100	0.60		160	0.6		160	1.2		70	0.24
	130	0.65		210	0.75		210	1.16		100	0.28
	160	0.75		260	0.6		260	1.06		130	0.34
	190	0.75	8300	10	0.24		310	0.91		160	0.45
	220	0.75		60	0.24		360	0.8		190	0.53
	250	0.75		110	0.35		410	0.62		220	0.28
	280	0.70		160	0.45		460	-0.43			
	310	0.65		210	0.61						
	340	0.57		260	0.65						

Table 8.5.3

Ressaut classique - mesures de pression sur le fond (Fig. 3.25). mm CE = pression en mm de colonne d'eau.

Q =	100 l/s	60 l/s	200 l/s	40 l/s
x	mm CE	mm CE	mm CE	mm CE
6340	55	35	105	26
6640	65	42	110	67
6940	110	90	165	124
7240	170	175	230	188
7540	240	230	290	210
7840	285	250	345	216
8140	325	265	390	219
8440	340	272	460	220
8740	355	275	475	223
9040	360	277	495	223
9340	360	277	500	223
9640	360	278	505	223
9940	360	278	505	220



Table 8.5.5

Ressaut forcé par seuil - mesures de vitesses (Fig. 4.11-1),  
avec  $h_1 = 53$  mm.

Q=100 l/s				h2=337 mm				sxb=75x75 mm			
x	z	$\varphi$	v	x	z	$\varphi$	v	x	z	$\varphi$	v
mm	mm	-	m/s	mm	mm	-	m/s	mm	mm	-	m/s
6050	15	0	3.39	7550	100	-10	0.83				
	25	0	3.44		125	5	1.26				
	35	0	3.53		150	10	1.24				
6250	15	0	3.28		175	10	1.17				
	25	0	3.36		200	5	1.05				
	50	0	2.66		225	5	0.94				
	75	0	1.20		250	5	0.79				
	100	0	0.46		275	0	0.62				
	125	-180	-0.45		300	0	0.57				
6450	15	0	2.95	7750	15	170	-0.30				
	25	0	2.91		50	170	-0.25				
	50	0	2.42		100	0	0.36				
	75	0	1.52		150	5	0.83				
	100	10	0.78		200	0	1.13				
	125	0	0.49		250	0	1.04				
	150	-160	-0.51		300	-5	0.82				
	175	-170	-0.48	7950	15	180	-0.22				
6650	15	0	2.39		50	0	0.23				
	25	0	2.46		100	0	0.35				
	50	0	2.10		150	0	0.63				
	75	0	1.65		200	0	0.92				
	100	10	1.16		250	0	1.02				
	125	20	0.82		300	0	0.93				
	150	0	0.47	8200	15	0	0.26				
	175	180	-0.45		50	0	0.31				
	200	-170	-0.48		100	0	0.36				
6850	15	5	2.00		150	0	0.57				
	50	5	1.94		200	0	0.74				
	100	10	1.15		250	0	0.87				
	150	0	0.62		300	0	0.92				
	200	180	-0.44	8450	15	0	0.31				
	250	-170	-0.40		50	0	0.37				
7050	15	5	1.50		100	0	0.47				
	50	5	1.74		200	0	0.66				
	100	10	1.38		300	0	0.88				
	150	15	0.80	8700	15	0	0.34				
	200	180	-0.53		50	0	0.40				
	250	180	-0.39		100	0	0.51				
7300	15	10	0.99		200	0	0.64				
	50	10	1.20		300	0	0.86				
	100	10	1.19	8950	15	0	0.38				
	150	15	1.02		50	0	0.40				
	200	20	0.72		100	0	0.48				
	250	180	-0.45		200	0	0.64				
	300	180	-0.26		300	0	0.83				

Table 8.5.6

Ressaut forcé par seuil - mesures de vitesses (Fig. 4.11-2),  
suite.

Q=100 l/s				h2=320 mm				sxb=75x75 mm			
x	z	φ	V	x	z	φ	V	x	z	φ	V
mm	mm	-	m/s	mm	mm	-	m/s	mm	mm	-	m/s
6400	15	0	3.26	7550	100	25	0.66				
	25	0	3.34		125	25	1.60				
	35	0	3.37		150	25	1.63				
6600	15	0	3.26		175	20	1.55				
	25	0	3.36		200	20	1.27				
	50	0	2.64		225	20	1.00				
	75	0	0.86		250	25	0.78				
6800	15	0	2.93		275	25	0.55				
	25	0	2.96	7700	15	160	-0.50				
	50	0	2.29		50	160	-0.43				
	75	0	1.33		100	90	0.26				
	100	0	0.59		150	15	0.74				
	125	-160	-0.55		200	10	1.37				
7000	15	0	2.41		250	5	1.25				
	25	-5	2.56		300	-10	0.95				
	50	-5	2.14	7900	15	180	-0.35				
	75	0	1.52		50	160	-0.31				
	100	0	1.02		100	0	0.31				
	125	0	0.53		150	-25	0.70				
	150	180	-0.45		200	-20	1.15				
	175	-160	-0.55		250	-15	1.27				
7200	15	3	2.00	8100	15	0	0.22				
	25	5	2.02		50	0	0.26				
	50	5	1.95		100	0	0.42				
	75	10	1.52		150	0	0.71				
	100	10	1.14		200	0	1.04				
	125	30	0.85		250	0	1.20				
	150	0	0.49	8300	15	0	0.30				
	175	180	-0.42		50	0	0.32				
	200	180	-0.43		100	0	0.42				
	225	-160	-0.49		150	0	0.59				
7400	15	25	0.82		200	0	0.77				
	25	25	1.12		250	0	0.93				
	50	25	1.39		300	0	0.69				
	75	30	1.44	8500	15	0	0.34				
	100	30	1.44		50	0	0.41				
	125	30	1.19		100	0	0.39				
	150	35	1.00		200	0	0.66				
	175	45	0.77		300	0	0.84				
	200	45	0.57	8700	15	0	0.35				
	225	60	0.44		50	0	0.38				
	250	180	-0.29		100	0	0.50				
	275	-170	-0.30		200	0	0.70				
					300	0	0.84				
				8900	15	0	0.37				
					50	0	0.42				
					100	0	0.52				
					200	0	0.69				
					300	0	0.82				

Table 8.5.7

Ressaut forcé par seuil - mesures de vitesses (Fig. 4.11-3),  
suite.

Q=100 l/s		h <sub>2</sub> =305 mm		sxb=75x75 mm			
x	z	φ	V	x	z	φ	V
mm	mm	-	m/s	mm	mm	-	m/s
6750	15	0	3.20	7950	15	180	-0.34
	25	0	3.33		25	180	-0.30
	35	0	3.39		50	170	-0.27
6950	15	-2	3.27		75	-45	0.42
	25	-5	3.43		100	-40	0.59
	50	0	2.54		125	-30	0.82
	75	0	0.60		150	-20	1.16
	100	-160	-0.45		175	-20	1.46
7150	15	-3	2.94		200	-20	1.59
	25	-5	3.03		225	-30	1.47
	50	-3	2.32	8150	15	5	0.34
	75	-5	1.20		25	0	0.40
	100	0	0.56		50	-10	0.51
	125	-170	-0.48		75	0	0.60
	150	-160	-0.58		100	-5	0.76
	175	-160	-0.36		125	-10	1.00
7350	15	15	1.87		150	-10	1.20
	25	20	2.24		175	-5	1.40
	50	15	2.22		200	-5	1.31
	75	20	1.66	8350	15	0	0.43
	100	25	1.07		50	0	0.57
	125	35	0.63		100	0	0.73
	150	60	0.43		150	5	0.88
	175	-160	-0.41		200	0	0.90
	200	-160	-0.50		250	10	0.52
7550	100	45	0.47	8550	15	0	0.54
	125	40	1.85		50	0	0.57
	150	35	2.18		100	0	0.66
	175	30	1.97		150	0	0.76
	200	30	1.59		200	0	0.75
	225	30	1.17		250	0	0.65
	250	30	0.77	8750	15	0	0.50
7750	15	170	-0.78		50	0	0.55
	25	170	-0.76		100	0	0.63
	50	170	-0.71		150	0	0.70
	75	150	-0.55		200	0	0.77
	100	150	-0.50		250	0	0.75
	125	0	0.38	8950	15	0	0.45
	150	0	0.59		50	0	0.56
	175	0	1.10		100	0	0.63
	200	-5	1.50		150	0	0.68
	225	-10	1.67		200	0	0.74
	250	-5	1.64		250	0	0.77
	275	-10	1.35				





Table 8.5.10

Ressaut forcé par seuil - mesures de pression sur le fond (Fig. 4.13). mm CE = mm colonne d'eau; les numéros 4 à 9 et 16 à 20 correspondent aux prises de pressions sur le fond du canal, les numéros 10 à 15 à celles sur le seuil.

no	x mm	Type 1)		Type 2)		Type 3)		Type 4)		Type 5)	
		P mm CE	h mm								
4	5740	57	53	-	-	-	-	-	-	-	-
5	6040	70	57	62	54	-	-	-	-	-	-
6	6340	129	185	67	55	58	53	59	53	57	54
7	6640	184	240	128	167	57	55	48	53	51	54
8	6940	248	273	191	215	104	143	65	53	57	53
9	7240	313	319	261	273	185	222	135	168	86	56
10	7515	391	336	406	317	419	275	441	275	441	214
11	7515	381	336	421	317	446	275	476	275	486	214
12	7520	261	339	226	328	161	302	116	290	46	265
13	7555	281	340	231	327	172	330	125	290	58	330
14	7590	305	338	268	324	227	335	151	329	94	356
15	7590	307	338	277	324	225	335	162	329	93	356
16	7840	319	331	277	312	216	320	159	341	94	372
17	8140	334	333	314	280	282	223	239	192	163	295
18	8440	340	332	318	313	295	312	257	283	125	145
19	8740	341	335	319	318	300	307	267	278	96	104
20	9040	342	337	325	319	301	305	273	278	105	107

