

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

SECRETARIAT D'ETAT A L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

Ecole Nationale Polytechnique

Département: HYDRAULIQUE

THESE DE MAGISTER



PRESENTEE PAR:

Monsieur: MAHDI MRD EL BACHIR

Ingénieur en HYDRAULIQUE

Diplômé de l'E.N.P

CALCUL DU DEBIT MAXIMUM & DU DEBIT MINIMUM COMPATIBLE EN PRESENCE DU RESSAUT (Phénomène d'Hystérésis)

Soutenue PUBLIQUEMENT en Juillet 1993 devant le jury d'examen :

Président.....: M	A. KETTAB.....Maître de conférences...(E.N.P)
Rapporteur.....: M	B. ACHOUR.....Chargé de cours.....(U.T.O)
Examineurs...: M	M. BERKANI..... Chargé de cours.....(E.N.P)
M	A. BILEK.....Chargé de cours.....(E.N.P)
M ^{me}	S. BENMAMAR....Maître assistant.....(E.N.P)

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

SECRETARIAT D'ETAT A L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

Ecole Nationale Polytechnique

Département: HYDRAULIQUE

THESE DE MAGISTER

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PRESENTEE PAR :

Monsieur: MAHDI M^{ED} EL BACHIR

Ingénieur en HYDRAULIQUE
Diplômé de l'E.N.P

CALCUL DU DEBIT MAXIMUM & DU DEBIT MINIMUM COMPATIBLE EN PRESENCE DU RESSAUT (Phénomène d'Hystérésis)

Soutenue **PUBLIQUEMENT** en Juillet 1993 devant le jury d'examen :

Président.....: M	A. KETTAB.....Maître de conférences...(E.N.P)
Rapporteur.....: M	B. ACHOUR.....Chargé de cours.....(U.T.O)
Examineurs...: M	M. BERKANI..... Chargé de cours.....(E.N.P)
M	A. BILEK.....Chargé de cours.....(E.N.P)
M ^{me}	S. BENMAMAR....Maître assistant.....(E.N.P)

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
PREMIERE PARTIE: ETAT DE CONNAISSANCE SUR LES RESSAUTS HYDRAULIQUES CLASSIQUES ET FORCES.....	4
I.1 INTRODUCTION.....	4
I.2 DESCRIPTION DU RESSAUT HYDRAULIQUE.....	4
I.2.1. LE RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE.....	4
I.2.2. LE RESSAUT HYDRAULIQUE FORCE.....	7
I.2.3. EVOLUTION DES METHODES D'APPROCHE DE LA DESCRIPTION DES CARACTERISTIQUES DU RESSAUT.....	9
I.3. CONCLUSION.....	19
DEUXIEME PARTIE: ETUDE THEORIQUE.....	20
II.1. INTRODUCTION.....	20
II.2. ETUDE DE L'ECOULEMENT SOUS UNE VANNE DE FOND SUIVIE D'UN SEUIL.....	20
II.2.1. ETUDE DE L'ECOULEMENT A DEBIT CROISSANT.....	22
II.2.1.1. CONDITION DE FORMATION DU RESSAUT.....	22
II.2.1.2. CALCUL DU DEBIT MAXIMUM ADMISSIBLE.....	23
II.2.2. ETUDE DE L'ECOULEMENT A DEBIT DECROISSANT.....	28
II.2.2.1. CONDITION DE REAPPARITION DU RESSAUT.....	28
II.2.2.2. CALCUL DU DEBIT MINIMUM ADMISSIBLE.....	28
II.3. CAS DE L'OUVRAGE CONSTITUE DE DEUX SEUILS SEPRES PAR UN RADIER. " Ecoulement à débit croissant".....	31
II.3.1. EFFET DES SEUILS AMONT ET AVAL SUR LE CALCUL DE LA PERTE DE CHARGE DUE AU RESSAUT.....	31
II.3.2. PARAMETRE ADIMENSIONNEL DES SEUILS Φ EN FONCTION ; DE LA HAUTEUR RELATIVE INITIALE DU RESSAUT.....	32
II.3.3. RELATION APPROCHEE DU PARAMETRE ADIMENSIONNEL Φ EN FONCTION DE LA HAUTEUR RELATIVE INITIALE DU RESSAUT.....	35

I.3.4. CALCUL DU DEBIT MAXIMUM ADMISSIBLE.....	38
II.4. CONCLUSION.....	42
TROISIEME PARTIE: ETUDE EXPERIMENTALE.....	44
III.1 INTRODUCTION.....	44
III.2. CAS DE LA VANNE DE FOND SUIVIE D'UN SEUIL.....	45
III.2.1. VERIFICATION EXPERIMENTALE DE LA RELATION SIMPLIFIEE DE BELANGER.....	45
III.2.2. DETERMINATION EXPERIMENTALE DE LA VALEUR DE LA FONCTION DE $Y(h_{1\text{MAX}}^*)$	47
III.2.3. EFFET DE LA VALEUR EXPERIMENTALE DE $Y(h_{1\text{MAX}}^*)$ SUR L'EXPRESSION DE $h_{1\text{MAX}}^*$	47
III.2.4. DETERMINATION DE $h_{1\text{MIN}}^*$ EN FONCTION DE Γ_b	50
III.3. CAS DE L'OUVRAGE CONSTITUE DE DEUX SEUILS SEPARES PAR UN RADIER.....	53
III.3.1. MESURE DES CARACTERISTIQUES DU RESSAUT.....	53
III.3.2. VERIFICATION EXPERIMENTALE DU PARAMETRE Φ EN FONCTION DE $h_{1\text{MAX}}^*$	54
III.3.3. DETERMINATION EXPERIMENTALE DE LA PERTE DE CHARGE ΔH EN FONCTION DES CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DE L'OUVRAGE.....	55
III.4. CONCLUSION.....	58
CONCLUSION GENERALE.....	59