Table 8.5.11

Ressaut forcé par seuil - profils de surface (Fig. 5.1-5.2).  
 Pour chaque section longitudinale  $y$ , min et max donnent les valeurs minimales et maximales de la hauteur d'eau;  $h_1=53$  mm.

y mm	50	50	150	150	250	250	350	350	450	450
x mm	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Q=100 l/s	h2=337 mm		sxb=75x75 mm							
6150	53	122	53	136	53	133	53	141	53	143
6250	53	179	53	170	53	171	53	179	53	169
6450	137	223	139	220	143	213	135	224	137	219
6650	174	272	175	276	180	269	178	271	180	267
6850	197	298	213	305	213	300	204	302	206	295
7050	247	335	244	331	243	337	245	334	250	336
7250	277	349	283	353	274	353	280	348	285	350
7450	300	366	299	359	296	366	301	361	302	364
7650	301	362	301	361	304	365	305	363	302	365
7850	296	353	300	355	298	352	298	352	301	359
8050	304	360	305	359	303	364	302	358	305	361
8250	305	366	312	360	307	363	301	361	306	362
8450	316	356	318	354	322	354	321	357	318	354
8650	318	361	321	353	324	353	318	360	316	354
8850	324	352	328	349	326	351	322	355	324	353
Q=100 l/s	h2=305 mm		sxb=75x75 mm							
6750	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53
6850	53	142	53	134	53	136	53	130	53	139
6950	53	159	53	153	53	166	53	149	53	159
7050	108	201	107	192	103	201	107	188	110	198
7150	133	239	127	238	129	239	134	230	130	224
7250	164	263	152	270	154	265	153	259	147	261
7350	201	308	181	293	183	288	189	278	190	299
7450	239	330	227	317	217	307	228	313	230	315
7550	252	342	250	337	259	357	249	331	241	324
7650	250	358	255	361	275	366	270	358	250	333
7750	235	353	248	365	268	372	275	359	254	339
7850	229	337	234	359	250	360	246	346	228	330
7950	210	316	210	335	216	338	215	330	209	313
8050	193	292	196	283	195	282	195	287	212	281
8150	204	315	196	306	195	301	208	290	204	311
8250	248	334	231	328	232	335	231	349	240	331
8350	279	346	269	343	278	345	270	333	266	343
8450	275	337	287	344	280	340	278	343	273	331
8550	278	336	281	333	280	331	284	332	289	329
8650	274	326	282	323	285	324	282	326	283	327

Table 8.5.12

Ressaut forcé type A - mesures de vitesses moyennes avec les directions dans les plans vertical et horizontal (Fig. 5.3-1).  $h_1=53$  mm.

Q=100 l/s		h2=337 mm			sxb=75x75 mm y=50 mm				
x	z	$\varphi$	$\theta$	v	x	z	$\varphi$	$\theta$	v
mm	mm	-	-	m/s	mm	mm	-	-	m/s
6050	15	0	0	3.31	7550	100	20	-20	0.87
	25	0	0	3.30		125	10	-10	0.84
	35	0	0	3.31		150	10	0	0.87
6250	15	0	0	3.06		175	15	0	0.85
	25	0	0	3.18		200	15	0	0.66
	50	0	0	2.46		225	20	0	0.65
	75	0	0	0.99		250	15	0	0.56
	100	-170	180	-0.49		275	10	0	0.53
6450	15	5	0	2.21		300	10	10	0.46
	25	5	0	2.71	7750	15	180	180	-0.26
	50	5	0	2.38		50	-30	0	0.34
	75	5	0	1.65		100	-15	0	0.47
	100	5	0	0.97		150	-10	0	0.77
	125	180	180	-0.51		200	0	0	0.78
	150	-170	180	-0.53		250	0	0	0.77
6650	15	5	0	2.03		300	-5	0	0.69
	25	10	0	2.31	7950	15	0	0	0.24
	50	10	0	2.13		50	-20	0	0.37
	75	5	0	1.75		100	-10	0	0.56
	100	10	0	1.18		150	-5	0	0.66
	125	10	0	0.66		200	0	0	0.75
	150	180	180	-0.51		250	0	0	0.77
	175	-170	180	-0.55		300	0	0	0.78
	200	-160	180	-0.57	8200	15	0	0	0.26
6850	15	10	0	1.36		50	0	0	0.33
	50	10	0	1.76		100	0	0	0.51
	100	10	0	1.23		150	0	0	0.54
	150	10	0	0.58		200	0	0	0.70
	200	180	180	-0.47		250	0	0	0.78
	250	-170	180	-0.40		300	0	0	0.72
7050	15	15	0	1.05	8450	15	0	0	0.31
	50	10	0	1.38		50	0	0	0.33
	100	10	0	1.13		100	0	0	0.45
	150	10	0	0.66		200	0	0	0.66
	200	180	180	-0.42		300	0	0	0.73
	250	-170	180	-0.43					
7300	15	20	10	0.49					
	50	20	0	0.76					
	100	20	0	0.81					
	150	20	0	0.71					
	200	40	0	0.53					
	250	160	180	-0.24					
	300	-170	180	-0.25					

Table 8.5.13

Ressaut forcé type A - mesures de vitesses (Fig. 5.3-2),  
suite.

Q=100 l/s		h2=337 mm			sxb=75x75 mm		y=150 mm		
x	z	$\psi$	$\theta$	V	x	z	$\psi$	$\theta$	V
mm	mm	-	-	m/s	mm	mm	-	-	m/s
6050	15	0	0	3.35	7550	100	5	-20	0.86
	25	0	0	3.38		125	10	-10	1.22
	35	0	0	3.35		150	20	0	1.21
6250	15	0	0	3.20		175	15	0	1.09
	25	0	0	3.33		200	20	0	1.01
	50	5	0	3.09		225	20	0	0.86
	75	0	0	1.18		250	20	0	0.75
	100	180	180	-0.47		275	15	0	0.61
6450	15	5	0	2.97		300	10	0	0.49
	25	5	0	3.08	7750	15	180	180	-0.32
	50	5	0	2.63		50	160	180	-0.30
	75	0	0	1.63		100	-10	0	0.39
	100	10	0	0.82		150	-10	0	0.80
	125	180	180	-0.52		200	0	0	1.04
	150	-160	180	-0.49		250	0	0	0.96
6650	15	5	0	2.44		300	-10	0	0.79
	25	5	0	2.59	7950	15	0	0	0.21
	50	5	0	2.35		50	0	0	0.28
	75	10	0	1.80		100	-10	0	0.42
	100	15	0	1.20		150	0	0	0.68
	125	0	0	0.75		200	-5	0	0.91
	150	-170	180	-0.49		250	0	0	0.98
	175	-160	180	-0.57		300	-10	0	0.86
6850	15	10	0	2.02	8200	15	5	0	0.30
	50	10	0	2.02		50	5	0	0.34
	100	10	0	1.38		100	0	0	0.41
	150	0	0	0.61		150	0	0	0.55
	200	-170	180	-0.52		200	0	0	0.68
7050	15	10	0	1.49		250	0	0	0.84
	50	10	0	1.75		300	0	0	0.84
	100	15	0	1.34	8450	15	0	0	0.35
	150	20	0	0.81		50	0	0	0.37
	200	180	180	-0.44		100	0	0	0.46
	250	180	180	-0.41		200	0	0	0.67
7300	15	20	10	0.84		300	0	0	0.84
	50	20	10	1.08					
	100	20	0	1.19					
	150	30	0	0.91					
	200	30	0	0.57					
	250	180	180	-0.38					
	300	-170	180	-0.34					

Table 8.5.14

Ressaut forcé type A - mesures de vitesses (Fig. 5.3-3),  
suite.

Q=100 l/s		h2=337 mm			sxb=75x75 mm y=350 mm				
x	z	$\varphi$	$\theta$	V	x	z	$\varphi$	$\theta$	V
mm	mm	-	-	m/s	mm	mm	-	-	m/s
6050	15	0	0	3.50	7550	100	15	20	0.53
	25	0	0	3.45		125	20	10	1.23
	35	0	0	3.42		150	20	0	1.31
6250	15	0	0	3.38		175	20	0	1.21
	25	0	0	3.51		200	15	0	1.16
	50	0	0	2.95		225	15	0	0.94
	75	0	0	1.30		250	10	0	0.78
	100	180	180	-0.44		275	10	0	0.66
6450	25	0	0	3.25		300	5	0	0.60
	50	0	0	2.72	7750	15	180	-160	-0.34
	75	0	0	1.68		50	180	180	-0.27
	100	10	0	0.94		100	-10	0	0.38
	125	180	180	-0.51		150	10	0	0.86
	150	-170	180	-0.48		200	0	0	1.18
	175	-160	180	-0.47		250	0	0	1.06
6650	15	0	0	2.67		300	-5	0	0.86
	25	0	0	2.76	7950	15	0	0	0.21
	50	0	0	2.40		50	0	0	0.23
	75	0	0	1.87		100	-10	0	0.38
	100	10	0	1.23		150	0	0	0.62
	125	15	0	0.81		200	0	0	0.95
	150	180	180	-0.51		250	0	0	1.08
	175	-170	180	-0.50		300	-10	0	0.92
	200	-160	180	-0.49	8200	15	0	0	0.28
6850	15	0	0	2.05		50	0	0	0.31
	50	5	0	2.17		100	0	0	0.43
	100	15	0	1.35		150	0	0	0.56
	150	15	0	0.67		200	0	0	0.74
	200	15	180	-0.47		250	0	0	0.89
	250	180	180	-0.33		300	0	0	0.88
7050	15	5	0	1.56	8450	15	0	0	0.31
	50	5	0	1.78		50	0	0	0.37
	100	15	0	1.37		100	0	0	0.48
	150	15	0	0.90		200	0	0	0.66
	200	180	180	-0.48		300	0	0	0.90
	250	180	180	-0.41					
7300	15	10	-10	1.07					
	50	10	0	1.30					
	100	15	0	1.35					
	150	15	0	1.04					
	200	30	0	0.71					
	250	180	180	-0.43					
	300	-170	180	-0.28					

Table 8.5.15

Ressaut forcé type A - mesures de vitesses (Fig. 5.3-4),  
suite.

Q=100 l/s		h2=337 mm			sxb=75x75 mm		y=450 mm		
x	z	$\varphi$	$\theta$	V	x	z	$\varphi$	$\theta$	V
mm	mm	-	-	m/s	mm	mm	-	-	m/s
6050	15	0	0	3.59	7550	100	10	20	0.69
	25	0	0	3.60		125	10	10	1.24
	35	0	0	3.32		150	15	5	1.21
6250	15	0	0	3.34		175	15	0	1.16
	25	0	0	3.36		200	20	0	0.94
	50	0	0	2.65		225	15	0	0.84
	75	0	0	0.88		250	15	0	0.71
	100	-170	180	-0.44		275	15	0	0.62
6450	15	0	0	2.87		300	0	0	0.49
	25	0	0	3.08	7750	15	180	-160	-0.24
	50	0	0	2.66		50	-20	0	0.27
	75	0	0	1.81		100	0	0	0.55
	100	10	0	0.96		150	-10	0	0.95
	125	180	180	-0.46		200	0	0	1.04
	150	-170	180	-0.45		250	5	0	0.95
	175	-160	180	-0.39		300	-10	0	0.82
6650	15	0	0	2.20	7950	15	0	0	0.25
	25	0	0	2.58		50	0	0	0.29
	50	0	0	2.47		100	-10	0	0.51
	75	5	0	1.94		150	-5	0	0.73
	100	0	0	1.37		200	0	0	0.94
	125	0	0	0.75		250	0	0	1.01
	150	0	0	0.52		300	-5	0	0.86
	175	-170	180	-0.49	8200	15	0	0	0.29
6850	15	5	0	1.71		50	0	0	0.33
	50	5	0	2.16		100	0	0	0.48
	100	10	0	1.62		150	0	0	0.60
	150	20	0	0.74		200	0	0	0.77
	200	-170	180	-0.47		250	0	0	0.82
	250	-160	180	-0.33		300	0	0	0.82
7050	15	5	-10	1.26	8450	15	0	0	0.28
	50	5	0	1.68		50	0	0	0.42
	100	10	0	1.46		100	0	0	0.48
	150	20	0	1.00		200	0	0	0.68
	200	180	180	-0.49		300	0	0	0.80
	250	-170	180	-0.40					
7300	15	10	-20	0.81					
	50	15	0	1.12					
	100	15	0	1.21					
	150	30	0	1.00					
	200	30	0	0.66					
	250	180	180	-0.35					
	300	-170	180	-0.29					

Table 8.5.16

Ressaut forcé type  $B_{min}$  - mesures de vitesses moyennes avec les directions dans les plans vertical et horizontal (Fig. 5.4-1).  $h_1=53$  mm.

Q=100 l/s		h2=305 mm			sxb=75x75 mm					y=50 mm	
x	z	$\varphi$	$\theta$	V	x	z	$\varphi$	$\theta$	V		
mm	mm	-	-	m/s	mm	mm	-	-	m/s		
6750	15	0	0	3.40	7750	15	160	150	-0.44		
	25	0	0	3.49		50	160	180	-0.39		
	35	0	0	3.28		100	-15	0	0.71		
6950	15	0	0	3.20		150	-10	0	1.35		
	25	0	0	3.36		200	-10	0	1.45		
	50	5	0	3.11		250	-20	0	0.91		
	75	0	0	1.49	7950	15	180	180	-0.33		
	100	180	180	-0.43		50	-20	10	0.51		
7150	15	5	0	2.76		100	-15	0	1.01		
	25	0	0	3.05		150	-10	0	1.33		
	50	0	0	2.74		200	-10	-10	1.34		
	75	5	0	1.75	8150	15	0	0	0.44		
	100	10	0	0.82		50	0	0	0.62		
	125	180	180	-0.46		100	0	0	0.89		
	150	-160	180	-0.43		150	5	0	1.11		
7350	15	20	10	1.19		200	15	0	1.10		
	25	20	5	1.77	8350	15	0	0	0.43		
	50	20	5	2.32		50	0	0	0.56		
	75	25	5	1.87		100	0	0	0.68		
	100	30	0	1.35		150	5	0	0.81		
	125	40	0	0.89		200	10	0	0.82		
	150	60	0	0.56		250	10	0	0.57		
	175	150	180	-0.29	8550	15	0	0	0.43		
	200	-170	180	-0.32		50	0	0	0.53		
7550	100	30	-40	1.03		100	0	0	0.60		
	125	25	-20	2.29		150	0	0	0.68		
	150	20	-10	1.83		200	0	0	0.72		
	175	15	-54	1.26		250	0	0	0.67		
	200	15	0	0.80							
	225	10	0	0.49							
	250	0	0	0.38							
	275	0	30	0.33							

Table 8.5.17

Ressaut forcé type  $B_{min}$  - mesures de vitesses (Fig. 5.4-2),  
suite.

Q=100 l/s		h2=305 mm			sxb=75x75 mm			y=150 mm		
x	z	$\varphi$	$\theta$	V	x	z	$\varphi$	$\theta$	V	
mm	mm	-	-	m/s	mm	mm	-	-	m/s	
6750	15	0	0	3.34	7750	15	170	160	-0.72	
	25	0	0	3.49		50	170	-170	-0.57	
	35	0	0	3.37		100	20	0	0.32	
6950	15	0	0	3.10		150	0	0	0.91	
	25	0	0	3.32		200	-5	0	1.62	
	50	5	0	2.43		250	-10	-10	1.38	
	75	0	0	0.56	7950	15	180	90	-0.33	
	100	180	180	-0.35		50	0	20	0.32	
7150	15	5	0	2.83		100	-20	0	0.69	
	25	5	0	2.97		150	-15	0	1.20	
	50	5	0	2.45		200	-20	0	1.41	
	75	5	0	1.50		250	-20	-10	0.91	
	100	15	0	0.71	8150	15	0	0	0.42	
	125	180	180	-0.45		50	0	0	0.51	
	150	-170	180	-0.48		100	0	0	0.70	
7350	15	20	5	1.66		150	0	0	1.13	
	25	20	5	2.21		200	0	0	1.16	
	50	20	0	2.38	8350	15	10	0	0.50	
	75	20	0	2.00		50	10	0	0.52	
	100	20	0	1.53		100	5	0	0.68	
	125	30	0	0.86		150	5	0	0.87	
	150	30	0	0.60		200	10	0	0.88	
	175	-170	170	-0.41		250	5	0	0.60	
	200	-160	170	-0.49	8550	15	10	0	0.52	
7550	100	40	-35	0.77		50	10	0	0.53	
	125	30	-15	2.25		100	5	0	0.65	
	150	30	0	2.18		150	5	0	0.74	
	175	25	0	1.89		200	5	0	0.77	
	200	25	0	1.36		250	0	0	0.74	
	225	25	0	0.90						
	250	20	-15	0.53						
	275	0	-20	0.32						

Table 8.5.18

Ressaut forcé type  $B_{min}$  - mesures de vitesses (Fig. 5.4-3),  
suite.

Q=100 l/s		h2=305 mm			sxb=75x75 mm			y=350 mm	
x	z	$\varphi$	$\theta$	V	x	z	$\varphi$	$\theta$	V
mm	mm	-	-	m/s	mm	mm	-	-	m/s
6750	15	0	0	3.47	7750	15	180	-160	-0.63
	25	0	0	3.64		50	170	-170	-0.51
	35	0	0	3.41		100	180	180	0.41
6950	15	0	0	3.29		150	0	0	0.99
	25	0	0	3.48		200	0	0	1.70
	50	0	0	2.58		250	0	0	1.38
	75	0	0	0.71		300	-10	0	0.75
	100	-160	180	-0.43	7950	15	180	-90	-0.25
7150	15	0	0	2.97		50	0	0	0.28
	25	0	0	3.11		100	-20	0	0.61
	50	5	0	2.50		150	-20	0	1.19
	75	5	0	1.53		200	-20	0	1.48
	100	0	0	0.67		250	-30	0	0.97
	125	180	180	-0.44	8150	15	0	-15	0.41
	150	-170	180	-0.45		50	0	-10	0.49
7350	15	20	-5	2.18		100	0	0	0.74
	25	20	-5	2.46		150	0	0	1.16
	50	15	-5	2.49		200	0	0	1.35
	75	15	-5	2.02	8350	15	0	0	0.45
	100	20	-10	1.41		50	0	0	0.52
	125	20	-10	0.94		100	10	0	0.69
	150	0	-10	0.46		150	10	0	0.89
	175	-160	180	-0.46		200	0	0	0.97
	200	-170	180	-0.46		250	15	0	0.71
7550	100	40	40	1.13	8550	15	0	0	0.47
	125	35	0	2.46		50	0	0	0.54
	150	25	0	2.30		100	10	0	0.66
	175	25	0	1.84		150	5	0	0.76
	200	20	0	1.26		200	0	0	0.79
	225	20	0	0.79		250	0	0	0.78
	250	10	0	0.46					

Table 8.5.19

Ressaut forcé type  $B_{min}$  - mesures de vitesses (Fig. 5.4-4),  
suite.