SYMBOLES ET UNITES

Symboles	Leurs signification (désignations)	Unités
a, s	Hauteur du seuil.	(m)
a_1	Hauteur du premier seuil.	(m)
a_2	Hauteur du deuxième seuil.	(m)
b	Largeur de de la section droite du canal.	(m)
E	Ensemble ou espace d'application.	(m)
F_1	Désigne le froude amont.	—
F_2	Désigne le froude aval.	Sans
g	Accélération de la pesanteur.	Sans
h	Le tirant d'eau souvent désigné par h_t (l'indice t indique le torrentiel). Hauteur du seuil.	(m/s ²)
h_1, y_1	Première hauteur conjuguée du ressaut.	(m)
h_2, y_2	Deuxième hauteur conjuguée du ressaut.	(m)
h_f	Profondeur fluviale de l'écoulement.	(m)
h_1	La première hauteur conjuguée apportée à K .	Sans dim.
$h_{1 \max}$	La première hauteur conjuguée rapportée à K correspondant à Q maximum.	Sans dim.
$h_{1 \min}$	La première hauteur conjuguée rapportée à K correspondant à Q minimum.	Sans dim.
h_2	La deuxième hauteur conjuguée apportée à K .	Sans dim.
$h_{2 \max}$	La deuxième hauteur conjuguée rapportée à K correspondant à Q maximum.	Sans dim.
$h_{2 \min}$	La deuxième hauteur conjuguée rapportée à K correspondant à Q minimum.	Sans dim.
H	Charge totale.	(m)
H_1	Charge totale dans la section 1-1.	(m)
H_2	Charge totale dans la section 2-2.	(m)
H_1	Charge totale dans la section 1-1 rapportée à la hauteur critique.	Sans dim.
H_2	Charge totale dans la section 2-2 rapportée à la hauteur critique.	//
$H_{1 \max}$	Charge correspondant au débit maximum section 1-1 rapportée à K .	//
$H_{2 \max}$	Charge correspondant au débit maximum section 2-2 rapportée à K .	//
$H_{1 \min}$	Charge correspondant au débit minimum section 1-1 rapportée à K .	//
$H_{2 \min}$	Charge correspondant au débit maximum section 2-2 rapportée à K .	//
H_f	Charge fluvial.	(m)
H_m	Charge totale à l'amont de la vanne.	//
H_{mf}	Charge totale dans le régime fluvial.	//
i	Désigne la pente canal, Désigne l'indice d'ordre.	°//
K, H_c	Désigne la profondeur critique, la charge critique.	(m)
L_1	Longueur du canal.	//
L_2	Longueur du ressaut.	//
L_r	Longueur du rouleau.	//
m	Désigne à la fois la cotangente de l'angle d'inclinaison du talus et un exposant.	Sans dim.
M	Paramètre adimensionnel.	//
n	Exposant de l'expression (113)	—
p	paramètre de l'équation du troisième degré.	—
q	débit unitaire, ou débit d'un écoulement plan.	(m ² /s)
Q	débit volume.	(m ³ /s)
s	Paramètre de l'équation du troisième degré.	—
t	Paramètre de l'équation du troisième degré, comme indice désigne le régime de l'écoulement torrentiel.	—
V_1	Vitesse de l'écoulement torrentiel dans la première section droite.	(m/s)
V_2	Vitesse de l'écoulement fluvial dans la deuxième section droite.	(m/s)
Y	Rapport des deux hauteurs conjuguées.	Sans dim.
α	Facteur de correction de l'énergie cinétique, angle d'inclinaison.	//
β	Facteur de correction de la quantité de mouvement.	//
Γ	Paramètre composé du débit maximum admissible, passant sous une vanne de fond suivie d'un seuil.	//
Δ	Discriminant.	—
ΔH	Désigne la perte de charge.	(m)
ΔH	Désigne la perte de charge rapportée à H_1 .	Sans dim.
Φ	Paramètre composé du débit maximum admissible, passant par un barrage déversoir.	//
η	Rendement du ressaut.	//

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION

Générale

INTRODUCTION GENERALE

L'écoulement de l'eau dans une conduite peut avoir lieu à ciel ouvert ou en charge. Alors que ce dernier a lieu dans une conduite fermée, sans contact avec l'atmosphère, l'écoulement à ciel ouvert dans une conduite ou canal, présente une surface libre sujette à la pression atmosphérique.

On s'accorde à classer les canaux en deux catégories:

- Naturels.
- Artificiels.

Dans la première catégorie, nous citons les rivières, fleuves etc... La seconde regroupe les constructions hydrauliques telles que, les canaux d'irrigations, d'évacuation ou de dissipation d'énergie. Ce type de canaux présente un intérêt particulier car leurs propriétés hydrauliques sont contrôlables et ils peuvent être conçus suivant les objectifs recherchés. Ainsi, au cours de la réalisation d'un ouvrage hydraulique, on peut se trouver confronté au problème d'un écoulement torrentiel à grande vitesse produisant une forte énergie cinétique. Ce cas peut se produire au pied amont d'un barrage déversoir, d'un seuil ou bien sous une vanne de fond.

Pour protéger la partie aval de ces ouvrages il est nécessaire de réduire cette énergie cinétique. Parmi les procédés connus, le ressaut hydraulique présente une mise en oeuvre facile et peu onéreuse.

Le ressaut hydraulique est le siège de la dissipation d'énergie qui s'effectue par la transformation du régime torrentiel à l'amont de l'écoulement, en régime fluvial à l'aval de l'ouvrage considéré. Le ressaut hydraulique, se produisant dans un canal de section rectangulaire de pente nulle, peut être créé sans obstacle, ni chicane; il est appelé ressaut hydraulique classique, figure 1.

Les principaux inconvénients du ressaut classique sont:

- Sa hauteur aval h_2 , considérable, nécessaire à sa formation, ainsi que sa longueur.
- Son instabilité pour de faibles variations du débit Q .

En effet, la moindre variation du niveau aval Δh_2 suffit pour avancer ou reculer le ressaut de sa position initiale.

Certains dispositifs tels que les chicanes et les seuils sont habituellement utilisés pour pallier à ces inconvénients; le ressaut est dit "forcé".

La longueur du ressaut étant raccourcie, elle induit une réduction de la taille du bassin d'amortissement et donc, son coût.

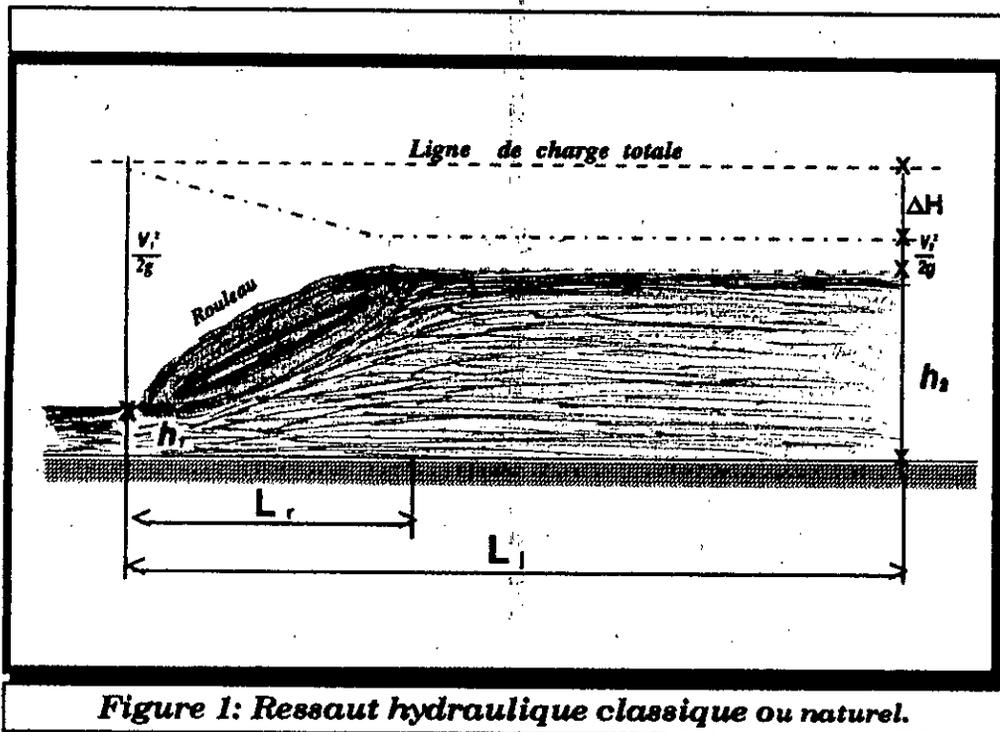


Figure 1: Ressaut hydraulique classique ou naturel.

A ce jour, différentes théories d'observations et d'analyses du ressaut hydraulique ont été suggérées. Cependant les solutions analytiques proposées restent encore approximatives si ce n'est l'équation connue de Belanger [1].

Celle-ci définit par application de l'équation des quantités de mouvement, le rapport des hauteurs conjuguées h_1 et h_2 du ressaut en fonction du nombre de Froude à l'amont de l'écoulement F_1 .

Parmi ces travaux, Bradley et Peterka [2] ont proposé une relation simple définissant la longueur du ressaut classique par $L_j/h_2 = 6$ pour des nombres de Froude amont, compris entre 2 et 5.