Q=100 l/s		h2=305 mm			sxb=75x75 mm					y=450 mm	
x	z	$\varphi$	$\theta$	V	x	z	$\varphi$	$\theta$	V		
mm	mm	-	-	m/s	mm	mm	-	-	m/s		
6750	15	0	0	3.46	7750	15	150	-140	-0.31		
	25	0	0	3.51		50	180	-40	-0.39		
	35	0	0	3.54		100	-15	-10	0.78		
6950	15	0	0	3.24		150	-10	0	1.40		
	25	0	0	3.33		200	-15	0	1.49		
	50	5	0	3.08		250	-20	10	0.93		
	75	0	0	1.29	7950	15	180	180	-0.36		
	100	-160	180	-0.34		50	-20	-15	0.55		
7150	15	10	0	2.86		100	-20	0	0.95		
	25	0	0	3.10		150	-15	0	1.27		
	50	0	0	2.79		200	-15	10	1.33		
	75	5	0	1.93	8150	15	0	0	0.50		
	100	10	0	0.90		50	-10	0	0.66		
	125	180	180	-0.46		100	0	0	0.87		
	150	-160	180	-0.40		150	5	0	1.13		
7350	15	15	-10	1.33		200	5	0	1.25		
	25	20	-5	1.76	8350	15	5	0	0.52		
	50	20	-5	2.67		50	5	0	0.59		
	75	20	0	2.28		100	5	0	0.74		
	100	20	0	1.65		150	10	0	0.88		
	125	30	0	1.05		200	10	0	0.93		
	150	45	0	0.61		250	5	0	0.70		
	175	180	180	-0.34	8550	15	0	0	0.44		
	200	-170	-150	-0.29		50	0	0	0.51		
7550	100	35	40	1.05		100	0	0	0.67		
	125	20	15	2.30		150	0	0	0.76		
	150	20	10	1.89		200	0	0	0.83		
	175	20	5	1.34		250	0	0	0.72		
	200	20	0	0.97							
	225	15	0	0.64							
	250	10	-20	0.39							

Table 8.5.20

Ressaut forcé type A - directions des lignes de courant dans le plan horizontal, près du seuil (Fig. 5.5-a),  $h_1 = 53$  mm.

Q=100 l/s	h2=337 mm				sxb=75x75 mm				z=15 mm
y mm	50	100	150	200	250	300	350	400	450
x mm									
7000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7050	10	0	0	0	0	0	0	0	-10
7100	10	10	0	0	0	0	0	-10	-10
7150	10	10	10	0	0	0	-10	-10	-10
7200	20	10	10	10	0	-10	-10	-10	-20
7250	20	20	10	10	0	-10	-10	-20	-20
7300	30	20	10	10	0	-10	-20	-20	-30
7350	20	30	-10	0	0	0	10	-10	-20
7400	-120	-40	-20	-10	0	20	10	30	130
7450	-120	-80	-80	-70	0	80	80	80	120
7500	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7550	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7600	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7650	160	160	160	150	180	-160	-150	-160	-150
7700	150	160	150	160	180	-150	-140	-150	-140
7750	150	150	150	150	180	-150	-140	-140	-130
7800	50	140	130	160	180	-140	-130	-130	-60
7850	40	50	120	140	180	-130	-120	-50	-50
7900	30	60	60	130	180	-120	-60	-40	-40
7950	20	60	50	60	180	-40	-40	-30	-30
8000	20	30	30	30	0	-30	-30	-20	-20
8050	20	30	30	30	0	-30	-30	-20	-20
8100	10	20	20	20	0	-20	-20	-20	-10

Table 8.5.21

Ressaut forcé type A - directions des lignes de courant (Fig. 5.5-b), suite.

Q=100 l/s	h <sub>2</sub> =337 mm				s <sub>x</sub> b=75x75 mm				z=50 mm	
y mm	50	100	150	200	250	300	350	400	450	
x mm										
7000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7050	0	0	10	10	0	0	-10	0	0	
7100	10	10	10	10	0	-10	-10	0	0	
7150	10	10	10	10	0	-10	-10	-10	-10	
7200	10	10	10	10	0	-10	0	-10	-10	
7250	10	0	0	0	0	0	0	0	-10	
7300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7350	-10	-10	-10	-10	0	10	10	10	10	
7400	-20	-20	-20	-10	0	10	20	20	20	
7450	-50	-40	-30	-20	0	20	30	40	50	
7500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7550	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7650	-40	-130	-150	-130	180	130	130	120	40	
7700	20	-150	-160	-160	180	150	160	150	-20	
7750	20	60	180	180	180	180	170	-50	-20	
7800	20	50	140	160	180	-160	-50	-40	-20	
7850	20	30	60	120	180	-130	-40	-30	-20	
7900	20	20	40	60	180	-70	-30	-20	-20	
7950	20	20	30	50	0	-50	-20	-20	-20	
8000	10	10	20	30	0	-30	-20	-10	-10	
8050	10	10	100	10	0	-10	-10	-10	-10	
8100	10	10	10	10	0	-10	-10	-10	-10	

Table 8.5.22

Ressaut forcé type A - directions des lignes de courant (Fig. 5.5-c), suite.

Q=100 l/s	h2=337 mm				sxb=75x75 mm				z=85 mm	
y mm	50	100	150	200	250	300	350	400	450	
x mm										
7000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7050	10	0	0	0	0	0	0	0	0	
7100	10	0	0	0	0	0	0	0	-10	
7150	0	10	10	0	0	0	0	-10	-10	
7200	0	10	10	10	0	0	-10	-10	0	
7250	0	0	0	0	0	-10	-10	0	0	
7300	10	0	0	0	0	0	0	0	-10	
7350	10	10	-10	0	0	0	0	-10	-10	
7400	10	10	-10	0	0	-10	0	0	0	
7450	-20	-20	-10	-10	0	10	10	10	10	
7500	-40	-40	-30	-30	0	20	30	40	40	
7550	-30	-30	-110	-120		120	120	30	30	
7600	-20	-20	-30	-150	180	160	30	20	20	
7650	-10	-10	-20	-30	0	20	10	10	10	
7700	10	-10	-20	-30	0	30	20	10	10	
7750	10	10	0	-20	0	20	10	0	-10	
7800	20	10	10	10	0	-10	0	-10	-10	
7850	20	10	20	10	0	-20	-20	-20	-20	
7900	10	20	20	20	0	-20	-20	-20	-20	
7950	10	20	10	20	0	-20	-10	-10	-10	
8000	10	10	10	10	0	-10	-10	-10	-10	
8050	10	10	10	10	0	-10	-10	-10	-10	
8100	10	10	10	0	0	0	-10	-10	-10	



Table 8.5.24

Ressaut forcé type  $B_{min}$  - directions des lignes de courant dans le plan horizontal, près du seuil (Fig. 5.6-a):  $h_1 = 53$  mm.

Q=100 l/s	h2=305 mm				sxb=75x75 mm				z=15 mm	
y mm	50	100	150	200	250	300	350	400	450	
x mm										
7000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7050	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7150	5	0	0	0	0	0	0	0	-5	
7200	10	5	0	0	0	0	0	-5	-10	
7250	10	10	0	0	0	0	0	-10	-10	
7300	15	10	5	0	0	0	-5	-10	-15	
7350	20	10	0	0	0	0	0	-10	-20	
7400	-45	-10	-15	-10	0	10	10	20	40	
7450	-120	-80	-70	-50	0	50	70	80	120	
7500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7550	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7650	-150	-150	-150	-170	180	160	150	150	150	
7700	140	150	170	180	180	180	-160	-150	-140	
7750	140	150	160	160	180	-170	-150	-140	-140	
7800	120	140	150	160	180	-160	-140	-130	-120	
7850	90	120	130	150	180	-150	-130	-120	-90	
7900	70	90	120	140	180	-140	-120	-90	-60	
7950	30	60	90	130	180	-120	-90	-60	-30	
8000	20	30	60	90	180	-90	-60	-30	-20	
8050	10	20	30	60	0	-60	-30	-20	-20	
8100	10	20	20	30	0	-30	-20	-20	-10	

Table 8.5.25

Ressaut forcé type  $B_{min}$  - directions des lignes de courant  
(Fig. 5.6-b), suite.

Q=100 l/s	h2=305 mm				sxb=75x75 mm			z=50 mm	
y mm	50	100	150	200	250	300	350	400	450
x mm									
7000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7050	5	0	0	0	0	0	0	0	0
7100	5	0	0	0	0	0	0	0	0
7150	5	5	0	0	0	0	0	0	-5
7200	5	5	0	0	0	0	0	-5	-5
7250	5	5	0	0	0	0	0	-5	-5
7300	0	0	0	0	0	0	0	0	-5
7350	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7400	-10	-10	-5	0	0	0	5	10	10
7450	-30	-20	-10	0	0	0	10	20	30
7500	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7550	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7600	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7650	-150	-150	-150	-160	180	160	150	150	150
7700	160	170	180	-170	180	180	180	-150	-150
7750	140	160	170	180	180	180	-160	-140	-70
7800	70	140	160	170	180	-170	-140	-130	-40
7850	40	70	140	160	180	-160	-130	-70	-30
7900	20	30	110	150	180	-140	-70	-40	-20
7950	20	10	60	120	180	-120	-40	-30	-10
8000	10	10	30	60	0	-60	-20	-20	-10
8050	10	0	0	40	0	-40	0	0	-10
8100	0	0	0	10	0	-20	0	0	0

Table 8.5.26

Ressaut forcé type  $B_{min}$  - directions des lignes de courant  
(Fig. 5.6-c), suite.

Q=100 l/s	h2=305 mm				sxb=75x75 mm				z=85 mm	
y mm	50	100	150	200	250	300	350	400	450	
x mm										
7000	10	5	0	0	0	0	0	-10	-10	
7050	5	0	0	0	0	0	0	0	-5	
7100	5	0	0	0	0	0	0	0	-5	
7150	0	0	0	0	0	0	0	0	-5	
7200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7250	0	0	0	0	0	0	0	0	-5	
7300	5	0	0	0	0	0	0	0	0	
7350	10	5	0	0	0	0	0	-5	-10	
7400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7450	-10	-5	0	10	0	-10	0	5	10	
7500	-40	-20	-30	-30	0	30	30	20	40	
7550	-120	-110	-130	-130	180	120	130	110	120	
7600	-30	-150	-150	-150	180	150	150	150	30	
7650	30	-120	-140	-160	180	170	140	60	10	
7700	20	-30	-160	-160	180	180	160	30	-10	
7750	20	30	-160	-160	180	170	180	20	-10	
7800	20	50	160	180	180	-170	160	-30	-10	
7850	10	20	130	-170	180	-160	-130	-20	-10	
7900	20	20	50	130	180	-120	-40	-20	0	
7950	20	20	20	50	0	-50	-20	-10	0	
8000	10	10	20	20	0	-20	-10	-10	0	
8050	10	10	10	20	0	-20	-10	0	0	
8100	10	10	10	10	0	-10	-10	0	0	

Table 8.5.27

Ressaut forcé type  $B_{min}$  - directions des lignes de courant  
(Fig. 5.6-d), suite et fin.

Q=100 l/s	h2=305 mm				sxb=75x75 mm				z=120 mm	
y mm	50	100	150	200	250	300	350	400	450	
x mm										
7000	180	180	180	180	180	180	180	180	180	
7050	180	-160	-160	180	180	180	180	170	180	
7100	-160	-20	-160	-170	180	170	170	20	160	
7150	-20	10	-10	-160	180	160	170	10	20	
7200	-10	0	0	0	180	0	-20	0	10	
7250	0	0	0	0	0	-10	10	10	0	
7300	10	10	10	10	0	0	0	0	-10	
7350	20	20	10	10	0	-10	0	-10	-10	
7400	10	10	10	0	0	-10	-10	-10	-10	
7450	0	0	10	10	0	0	-10	0	0	
7500	-10	0	10	10	0	0	-10	10	10	
7550	-20	-10	0	-10	0	10	10	20	20	
7600	-10	-30	-20	-30	0	300	20	40	20	
7650	0	-20	-50	-60	0	60	50	20	10	
7700	10	-20	-30	-50	0	40	30	20	10	
7750	10	10	-10	-30	0	20	10	0	0	
7800	10	10	20	-10	0	0	-20	-10	0	
7850	10	10	20	10	0	-10	-20	-10	-10	
7900	10	10	10	20	0	-20	-10	-10	-10	
7950	10	10	10	20	0	-20	-10	-10	-10	
8000	10	10	0	10	0	-10	0	-10	-10	
8050	10	10	0	10	0	-10	0	-10	0	
8100	10	0	0	10	0	-10	0	0	0	

Table 8.5.28

Ressaut forcé type C - directions des lignes de courant dans le plan horizontal, près du seuil (Fig. 5.7-a),  $h_1=53$  mm.

Q=100 l/s	h <sub>2</sub> =276 mm				s <sub>x</sub> b=75x75 mm				z=15 mm	
y mm	50	100	150	200	250	300	350	400	450	
x mm										
7000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7050	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7250	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7300	10	10	0	0	0	0	0	-10	-10	
7350	10	10	0	0	0	0	0	-10	-10	
7400	-20	-10	-10	-10	0	10	10	20	20	
7450	-100	-70	-60	-40	0	40	60	70	100	
7500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7550	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7650	-140	-150	-160	-170	180	170	160	150	150	
7700	160	170	180	180	180	180	180	-160	-160	
7750	150	150	160	170	180	-170	-160	-150	-140	
7800	120	140	150	160	180	-160	-150	-140	-120	
7850	100	120	140	150	180	-150	-140	-120	-100	
7900	60	100	130	140	180	-140	-130	-100	-60	
7950	30	50	110	130	180	-120	-110	-60	-30	
8000	20	30	60	110	180	-100	-60	-30	-20	
8050	10	20	30	50	0	-50	-30	-20	-10	
8100	0	10	20	30	0	-30	-20	-10	-10	
8150	0	10	20	10	0	-20	-10	-10	0	
8200	0	10	10	0	0	0	-10	0	0	
8250	0	0	10	0	0	0	0	0	0	







Table 8.5.32

Ressaut forcé type A - mesures de pressions, avec angle dans le plan vertical (Fig. 5.13),  $h_1 = 53$  mm.

Q=100 l/s		h2=337 mm					sxb=75x75 mm						
x	z	$\varphi$	h	H	h-z	V	x	z	$\varphi$	h	H	h-z	V
mm	mm	-	mm	mm	mm	m/s	mm	mm	-	mm	mm	mm	m/s
6050	15	0	64	760	49	3.70	7550	100	-10	259	300	159	0.90
	25	0	64	792	39	3.78		125	5	270	355	145	1.29
	35	0	64	810	29	3.83		150	10	285	366	135	1.26
								175	10	289	360	114	1.18
6250	15	0	95	756	80	3.60		200	5	295	347	95	1.01
	25	0	88	768	63	3.65		225	5	301	337	76	0.84
	50	0	76	532	26	2.99		250	5	306	331	56	0.70
	75	0	84	125	9	0.90		275	0	312	324	37	0.49
	100	0	-	-	-	-		300	0	318	321	18	0.24
6450	15	0	112	694	97	3.38	7750	15	170	288	270	273	-0.59
	25	0	114	673	89	3.31		50	170	286	267	236	-0.61
	50	0	105	454	55	2.62		100	0	283	271	183	-0.49
	75	0	105	212	30	1.45		150	5	282	304	132	0.66
	100	10	121	136	21	0.54		200	0	290	353	90	1.11
	125	0	132	126	7	-0.34		250	0	300	355	50	1.04
	150	-160	-	-	-	-		300	-5	-	-	-	-
6650	15	0	154	550	139	2.79	7950	15	180	304	286	289	0.59
	25	0	152	554	127	2.81		50	0	302	283	252	0.61
	50	0	145	435	95	2.39		100	0	300	287	200	0.51
	75	0	144	294	69	1.72		150	0	299	307	149	0.40
	100	10	151	209	51	1.07		200	0	299	337	99	0.86
	125	20	157	164	32	0.37		250	0	302	354	52	1.01
	150	0	166	166	16	0.00		300	0	-	-	-	-
	175	180	-	-	-	-							
							8200	15	0	315	311	300	0.28
6850	15	5	188	462	173	2.32		50	0	314	312	264	0.20
	50	5	187	405	137	2.07		100	0	312	315	212	0.24
	100	10	192	271	92	1.24		150	0	312	325	162	0.51
	150	0	204	216	54	0.49		200	0	313	340	113	0.73
	200	180	217	213	17	-0.28		250	0	313	355	63	0.91
	250	-170	-	-	-	-		300	0	318	362	18	0.93
7050	15	5	231	410	216	1.87	8450	15	0	320	321	305	0.14
	50	5	226	385	176	1.77		50	0	319	321	269	0.20
	100	10	225	308	125	1.28		100	0	319	323	219	0.28
	150	15	237	271	87	0.82		150	0	319	331	169	0.49
	200	180	248	253	48	0.31		200	0	318	340	118	0.66
	250	180	259	259	9	0.00		250	0	319	356	69	0.85
								300	0	319	362	19	0.92
7300	15	10	290	352	275	1.10							
	50	10	289	369	239	1.25							
	100	10	285	347	185	1.10							
	150	15	283	317	133	0.82							
	200	20	292	298	92	0.34							
	250	180	300	291	50	-0.42							
	300	180	-	-	-	-							



Table 8.5.34

Mesures de pression sur les faces verticales du seuil ;  
 AM(250) : à l'amont à l'axe, AM(50) : à l'amont à 50 mm du bord;  
 AV(250) : à l'aval à l'axe, AV(50) : à l'aval à 50 mm du bord. Voir Fig. 5.15.