En appliquant le théorème de la quantité de mouvement, Silvester [3] détermina en 1964 les hauteurs conjuguées et l'énergie dissipée par des ressauts hydrauliques dans des canaux de pente nulle, de section rectangulaire, triangulaire, parabolique, circulaire et trapézoïdale en

fonction du nombre de Froude. Le canal triangulaire s'est avéré le plus efficace dans la mesure où il requiert une hauteur aval h_2 plus réduite pour un nombre de Froude donné.

Quand à Rajaratnam [4], il a analysé les différents types de ressauts possibles:

- * Le ressaut classique.
- * Le ressaut Noyé.
- * Le ressaut forcé.
- * Le ressaut sur pente, etc...

Les caractéristiques de l'écoulement avec ressaut hydraulique par dessus des marches positives et négatives ont été également examinées au cours d'autres travaux [5, 6, et 7]. L'attention a été ainsi portée sur les positions extrêmes du phénomène, pour permettre le dimensionnement des bassins d'amortissements.

L'expérimentation a montré que le ressaut peut se déplacer à l'aval et disparaître du bassin amortisseur au fur et à mesure que le débit augmente. Le ressaut peut réapparaître en diminuant le débit mais cette apparition ne se produit que pour un débit très inférieur à celui pour lequel le ressaut existait déjà.

Notre étude se propose notamment d'élaborer, avec un maximum de rigueur, des relations analytiques menant au calcul du :

- Débit maximum admissible au-delà duquel le ressaut disparaît.
- Débit minimum pour lequel le ressaut réapparaît.

A cet effet, l'étude propose trois parties :

- Un état de connaissances sur les ressauts hydrauliques ainsi que les méthodes d'approche au calcul de leurs caractéristiques.
- Un développement théorique, parfois basé sur des résultats assez récents obtenus par d'autres chercheurs.
- Une partie expérimentale menée au laboratoire sur un modèle réduit

Première partie

***Etat de connaissance sur
les ressauts hydrauliques
classiques et forcés***

I Etat de connaissances sur les ressauts hydrauliques classique et forcé

I.1. INTRODUCTION

Dans cette partie de l'étude, nous proposons de passer en revue les travaux portant sur le ressaut classique et plus particulièrement le ressaut forcé par divers obstacles. Une description sommaire de ces ressauts est d'abord présentée.

Elle est suivie d'un rappel historique relatif aux premières recherches dans ce domaine, ainsi que des développements récents concernant les ressauts classiques et forcés. Notre attention s'est portée essentiellement sur le ressaut en présence d'un seuil continu qui fera l'objet de notre travail.

I.2. Description du ressaut hydraulique.

I.2.1. Ressaut hydraulique classique

Le ressaut hydraulique classique est défini comme étant le passage d'un écoulement torrentiel à un écoulement fluvial dans un canal prismatique de pente nulle ou faible.

Il est également appelé ressaut " libre ", ressaut " normal " ou ressaut " naturel ".

La figure 2 représente un ressaut classique défini par ses caractéristiques principales.



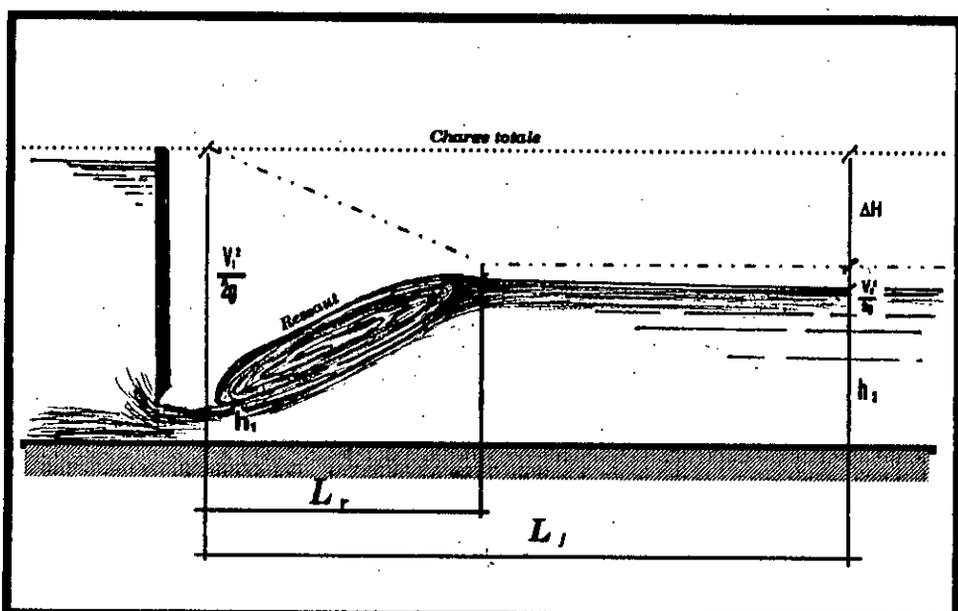


Figure 2: Caractéristiques du ressaut classique ou naturel.

- h_1 - Hauteur amont (première hauteur conjuguée)
- h_2 - Hauteur aval (deuxième hauteur conjuguée)
- ΔH - Perte de charge
- $V^2 / (2g)$ - Hauteur capable de la vitesse (énergie cinétique)
- L_r - Longueur du rouleau
- L_j - Longueur du ressaut

Les hauteurs d'eau h_1 et h_2 sont appelées hauteurs conjuguées du ressaut. Le rapport de ces hauteurs est fonction du nombre de froude F_1 à l'amont du ressaut en vertu de l'équation de Belanger [1]:

$$Y = h_2 / h_1 = 1/2 \left((1 + 8 F_1^2)^{1/2} - 1 \right) \quad (1)$$

Pour des nombres de Froude F_1 assez élevés, l'équation (1) s'écrit:

$$Y = \sqrt{2} F_1 - 1/2 \quad 3 < F_1 < 9 \quad (2)$$

La longueur du rouleau L_r est la distance entre le pied amont du ressaut et le lieu à l'aval où la surface libre est pratiquement parallèle au fond du canal.

La longueur du ressaut L_j est une grandeur difficile à définir car la section finale du ressaut ne peut être connue a priori. L'évaluation de L_j est subjective et varie d'un auteur à l'autre. On peut citer celle proposée par Bradley et Peterka [2]:

$$L_j = 6 h_2 \quad \text{pour} \quad 2 < F_1 < 5. \quad (3)$$

Le rendement η d'un ressaut hydraulique est défini comme étant le rapport entre la perte de charge ΔH et la charge totale amont H_1 .

$$\eta = \Delta H / H_1 \quad (4)$$

$$\text{avec, } 0 < \eta < 1$$

La charge amont est donnée par l'expression suivante:

$$H_1 = h_1 + V_1^2 / (2g) \quad (5)$$

Les inconvénients du ressaut classique sont:

- Sa hauteur aval h_2 est élevée.
- Il présente une grande instabilité pour de faibles variations de débit.
- Il nécessite, pour sa formation, une grande longueur de bassin.

Pour éliminer ces inconvénients, des dispositions constructives sont nécessaires à l'aval du bassin amortisseur et l'on parle alors du ressaut forcé.

Les travaux les plus récents, concernant le ressaut classique, sont d'une part ceux de Hager et Stnniger (1986) [6] qui proposent notamment une relation simple permettant le calcul du rendement du ressaut:

$$\eta = (1 - \sqrt{2/F_1})^2, \quad F_1 > 2.5 \quad (6)$$

D'autre part, Hager, Bremen et Kawagoshi, [8], montrent expérimentalement que, notamment, la longueur du ressaut est indépendante du nombre de Froude amont.

I.2.2. Le ressaut hydraulique forcé

Plusieurs dispositifs ont été utilisés pour stabiliser le ressaut hydraulique, pour obtenir une hauteur minimale à l'aval h_2 et lui donner une efficacité maximale.