Q=42 l/s	h1=25.5 mm				F1=6.59		s=50 mm	
z	AM (250)		AM (50)		AV (250)		AV (50)	
	h	H	h	H	h	H	h	H
Ressaut forcé type A (h2 = 206 mm)								
5	209	200	220	218	196	196	198	198
15	207	201	221	217	194	194	196	196
25	209	206	230	231	194	193	196	195
35	208	205	227	230	193	192	194	193
45	201	195	221	219	193	192	194	192
Ressaut forcé type B (h2 = 196 mm)								
5	211	202	216	218	182	182	183	183
15	207	201	220	224	181	181	182	183
25	207	203	230	237	181	180	183	183
35	203	200	230	237	180	178	181	180
45	192	180	222	223	179	176	179	178
Ressaut forcé type Bmin (h2 = 190 mm)								
5	208	200	216	219	167	167	166	165
15	206	220	220	238	166	166	165	164
25	208	223	228	255	166	165	164	163
35	208	225	227	242	163	162	163	162
45	192	183	205	204	163	160	160	157

Table 8.5.35

Ressaut classique (canal dans la configuration avec vanne plane) - hauteurs conjuguées et longueurs (Fig. 3.28-3.29).

no	Q	H0	h1	h2	F1	Y	x <sub>0</sub>	x <sub>r</sub>	λ <sub>a</sub>
	l/s	mm	mm	mm	-	-	mm	mm	-
1	24	655	13.53	171	9.74	12.64	6700	7400	51.74
2	22	550	13.56	158	8.90	11.65	6700	7350	47.94
3	20	455	13.59	142	8.06	10.45	6680	7300	45.62
4	18	365	13.71	125	7.16	9.12	6680	7200	37.93
5	16	290	13.74	110	6.34	8.01	6700	7100	29.11
6	34	680	18.90	198	8.36	10.48	6750	7650	47.62
7	32	610	18.80	190	7.93	10.11	6700	7600	47.87
8	30	520	19.10	178	7.26	9.32	6750	7600	44.50
9	28	460	19.00	166	6.83	8.74	6700	7450	39.47
10	26	390	19.30	153	6.19	7.93	6700	7400	36.27
11	43	640	24.80	222	7.03	8.95	6750	7850	44.35
12	40	580	24.20	212	6.78	8.76	6700	7750	43.39
13	37	485	24.60	195	6.12	7.93	6700	7600	36.59
14	34	415	24.55	178	5.64	7.25	6700	7450	30.55
15	31	325	25.60	156	4.83	6.09	6700	7350	25.39
16	17	660	9.50	139	11.72	14.63	6700	7350	68.42
17	16	580	9.55	135	10.95	14.14	6700	7300	62.83
18	15	510	9.57	128	10.23	13.38	6700	7250	57.47
19	14	425	9.80	115	9.21	11.73	6700	7250	56.12
20/1	11	650	6.49	117	13.43	18.03	6700	7200	77.04
20/2	10	520	6.30	103	12.77	16.35	6700	7150	71.43
20/3	9	415	6.36	94	11.33	14.78	6680	7100	66.04
21	28	660	15.75	184	9.05	11.68	6700	7600	57.14
22	26	570	15.75	172	8.40	10.92	6700	7500	50.79
23	24	475	16.00	158	7.57	9.88	6680	7450	48.13
24	22	405	15.90	144	7.01	9.06	6680	7300	38.99
25	20	325	16.25	129	6.17	7.94	6700	7250	33.85
26	36	620	21.00	207	7.55	9.86	6700	7700	47.62
27	33	530	20.90	189	6.97	9.04	6680	7550	41.63
28	30	425	21.30	167	6.16	7.84	6700	7400	32.86
29	27	340	21.60	149	5.43	6.90	6700	7300	27.78
30	24	280	21.30	135	4.93	6.34	6700	7250	25.82
31	37	660	20.90	206	7.82	9.86	6700	7650	45.45
32	34	550	21.10	192	7.08	9.10	6700	7600	42.65
33	31	460	21.12	175	6.45	8.29	6680	7500	38.83
34	28	370	21.42	155	5.70	7.24	6700	7400	32.68
35	25	295	21.60	137	5.03	6.34	6700	7300	27.78
36	30	675	16.70	191	8.88	11.44	6700	7600	53.89
37	27	560	16.53	172	8.11	10.41	6700	7450	45.37
38	24	435	16.75	154	7.07	9.19	6700	7350	38.81
39	21	330	16.95	131	6.08	7.73	6700	7250	32.45
40	18	245	17.02	111	5.18	6.52	6700	7150	26.44
41	25	685	13.78	171	9.87	12.41	6700	7550	61.68
42	23	580	13.80	163	9.06	11.81	6700	7450	54.35
43	21	485	13.82	148	8.25	10.71	6700	7400	50.65
44	19	390	13.99	134	7.33	9.58	6700	7300	42.89
45	17	315	13.99	120	6.56	8.58	6700	7250	39.31
46	19	690	10.41	155	11.42	14.89	6700	7450	72.05
47	17	540	10.55	138	10.02	13.08	6700	7400	66.35
48	15	415	10.65	121	8.71	11.36	6680	7250	53.52
49	13	300	10.92	103	7.27	9.43	6700	7150	41.21
50	11	215	11.00	86	6.09	7.82	6700	7100	36.36
51	13	690	7.10	127	13.88	17.89	6700	7300	84.51
52	12	570	7.22	116	12.49	16.07	6700	7250	76.18
53	10	390	7.30	98	10.24	13.42	6700	7150	61.64
54	9	310	7.39	87	9.05	11.77	6700	7100	54.13
55	11	460	7.38	107	11.08	14.50	6700	7200	67.75

Table 8.5.36

Ressaut forcé par seuil -  $s=12.5$  mm (Fig. 6.4-6.6 et Fig. 6.9-6.10);  $x_v$  = position de la vanne.

no	Q	H0	h1	h2	$x_v$	$x_p$	$x_{rf}$	F1	Y	S	type	$\lambda_s$	$\lambda_B$
	l/s	mm	mm	mm	mm	mm	mm	-	-	-	-	-	-
126	22	660	12.35	160	6400	6420	7450	10.24	12.96	1.01	A	58.30	83.40
126	22	660	12.35	154	6600	6630	7630	10.24	12.47	1.01	B	41.30	80.97
126	22	660	12.35	150	6700	6720	7520	10.24	12.15	1.01	Bmin	34.01	64.78
127	21	590	12.50	152	6400	6470	7380	9.60	12.16	1.00	A	53.60	72.80
127	21	590	12.50	147	6600	6660	7500	9.60	11.76	1.00	B	38.40	67.20
127	21	590	12.50	144	6700	6730	7550	9.60	11.52	1.00	Bmin	32.80	65.60
128	20	530	12.55	143	6500	6530	7400	9.08	11.39	1.00	A	48.61	69.32
128	20	530	12.55	139	6600	6680	7480	9.08	11.08	1.00	B	36.65	63.75
128	20	530	12.55	136	6700	6730	7550	9.08	10.84	1.00	Bmin	32.67	65.34
129	19	470	12.70	134	6500	6580	7360	8.48	10.55	0.98	A	44.09	61.42
129	19	470	12.70	130	6600	6700	7420	8.48	10.24	0.98	B	34.65	56.69
129	19	470	12.70	128	6700	6750	7470	8.48	10.08	0.98	Bmin	30.71	56.69
130	18	420	12.75	127	6600	6640	7410	7.98	9.96	0.98	A	39.22	60.39
130	18	420	12.75	123	6700	6740	7450	7.98	9.65	0.98	B	31.37	55.69
130	18	420	12.75	120	6700	6790	7440	7.98	9.41	0.98	Bmin	27.45	50.98
131	17	375	12.75	118	6600	6670	7330	7.54	9.25	0.98	A	36.86	51.76
131	17	375	12.75	114	6700	6770	7430	7.54	8.94	0.98	B	29.02	51.76
131	17	375	12.75	111	6800	6820	7410	7.54	8.71	0.98	Bmin	25.10	46.27
132	16	330	12.80	111	6600	6700	7280	7.06	8.67	0.98	A	34.38	45.31
132	16	330	12.80	107	6700	6760	7340	7.06	8.36	0.98	B	29.69	45.31
132	16	330	12.80	104	6800	6840	7400	7.06	8.13	0.98	Bmin	23.44	43.75
133	10	525	6.27	94	6800	6850	7350	12.86	14.99	1.99	Bmin	46.25	79.74
133	10	525	6.27	97	6800	6810	7470	12.86	15.47	1.99	B	52.63	105.26
133	10	525	6.27	101	6700	6720	7350	12.86	16.11	1.99	A	66.99	100.48
134	9	430	6.25	87	6800	6870	7330	11.63	13.92	2.00	Bmin	43.20	73.60
134	9	430	6.25	90	6800	6820	7360	11.63	14.40	2.00	B	51.20	86.40
134	9	430	6.25	92	6700	6740	7300	11.63	14.72	2.00	A	64.00	89.60
135	8	330	6.34	80	6700	6770	7270	10.12	12.62	1.97	A	58.36	78.86
135	8	330	6.34	78	6800	6840	7310	10.12	12.30	1.97	B	47.32	74.13
135	8	330	6.34	76	6800	6900	7290	10.12	11.99	1.97	Bmin	37.85	61.51

Table 8.5.37

Ressaut forcé par seuil -  $s=25.0$  mm (Fig. 6.4-6.6 et Fig. 6.9-6.10).