Les dispositifs les plus simples et les plus utilisés sont présentés sur les figures 3.

De nombreuses autres dispositions constructives sont également connues, notamment celles proposées par Bradley et Peterka en 1957 [2].

A cette même année Shukry [9] a réalisé une étude préliminaire visant à déterminer la position optimale du seuil correspondant au maximum de perte de charge.

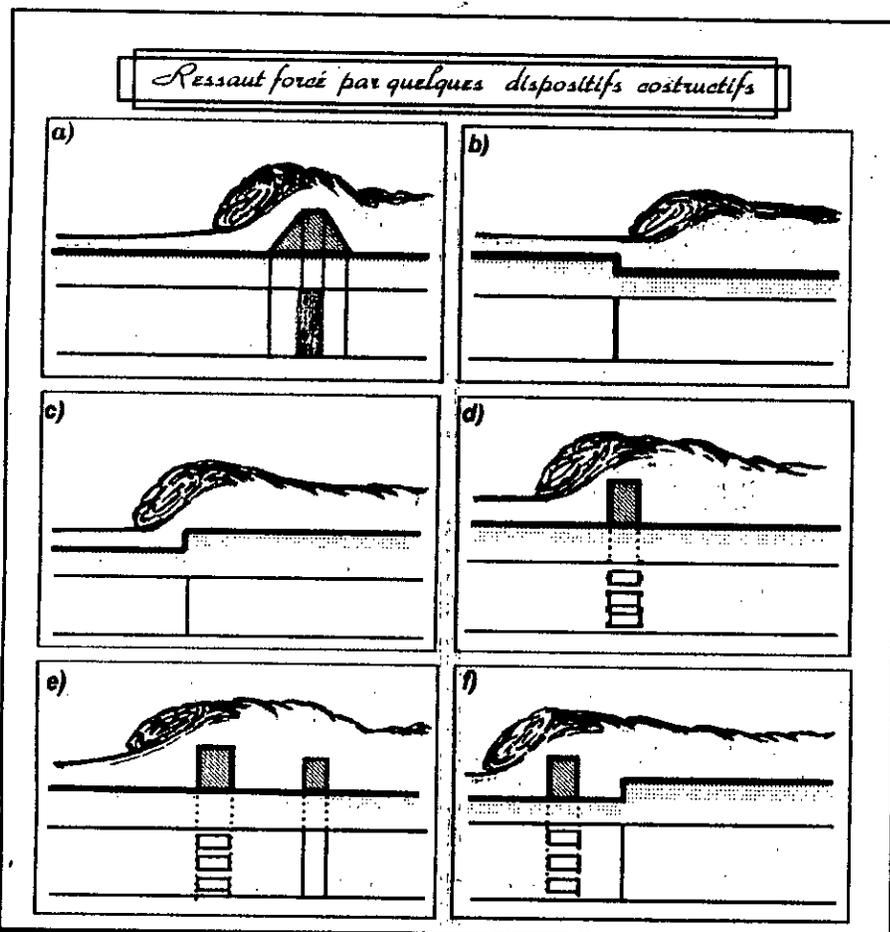


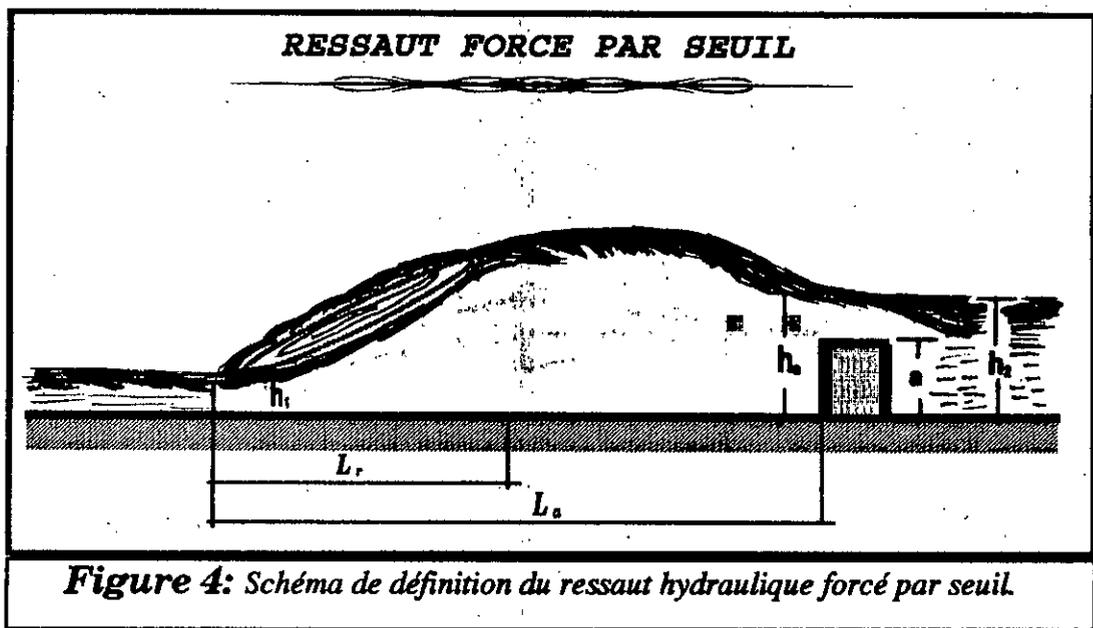
Figure 3: Ressaut forcé par quelques disposition constructives.

- a) - Seuil continu.
- b) - Marche négative.
- c) - Marche positive.
- d) - Rangées de blocs.
- e) - Combinaison de blocs et seuil.
- f) - Combinaison de blocs et marche positive.

Si le seuil est dénoyé, l'écoulement est alors en régime torrentiel à l'aval du seuil et la dissipation d'énergie n'est plus maximale.

La figure 4, représente le ressaut hydraulique forcé par un seuil continu, ainsi que ses caractéristiques.

L'écoulement fait intervenir notamment les niveaux amont et aval h_1 et h_2 , la hauteur du seuil a et le nombre de Froude amont F_1 .



Rappel
Historique

I.2.3. Evolution des méthodes d'approche de la description des caractéristiques du ressaut.

Parmi les auteurs qui ont traité le ressaut hydraulique, nous pouvons citer Léonard De Vinci (1452-1519) qui fût le premier à avoir observé le phénomène mais sans l'analyser.

Venturi (1746-1822) mentionna le phénomène comme étant un moyen bénéfique à l'irrigation.

Bidone (1781-1839) en 1818, analysa le premier ce phénomène hydraulique. Ses expériences ont concerné les écoulements proches de l'état critique, avec un ressaut faible.

Belanger (1789-1874) a utilisé correctement l'équation de quantité de mouvement pour aboutir à la relation suivante :

$$Y = h_2/h_1 = 1/2((1 + 8F_1^2)^{1/2} - 1)$$

Gibson [10], a réalisé des essais sur le ressaut hydraulique dont l'écoulement est caractérisé par des nombres de Froude atteignant la valeur de 8 - 6 et a confirmé la validité de l'équation de Belanger. De plus, il a introduit un facteur de correction pour les vitesses dont la distribution n'est pas uniforme.

Aux Etats Unis, Kininson [11] a déterminé les hauteurs conjuguées du ressaut en utilisant l'équation de la conservation de l'énergie. Cette approche a été fortement critiquée par de nombreux auteurs.