no	Q	H0	h1	h2	$x_v$	$x_p$	$x_{pf}$	F1	Y	S	type	$\lambda_s$	$\lambda_v$
	l/s	mm	mm	mm	mm	mm	mm	-	-	-	-	-	-
105	32	610	18.80	169	6450	6490	7380	7.93	8.99	2.02	Bmin	34.31	47.34
105	32	610	18.80	174	6350	6390	7400	7.93	9.26	2.02	B	39.63	53.72
105	32	610	18.80	179	6250	6300	7350	7.93	9.52	2.02	A	44.41	55.85
106	30	530	18.90	157	6550	6590	7350	7.37	8.31	2.01	Bmin	28.84	40.21
106	30	530	18.90	161	6450	6500	7400	7.37	8.52	2.01	B	33.60	47.62
106	30	530	18.90	168	6350	6380	7300	7.37	8.89	2.01	A	39.95	48.68
107	29	495	19.00	150	6550	6610	7360	7.07	7.89	2.00	Bmin	27.63	39.47
107	29	495	19.00	153	6450	6520	7380	7.07	8.05	2.00	B	32.37	45.26
107	29	495	19.00	158	6350	6390	7300	7.07	8.32	2.00	A	39.21	47.89
108	23	670	12.80	145	6550	6580	7370	10.14	11.33	2.97	Bmin	43.36	61.72
108	23	670	12.80	149	6450	6470	7390	10.14	11.64	2.97	B	51.95	71.88
108	23	670	12.80	154	6350	6380	7350	10.14	12.03	2.97	A	58.98	75.78
109	22	610	12.85	138	6550	6600	7360	9.64	10.74	2.96	Bmin	41.63	59.14
109	22	610	12.85	142	6450	6500	7310	9.64	11.05	2.96	B	49.42	63.04
109	22	610	12.85	147	6350	6430	7320	9.64	11.44	2.96	A	54.86	69.26
110	21	550	12.95	129	6550	6620	7330	9.10	9.96	2.93	Bmin	39.77	54.83
110	21	550	12.95	133	6450	6520	7360	9.10	10.27	2.93	B	47.49	64.86
110	21	550	12.95	138	6450	6470	7320	9.10	10.66	2.93	A	51.35	65.64
111	17	660	9.50	125	6550	6610	7350	11.72	13.16	4.00	Bmin	55.26	77.89
111	17	660	9.50	128	6450	6550	7340	11.72	13.47	4.00	B	61.58	83.16
111	17	660	9.50	133	6450	6490	7280	11.72	14.00	4.00	A	67.89	83.16
112	16	570	9.65	115	6550	6640	7320	10.78	11.92	3.94	Bmin	51.30	70.47
112	16	570	9.65	119	6550	6610	7340	10.78	12.33	3.94	B	54.40	75.65
112	16	570	9.65	124	6450	6510	7280	10.78	12.85	3.94	A	64.77	79.79

Table 8.5.38

Ressaut forcé par seuil -  $s=38.0$  mm (Fig. 6.4-6.6 et Fig. 6.9-6.10).

no	Q	H0	h1	h2	$x_v$	$x_o$	$x_{rf}$	F1	Y	S	type	$\lambda_s$	$\lambda_e$
	l/s	mm	mm	mm	mm	mm	mm	-	-	-	-	-	-
114	42	620	24.60	203	6350	6430	7500	6.95	8.25	1.02	B	28.66	43.50
114	42	620	24.60	199	6450	6550	7550	6.95	8.09	1.02	Bmin	23.78	40.65
114	42	620	24.60	210	6200	6240	7350	6.95	8.54	1.02	A	36.38	45.12
115	40	570	24.50	201	6250	6290	7350	6.66	8.20	1.02	A	34.49	43.27
115	40	570	24.50	191	6450	6520	7550	6.66	7.80	1.02	B	25.10	42.04
115	40	570	24.50	187	6550	6610	7500	6.66	7.63	1.02	Bmin	21.43	36.33
116	38	515	24.50	189	6250	6320	7310	6.33	7.71	1.02	A	33.27	40.41
116	38	515	24.50	182	6450	6530	7520	6.33	7.43	1.02	B	24.69	40.41
116	38	515	24.50	179	6550	6600	7500	6.33	7.31	1.02	Bmin	21.84	36.73
117	36	460	24.70	176	6350	6380	7320	5.92	7.13	1.01	A	30.57	38.06
117	36	460	24.70	172	6550	6580	7500	5.92	6.96	1.01	B	22.47	37.25
117	36	460	24.70	165	6650	6700	7450	5.92	6.68	1.01	Bmin	17.61	30.36
118	34	400	25.10	163	6450	6490	7330	5.46	6.49	1.00	A	25.70	33.47
118	34	400	25.10	160	6550	6630	7450	5.46	6.37	1.00	B	20.12	32.67
118	34	400	25.10	156	6650	6690	7430	5.46	6.22	1.00	Bmin	17.73	29.48
119	32	360	25.00	155	6550	6580	7400	5.17	6.20	1.00	A	22.20	32.80
119	32	360	25.00	148	6650	6690	7450	5.17	5.92	1.00	B	17.80	30.40
119	32	360	25.00	143	6650	6750	7400	5.17	5.72	1.00	Bmin	15.40	26.00
120	22	620	12.65	154	6350	6400	7350	9.87	12.17	1.98	A	58.10	75.10
120	22	620	12.65	147	6450	6530	7400	9.87	11.62	1.98	B	47.83	68.77
120	22	620	12.65	143	6550	6610	7400	9.87	11.30	1.98	Bmin	41.50	62.45
121	21	570	12.70	146	6350	6420	7330	9.37	11.50	1.97	A	56.30	71.65
121	21	570	12.70	141	6450	6540	7430	9.37	11.10	1.97	B	46.85	70.08
121	21	570	12.70	137	6550	6650	7390	9.37	10.79	1.97	Bmin	38.19	58.27
122	20	520	12.70	137	6350	6450	7300	8.92	10.79	1.97	A	53.94	66.93
122	20	520	12.70	134	6550	6600	7350	8.92	10.55	1.97	B	42.13	59.06
122	20	520	12.70	130	6550	6650	7370	8.92	10.24	1.97	Bmin	38.19	56.69
123	19	470	12.70	131	6450	6500	7320	8.48	10.31	1.97	A	50.00	64.57
123	19	470	12.70	126	6550	6640	7420	8.48	9.92	1.97	B	38.98	61.42
123	19	470	12.70	121	6650	6730	7370	8.48	9.53	1.97	Bmin	31.89	50.39
124	14	600	8.2	119	6450	6530	7300	12.04	14.51	3.05	A	73.78	93.90
124	14	600	8.2	116	6550	6630	7400	12.04	14.15	3.05	B	61.59	93.90
124	14	600	8.2	112	6650	6720	7320	12.04	13.66	3.05	Bmin	50.61	73.17
125	13	520	8.2	111	6550	6610	7350	11.18	13.54	3.05	A	64.02	90.24

Table 8.5.39

Ressaut forcé par seuil - s=50.0 mm (Fig. 6.4-6.6 et Fig. 6.9-6.10).

no	Q	H0	h1	h2	x <sub>v</sub>	x <sub>o</sub>	x <sub>rf</sub>	F1	Y	S	type	λ <sub>s</sub>	λ <sub>o</sub>
	l/s	mm	mm	mm	mm	mm	mm	-	-	-	-	-	-
92	43	620	25.20	190	6700	6850	7920	6.86	7.54	1.98	Bmin	26.39	42.46
92	43	620	25.20	195	6550	6700	7880	6.86	7.74	1.98	B	32.34	46.83
92	43	620	25.20	203	6550	6570	7840	6.86	8.06	1.98	A	37.50	50.40
93	41	570	25.10	187	6700	6750	7850	6.58	7.45	1.99	B	30.48	43.82
93	41	570	25.10	178	6790	6890	7820	6.58	7.09	1.99	Bmin	24.90	37.05
93	41	570	25.10	192	6550	6630	7760	6.58	7.65	1.99	A	35.26	45.02
94	39	510	25.30	176	6700	6850	7820	6.19	6.96	1.98	B	26.28	38.34
94	39	510	25.30	168	6790	6920	7790	6.19	6.64	1.98	Bmin	23.52	34.39
94	39	510	25.30	180	6550	6700	7770	6.19	7.11	1.98	A	32.21	42.29
95	37	455	25.50	166	6700	6800	7780	5.80	6.51	1.96	A	28.04	38.43
95	37	455	25.50	162	6790	6900	7820	5.80	6.35	1.96	B	24.12	36.08
95	37	455	25.50	156	6900	6970	7750	5.80	6.12	1.96	Bmin	21.37	30.59
96	30	660	16.90	165	6700	6800	7850	8.72	9.76	2.96	B	42.31	62.13
96	30	660	16.90	159	6790	6890	7780	8.72	9.41	2.96	Bmin	36.98	52.66
96	30	660	16.90	172	6550	6620	7720	8.72	10.18	2.96	A	52.96	65.09
97	28	580	16.85	159	6700	6740	7750	8.17	9.44	2.97	A	45.99	59.94
97	28	580	16.85	154	6790	6870	7800	8.17	9.14	2.97	B	38.28	55.19
97	28	580	16.85	150	6900	6960	7720	8.17	8.90	2.97	Bmin	32.94	45.10
98	26	490	17.10	144	6700	6850	7750	7.42	8.42	2.92	A	38.89	52.63
98	26	490	17.10	139	6900	6940	7720	7.42	8.13	2.92	B	33.63	45.61
98	26	490	17.10	134	7000	7030	7700	7.42	7.84	2.92	Bmin	28.36	39.18
99	23	675	12.75	153	6700	6750	7730	10.20	12.00	3.92	A	60.00	76.86
99	23	675	12.75	147	6790	6900	7760	10.20	11.53	3.92	B	48.24	67.45
99	23	675	12.75	141	6900	6970	7740	10.20	11.06	3.92	Bmin	42.75	60.39
100	21	560	12.80	138	6790	6880	7730	9.26	10.78	3.91	A	49.61	66.41
100	21	560	12.80	132	6900	6950	7750	9.26	10.31	3.91	B	44.14	62.50
100	21	560	12.80	126	7000	7020	7690	9.26	9.84	3.91	Bmin	38.67	52.34
101	20	495	13	128	6900	6930	7700	8.62	9.85	3.85	A	45.00	59.23
101	20	495	13	123	6900	6990	7720	8.62	9.46	3.85	B	40.38	56.15
101	20	495	13	118	7000	7050	7690	8.62	9.08	3.85	Bmin	35.77	49.23