En Europe, Safranetz [12], a établi une formule empirique exprimant la longueur du ressaut en fonction de la hauteur aval h_2 :

$$L_r = 4,5 h_2 \quad (7)$$

En 1936, Bakhmeteff et Matzke [13] ont introduit un facteur d'écoulement cinétique correspondant au carré du nombre de Froude et ont présenté une théorie très élaborée sur le ressaut. Ils ont défini en outre les profils de surface adimensionnels du ressaut.

En 1957 Bradley et Peterka [2] ont étudié le ressaut hydraulique pour toutes les configurations des bassins amortisseurs rencontrés dans la pratique.

Le premier problème était de déterminer par voie expérimentale la fonction liant le nombre de Froude amont F_1 du ressaut, le rapport X/Y_2 (X est la distance séparant le début du ressaut et le seuil considéré comme un déversoir) et Y_3/Y_1 . Y_1 , Y_2 et Y_3 sont respectivement la hauteur initiale du ressaut, la hauteur finale du ressaut et la profondeur de l'écoulement à l'aval du seuil.

La fonction recherchée est la suivante :

$$h/Y_1 = \phi(F_1, X/Y_2, Y_3/Y_1) \quad (8)$$

avec,

h la hauteur du seuil.

Cependant, il faut noter qu'une approximation a été faite en ce qui concerne la charge totale au-dessus du seuil. Celle-ci a été considérée comme étant égale à la différence entre la hauteur finale du ressaut et la hauteur du seuil.

Les expériences effectuées par Forster et Skrinde [14] se sont limités à trois valeurs seulement du rapport X/Y_2 qui sont 3, 5 et 10.

Un diagramme a été tracé et qui a permis l'analyse de l'effet du seuil déversoir sur la position et le comportement du ressaut. Cette analyse n'est possible que si les conditions d'approche de l'écoulement à l'amont immédiat du seuil sont connues et lorsque la profondeur h_s n'a aucune influence sur le débit. Cette dernière condition est satisfaite tant que:

$$Y_3 < Y_2 - 0.75 h \quad (9)$$

Les courbes expérimentales obtenues sont représentées sur la figure 5.

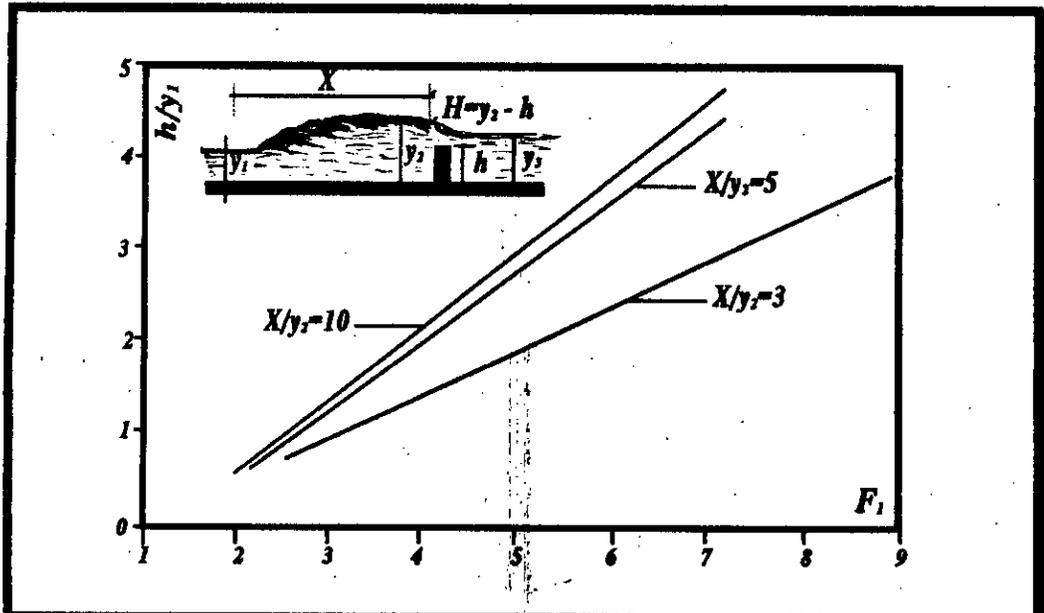


Figure 5: Relation expérimentale entre le nombre de Froude F_1 , à l'amont du ressaut, h/y_1 , et x/y_1 , d'après Forster et Skrinde.

Sur le diagramme, tout point est représenté par la paire de coordonnées $(F_1, h/Y_1)$. Si un point se situe entre deux courbes, le ressaut se produit dans une position relative X/Y_1 , dont la valeur devrait être déterminée par interpolation. Si le point de coordonnées $(F_1, h/Y_1)$ se situe au-dessus de l'une des courbes du diagramme, le seuil de hauteur "h" choisie, est trop haut et le ressaut forcé peut se déplacer vers l'amont. Si ce même point se situe en-dessous de l'une des courbes du diagramme, le seuil de hauteur "h" choisie, est trop bas et le ressaut forcé peut se déplacer vers l'aval, pour disparaître en laissant place à un écoulement franche-ment torrentiel et indésirable sur le bassin de dissipation d'énergie.

Le second problème traité par Forster et Skrinde [14] est celui relatif au ressaut forcé par un déversoir à seuil continu et épais.

Si la profondeur Y_2 est telle que :

$$Y_2 < (2Y_1 + h)/3 \quad (10)$$

La profondeur Y_2 n'affecte pas de manière appréciable la relation liant la charge totale H et le débit Q .

Le débit par unité de largeur peut s'exprimer par la relation:

$$q = 0.433 (2g)^{1/2} (Y_2 / (Y_1 + Y_2))^{1/2} \sqrt{H^3} \quad (11)$$

Où:

$$q = V_1 Y_1 \quad (12)$$

avec,

V_1 , la vitesse moyenne de l'écoulement à l'amont du ressaut.

$$H = Y_2 - h \quad (13)$$

g : l'accélération de la pesanteur.

On notera également l'approximation effectuée pour l'évaluation de la charge totale H qui a consisté à négliger la hauteur capable de la vitesse $V_1^2/2g$.

Sachant que le nombre de Froude à l'amont du ressaut est

$$F_1 = V_1 / (g Y_1)^{1/2} \quad (14)$$

la relation (8) devient:

$$2,667 F_1^2 (1 + (h/Y_1)/(Y_2/Y_1)) = (Y_2/Y_1 - h/Y_1)^2 \quad (15)$$

Le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut Y_2/Y_1 est fonction du nombre de Froude F_1 , en vertu de l'équation de Belanger dont on rappelle l'expression:

$$Y_2/Y_1 = 0.5((1 + 8 F_1^2)^{1/2} - 1) \quad (1)$$

la relation (9) prend alors la forme définitive suivante :

$$21,33 F_1^2 / ((1 + 8 F_1^2)^{1/2} - 1) = ((1 + 8 F_1^2)^{1/2} - 1 - 2h/Y_1) / ((1 + 8 F_1^2)^{1/2} - 1 + 2h/Y_1) \quad (16)$$

Forster et Skrinde [14] ont aboutit donc à une relation liant le nombre de Froude amont F_1 et le rapport h/Y_1 . Cette relation est représentée graphiquement sur la figure 6.

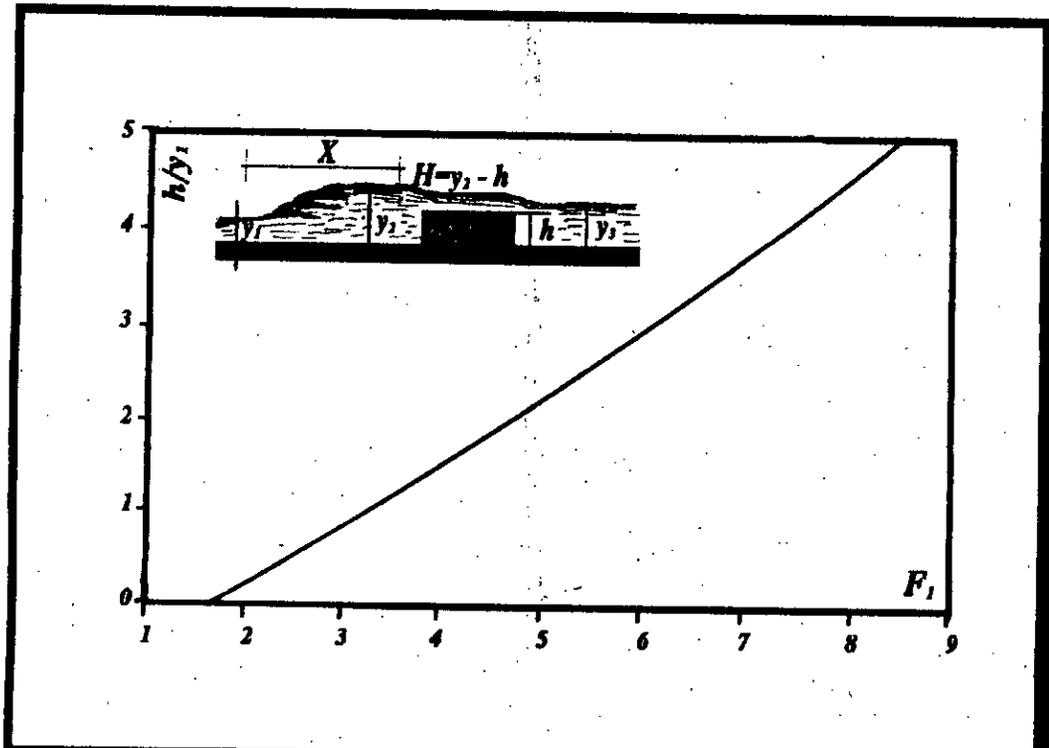


Figure 6: La relation analytique entre le nombre de Froude F_1 et h/y_1 pour un seuil épais, d'après Forster et Skrinde.

Les auteurs ont montré expérimentalement que leurs résultats coïncident avec ceux obtenus pour un seuil abrupte lorsque la hauteur d'eau Y_2 au-dessus du seuil se confond avec la profondeur critique, et ceci n'est valable que si:

$$X = 5 (h + Y_2) \quad (17)$$

Malgré que la courbe a été tracée seulement à partir de quelques valeurs expérimentales, elle peut servir tout de même au dimensionnement des bassins de dissipation d'énergie utilisant un seuil épais pour le contrôle du ressaut, avec une assez bonne approximation. Il faut noter que la condition :

$$Y_2 < (2 Y_1 + h) / 3 \text{ doit être satisfaite.} \quad (10)$$

Enfin, le troisième problème traité par Forester et Skrinde [14] concerne le ressaut forcé par le seuil abrupte. Un diagramme issu d'expériences au laboratoire, a été établi. Ce dernier montre la relation liant le nombre de Froude à l'amont du ressaut F_1 , le rapport entre la profondeur de l'écoulement au droit du seuil Y_2 , la hauteur initiale du ressaut Y_1 , ainsi que le rapport h / Y_1 déjà défini.

Le diagramme obtenu est représenté sur la figure 7.

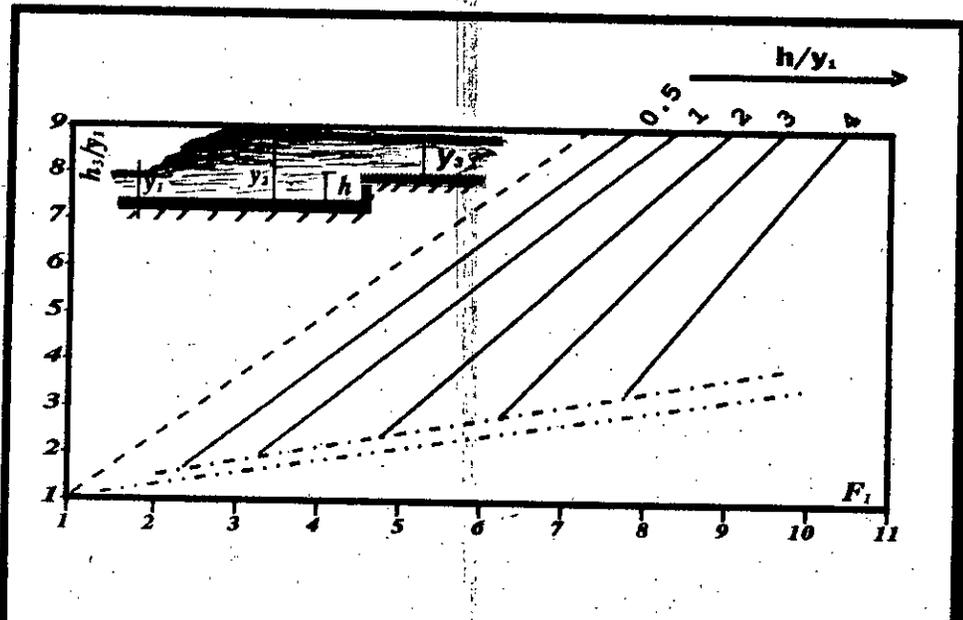


Figure 7: Relation expérimentales entre le nombre de Froude F_1 , y_2/y_1 et h/y_1 pour un seuil abrupte, d'après Forster et Skrinde.

- (- - - -) Courbes $y_2 = y_1$.
- (. . . .) Limite inférieure de possibilité expérimentale.
- (— — —) Courbes limite théorique $y_2 = k$ (k profondeur critique).

Il permet de prévoir les performances du seuil, en ayant comme données les valeurs de la vitesse de l'écoulement à l'amont du ressaut V_1 , les hauteurs Y_1 , Y_2 et Y_3 et h .

Si le point de coordonnées $(F_1, Y_2/Y_1)$ se situe à gauche et au-dessus d'une courbe du diagramme, le seuil est trop haut et le ressaut forcé peut se déplacer vers l'amont pour devenir noyé. Par contre, si le point de coordonnées $(F_1, Y_2/Y_1)$ est à droite d'une courbe du diagramme, le seuil de hauteur h est trop bas et le ressaut forcé peut se déplacer à l'aval pour disparaître entièrement.

La courbe limite théorique est donnée par la relation:

$$Y_2 = k \quad (18)$$

où, K est la profondeur critique.

La zone située en dessous de cette courbe théorique englobe toutes les valeurs de Y_2 inférieures à la profondeur critique; ce qui signifierait que c'est une zone où l'écoulement au droit du seuil est en régime torrentiel.

Le seuil fonctionnerait comme étant un déversoir franchi par un écoulement en régime critique et la section du seuil serait donc une section de contrôle.

Sous cette condition, le ressaut ne peut avoir lieu sur la partie horizontale du bassin de dissipation.

Des travaux plus récents, effectués par Hager et Bretz [6], concernent le ressaut du type A, forcé par des marches positives et négatives. Nous notons que c'est un des cas de figure qui intéresse notre travail.

Hager et Bretz [6] ont montré que le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut $Y = h_2/h_1$ ne dépend que de la hauteur relative du seuil :

$$S = s/h_1 \text{ et du nombre de Froude amont } F_1. \quad (19)$$

Cette relation est représentée graphiquement sur la figure 8.