Table 8.5.40

Ressaut forcé par seuil -  $s=75.0$  mm (Fig. 6.4-6.6 et Fig. 6.9-6.10).

no	Q	H0	h1	h2	$x_v$	$x_o$	$x_{rf}$	F1	Y	S	type	$\lambda_s$	$\lambda_B$
	l/s	mm	mm	mm	mm	mm	mm	-	-	-	-	-	-
79	43	640	24.80	193	6400	6430	7770	7.03	7.78	3.02	A	43.75	54.03
79	43	640	24.80	187	6400	6520	7800	7.03	7.54	3.02	B	40.12	51.61
79	43	640	24.80	180	6550	6700	7790	7.03	7.26	3.02	Bmin	32.86	43.95
80	41	580	24.90	182	6550	6560	7810	6.66	7.31	3.01	A	38.35	50.20
80	41	580	24.90	176	6550	6580	7800	6.66	7.07	3.01	B	37.55	49.00
80	41	580	24.90	171	6550	6600	7800	6.66	6.87	3.01	Bmin	36.75	48.19
81	39	525	24.90	171	6550	6590	7800	6.34	6.87	3.01	A	37.15	48.59
83	64	645	37.00	242	6200	6250	7830	5.74	6.54	2.03	A	34.19	42.70
83	64	645	37.00	230	6400	6530	7870	5.74	6.22	2.03	B	26.62	36.22
83	64	645	37.00	220	6550	6720	7860	5.74	5.95	2.03	Bmin	21.49	30.81
84	60	565	37.30	220	6400	6460	7840	5.32	5.90	2.01	A	28.28	37.00
84	60	565	37.30	212	6550	6630	7820	5.32	5.68	2.01	B	23.73	31.90
84	60	565	37.30	205	6550	6750	7830	5.32	5.50	2.01	Bmin	20.51	28.95
85	56	490	37.50	199	6400	6520	7790	4.92	5.31	2.00	A	26.53	33.87
85	56	490	37.50	194	6550	6570	7800	4.92	5.17	2.00	B	25.20	32.80
85	56	490	37.50	187	6550	6770	7760	4.92	4.99	2.00	Bmin	19.87	26.40

Table 8.5.41

Ressaut classique - mesures de la série 2. Pour cette série, la hauteur  $h_1$  est déterminée à partir de la mesure de la vitesse  $V_1$  au pied du ressaut. (Fig. 3.28-3.29).

No	Q	V1	h1	h2	$x_0$	$x_R$	$L_R$	$\lambda_R$	F1	Y
	l/s	m/s	mm	mm	mm	mm	mm	-	-	-
56	125	3.71	67.4	400	6000	7850	1850	27.45	4.56	5.94
57	125	4.08	61.3	423	5850	7800	1950	31.82	5.26	6.90
58	100	3.98	50.3	378	5900	7700	1800	35.82	5.67	7.52
59	100	3.63	55.1	357	5850	7550	1700	30.86	4.94	6.48
60	80	3.52	45.5	317	6010	7500	1490	32.78	5.27	6.97
61	80	3.93	40.7	336	5800	7250	1450	35.62	6.22	8.25
62	60	3.54	33.9	278	6950	8100	1150	33.93	6.14	8.20
63	60	3.29	36.5	265	6300	7400	1100	30.16	5.50	7.27
64	147	3.84	76.6	438	6200	8300	2100	27.43	4.43	5.72
65	147	4.17	70.5	463	5800	8000	2200	31.20	5.01	6.57
66	200	4.07	98.3	512	6300	8700	2400	24.42	4.15	5.21
67	250	4.22	118.5	579	5400	8200	2800	23.63	3.91	4.89

Table 8.5.42

Ressaut forcé par seuil - mesures de la série 2 (cf. tabl 8.5.41). La position du seuil est  $x_s=7500$  mm. (Fig. 6.4-6. et Fig. 6.9-6.10).

No	s	Q	V1	h1	h2	$x_0$	$x_{RF}$	$\lambda_s$	$\lambda_b$	F1	Y	S	Type
	mm	l/s	m/s	mm	mm	mm	mm	-	-	-	-	-	-
68	75	147	3.79	77.6	413	5650	8000	23.8	30.3	4.34	5.32	0.97	A
68	75	147	3.79	77.6	401	5950	8050	20.0	27.1	4.34	5.17	0.97	B
68	75	147	3.75	78.4	389	6400	8050	14.0	21.0	4.28	4.96	0.96	Bmin
69	75	60	3.25	36.9	240	6450	7900	28.4	39.3	5.40	6.50	2.03	A
69	75	60	3.25	36.9	220	6750	7900	20.3	31.1	5.40	5.96	2.03	Bmin
69	75	60	3.25	36.9	231	6600	7950	24.4	36.6	5.40	6.26	2.03	B
70	75	100	3.65	54.8	337	5950	7900	28.3	35.6	4.98	6.15	1.37	A
70	75	100	3.60	55.6	320	6200	8000	23.4	32.4	4.88	5.76	1.35	B
70	75	100	3.54	56.5	301	6550	8000	16.8	25.7	4.76	5.33	1.33	Bmin
71	75	100	4.02	49.8	351	5900	8000	32.2	42.2	5.75	7.06	1.51	A
71	75	100	3.97	50.4	337	6200	8100	25.8	37.7	5.65	6.69	1.49	B
71	75	100	3.97	50.4	319	6550	8150	18.9	31.8	5.65	6.33	1.49	Bmin
72	75	147	4.13	71.2	426	5650	8050	26.0	33.7	4.94	5.98	1.05	A
72	75	147	4.08	72.1	413	6150	8150	18.7	27.8	4.85	5.73	1.04	B
72	75	147	4.05	72.6	397	6500	8100	13.8	22.0	4.80	5.47	1.03	Bmin
73	100	100	3.57	56.0	313	5950	8000	27.7	36.6	4.82	5.59	1.79	A
73	100	100	3.57	56.0	302	6050	8000	25.9	34.8	4.82	5.39	1.79	B
73	100	100	3.55	56.3	293	6250	8000	22.2	31.1	4.78	5.20	1.78	Bmin
74	100	147	3.82	77.0	399	5500	8050	26.0	33.1	4.40	5.18	1.30	A
74	100	147	3.78	77.8	382	5900	8100	20.6	28.3	4.33	4.91	1.29	B
74	100	147	3.75	78.4	368	6200	8050	16.6	23.6	4.28	4.69	1.28	Bmin
75	100	200	4.00	100.0	474	5350	8100	21.5	27.5	4.04	4.74	1.00	A
75	100	200	3.95	101.3	457	5800	8150	16.8	23.2	3.96	4.51	0.99	B
75	100	200	3.95	101.3	434	6200	8150	12.8	19.3	3.96	4.29	0.99	Bmin



## CURRICULUM VITAE

Nom **BRETZ**  
Prénom **Nicola-Vittore**

Filiation **Karl-Werner**  
Date de naissance **30.03.1960**  
Lieu de naissance **Martigny (VS)**  
Origine **R.F.A.**

No AVS **208.60.192.153**  
Adresse **Rue de la Fusion 122**  
**1920 - MARTIGNY**

Téléphone **026/2.21.91**

Etat civil **Célibataire**

Service civil (PCi) **Chef d'ilôt - instructeur sapeur-pompier**  
**et instructeur chef d'abri**

### Formation scolaire et universitaire :

**1967-1971** Ecole primaire, Martigny  
**1971-1973** Gymnase, Collège Ste Marie, Martigny  
**1973-1979** Gymnase et lycée, Collège de la Royale Abbaye, St Maurice  
Certificat de maturité type B (latin-sciences)  
**1979-1983** Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne  
Diplôme d'ingénieur civil EPF-L  
**1984-1987** Doctorat en hydraulique, Chaire de Constructions  
Hydrauliques, Dépt. Génie Civil, EPF-Lausanne.

### Formation professionnelle :

**12.07.-15.10.82** Stage au bureau d'études ITC SA à Martigny  
- participation à l'élaboration d'études technologiques pour les travaux souterrains,  
- différentes tâches de secrétariat.

**24.08.-09.09.82** Stage sur un chantier à Thessaloniki en Grèce,  
creusement d'une galerie avec la nouvelle méthode  
canadienne pour la construction de tunnels.

**02.01.-28.09.84** Bureau d'études ITC SA à Martigny  
- études technologiques pour l'application d'équipements dans les travaux souterrains,  
- élaboration d'offres et vente  
- consultation des clients en Suisse et à l'étranger.

### Langues :

français (langue maternelle), italien, anglais, allemand.

### Références :

M. Karl-Werner BRETZ, président ITC SA, Martigny,  
M. Charly DELEZ, commissaire et chef local PCi, Martigny,  
M. Germain HERITIER, conseiller communal, Savièse,  
M. Claude MARTIN, recteur du Collège, St Maurice,  
M. Richard SINNIGER, professeur EPF-L, Lausanne.