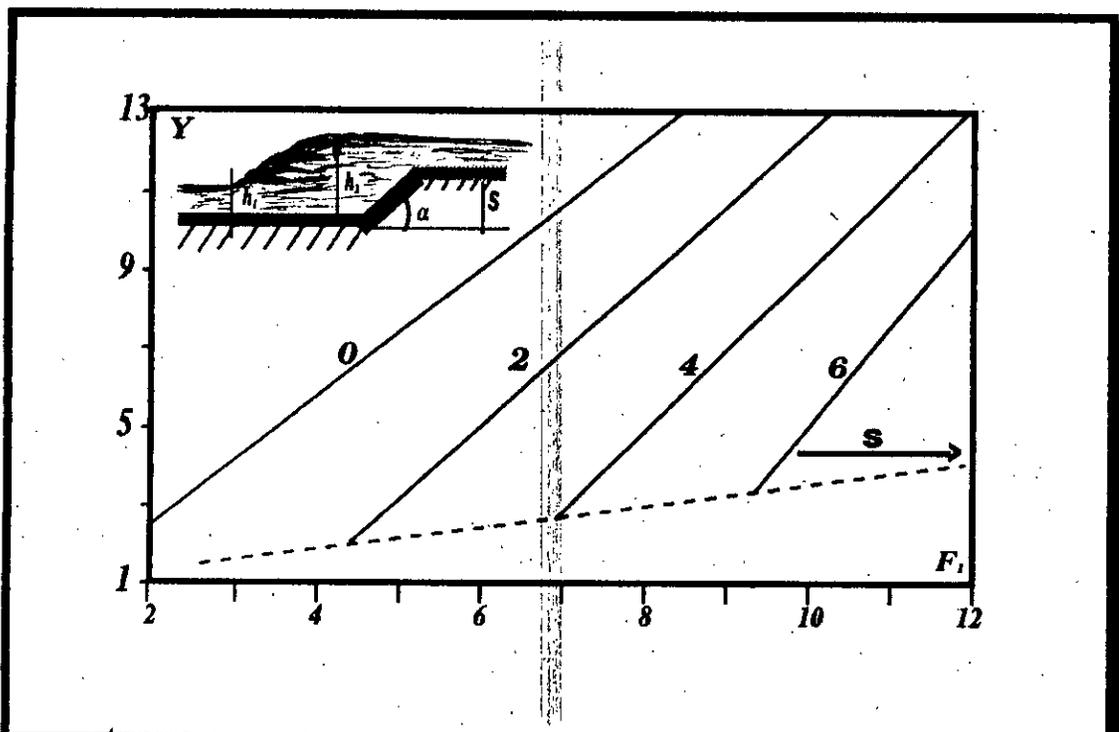


Figure 8: Hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$ du ressaut dans le cas d'une marche positive, en fonction du nombre de Froude à l'amont F_1 et de la hauteur relative du seuil $S = s/h_1$.

(---) limite inférieure d'application. D'après Hager et Bretz.

L'angle d'inclinaison α de la marche n'a aucune influence sur le comportement du ressaut.

Le développement théorique a d'abord été effectué pour le cas du canal trapézoïdal. Le but fût de déterminer la relation liant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut $Y = h_2/h_1$, le nombre de Froude à l'amont du ressaut ainsi que le paramètre:

$$M = m h/b \quad (20)$$

(m est la cotangente de l'angle d'inclinaison du talus et b la largeur du trapèze).

La relation obtenue est la suivante:

$$F_1^2 \left[1 - \frac{(1+M)}{Y(1+MY)} \right] = \frac{(1+2M)}{(2(1+m)^2) \left[-Y^2(1+2M/3) + 2M/3 \right]} \quad (21)$$

Cette relation est représentée graphiquement sur la figure 10.

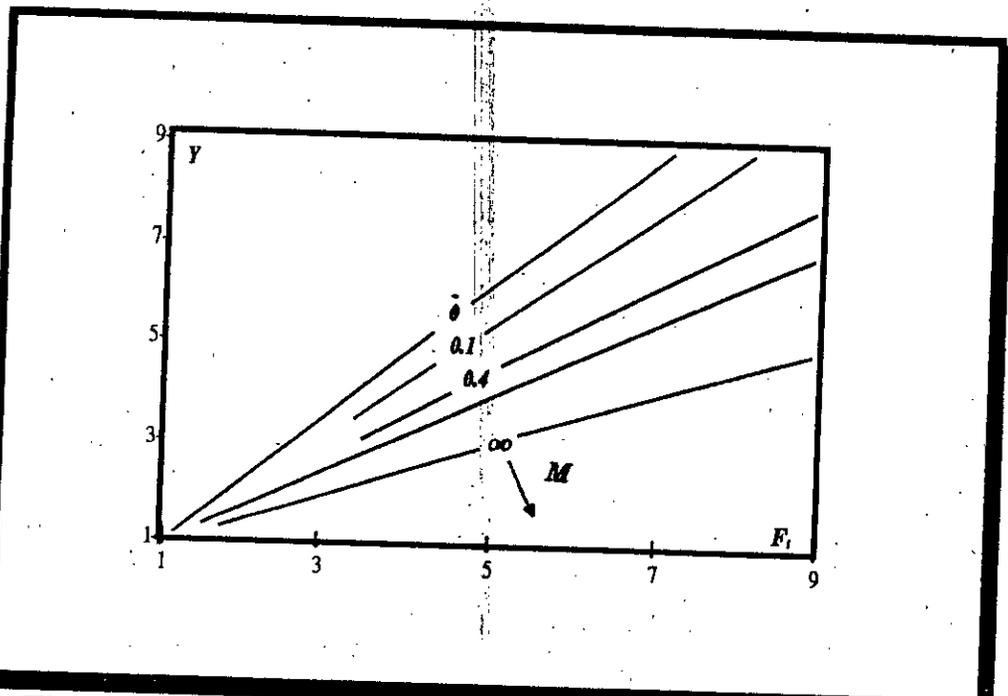


Figure 9: Rapport des hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$ du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal en fonction du nombre de Froude à l'amont et du paramètre $M = m h_1/b$ d'après:

Hager et Wanoschek.
Cas du canal triangulaire ($M=0$)
Cas du canal rectangulaire ($M=\infty$)

Elle montre que, pour un nombre de Froude F_1 fixé, le rapport des hauteurs conjuguées diminue au fur et à mesure que M augmente.

Sur la figure 9 sont représentées également les courbes enveloppes $M = 0$ et M tendant vers l'infini. La première courbe correspond au cas du canal rectangulaire $m = 0$ tandis que la seconde correspond au cas du canal triangulaire $b = 0$.

La relation (9) a été reprise par les deux auteurs dans leur étude sur le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal [15].

La courbe montre que le canal triangulaire est particulièrement intéressant car, pour un même nombre de Froude, la valeur de Y est la plus faible. Par conséquent, pour la même valeur de h_1 , la hauteur finale h_2 du ressaut est plus petite dans le cas du canal triangulaire, ce qui confère à ce dernier la plus faible dimension en hauteur.

Pour les cas des canaux triangulaire et rectangulaire ($M = 0$ et $1/M = 0$) les relations liant F_1 à Y sont les suivantes:

pour $M = 0$:

$$Y = 0.5 ((1 + 8 F_1^2)^{1/2} - 1) \quad (22)$$

pour $1/M = 0$:

$$F_1^2 = [2 Y^2 (Y^2 + Y + 1)] / [3 (Y + 1)] \quad (23)$$

On retrouve dans la première relation, l'expression de Belanger qui, selon Hager et Wanoschek [15] admet comme approximation:

$$Y = \sqrt{2 F_1} - 1/2 \text{ pour des nombres de Froude } F_1 > 3$$

En effet, pour des nombres de Froude $F_1 > 3$, $8 F_1^2 \gg 1$, cette dernière relation approchée de Belanger est particulièrement intéressante pour notre étude.

L'influence du seuil à l'aval du ressaut a été examinée par Lapray 1974, [16] mais Cette étude est restée au stade théorique.

Une relation est obtenue par application de l'équation des quantités de mouvement en supposant que le ressaut est du type classique, régi par l'équation de Belanger:

$$\text{Où :} \quad \Gamma = [H_1 - \Delta H - 3/2] / h_1 \quad (24)$$

$$\Gamma = \alpha / h_1 \quad (25)$$

(est le rapport entre la hauteur du seuil " α " est la hauteur initiale du ressaut.)

La relation:

$$H_i = H_1 / K \quad (26)$$

(est le rapport de la charge totale à l'amont du ressaut et de la profondeur critique)

$$\Delta H = \Delta H / K \quad (27)$$

(est le rapport entre la perte de charge due au ressaut et la profondeur critique)

$$h_i = h_1 / K \quad (28)$$

Cette dernière relation est développée et commentée dans notre partie théorique. Nous montrons que le paramètre Γ ne dépend que de h_i . Cependant, ces deux paramètres Γ et h_i sont liés par une relation fortement implicite. La détermination de la valeur h_i est nécessaire au calcul du débit maximum admissible, déjà défini, compatible avec la présence du ressaut sur le bassin de dissipation d'énergie.

En 1992, Hager et Damet [17] examinent l'effet d'un seuil transversal continu sur le ressaut se produisant dans un canal de section droite rectangulaire. Ils considèrent que le ressaut forcé par le seuil est un ressaut classique perturbé, notamment en ce qui concerne ses caractéristiques. Un procédé de normalisation est proposé et les caractéristiques principales du ressaut forcé sont rapportées à celles du ressaut classique.

Les auteurs montrent d'une part, que la perte de charge due au ressaut forcé est supérieure à celle du ressaut classique et que d'autre part la hauteur aval est plus réduite. Cette réduction, due à la présence du seuil est fonction de la hauteur relative initiale du ressaut et de la position du seuil.

Le ressaut forcé par seuil continu d'attirer l'attention de nombreux chercheurs. Cette attention est portée essentiellement sur le phénomène de disparition et de réapparition du ressaut causée respectivement par l'augmentation et la diminution du nombre de Froude amont. Des ondes de surface se forment en provoquant une contraction de l'écoulement.

En 1988, la limite de la contraction en fonction du nombre de Froude amont est examinée par Heggen [18] et en 1991 Kansoh [19] examine l'effet de la géométrie du seuil sur l'écoulement.

Plus récemment encore, en 1993, Hager et Mazumder [20], décrivent l'écoulement dans un canal de section droite rectangulaire divergente muni d'une pente adverse.

Les études suscitées demeurent encore à l'état d'observations et aucune relation n'a été proposée.

I.3. Conclusion

Nous venons de passer en revue les principaux résultats des travaux, relatifs au ressaut hydraulique classique et forcé par un seuil continu, qui pourraient intéresser notre étude. L'étude de la répartition des vitesses et des pressions ainsi que celle de la masse volumique, à l'intérieur même de la masse liquide entre les sections initiale et finale du ressaut, ne fait pas partie de nos considérations théorique et expérimentale.

En effet, notre étude se base sur l'équation des quantités de mouvement appliquées entre les sections initiale et finale du ressaut.

L'étude bibliographique montre l'importance accordée à l'effet du seuil sur le comportement du ressaut, celle-ci s'est traduite par le tracé des graphes expérimentaux de Forster et Skrinde, en notant, cependant l'approximation effectuée sur la charge totale au droit du seuil.

La détermination de la hauteur du seuil, nécessaire à l'établissement du ressaut sur le radier à partie horizontale, ne peut s'effectuer que par la voie graphique, nécessitant parfois des interpolations.

Notre travail porte sur les calcul des débits maximum et minimum compatibles avec la présence du ressaut sur le bassin de dissipation d'énergie. L'étude théorique s'est avérée intéressante car elle a permis d'établir des relations analytiques simples présentées en termes adimensionnels.

Ceci a été rendu possible grâce à l'introduction de la formule approchée de Belanger, proposée par Hager et vérifiée expérimentalement lors de notre étude.

Deuxième partie

Etude théorique

***Cas de la vanne de
fond***

I.1. INTRODUCTION.

Dans cette seconde partie de notre étude, un développement théorique est proposé, visant à établir des relations, aussi explicites que possible, permettant le calcul direct des débits maximum et minimum compatibles avec la présence du ressaut.

Dans un premier temps, le développement est effectué sur l'ouvrage muni à l'amont d'une vanne de fond, et dans un second temps sur le même ouvrage muni d'un seuil à l'amont.

Le calcul du débit maximum admissible est mené pour des débits croissants, tandis que le calcul du débit minimum admissible, valable uniquement pour la vanne de fond, s'effectue pour des débits décroissants. Enfin, deux exemples de calcul des débits suscités sont proposés.

II.2. CAS DE LA VANNE DE FOND SUIVIE D'UN SEUIL.

II.2.1. ETUDE DE L'ÉCOULEMENT À DÉBIT CROISSANT.

II.2.1.1. CONDITION DE FORMATION DU RESSAUT.

Considérons un écoulement sous vanne de fond suivie d'un seuil de hauteur "a" franchi en régime critique, dans un canal horizontal de section rectangulaire constante, figure 10.

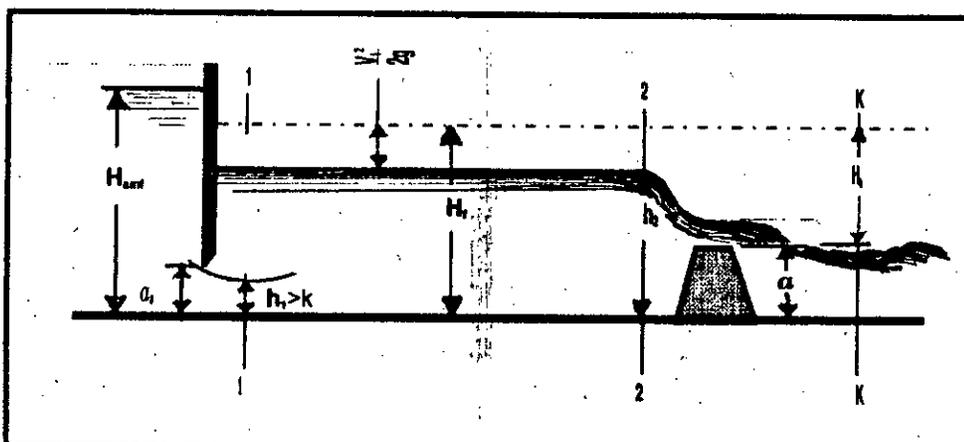


Figure 10 : Écoulement sous vanne de fond suivie d'un seuil "régime fluvial dans la section 1-1"

Cas de la vanne de fond "canal rectangulaire"

Le radier situé entre la vanne et le seuil est inondé, l'écoulement y est en régime fluvial et torrentiel à l'aval de ce seuil.

L'épaisseur h_1 de la lame liquide constituant le jet est telle que :

$$h_1 > K \quad (29)$$

avec,

K : la profondeur critique de l'écoulement.

Dans le cas d'un canal rectangulaire de largeur b , le débit volume Q s'exprime par :

$$Q = b(gk^3)^{1/2} \quad (30)$$

Où g désigne l'accélération de la pesanteur.

Cette dernière équation devient en tenant compte de l'inégalité (29):

$$Q < b(gh_1^3)^{1/2} \quad (31)$$

Le facteur de correction de l'énergie cinétique α étant égal à l'unité, la charge totale H_m à l'amont de la vanne est :

$$H_m = h_1 + V_1^2/(2g) \quad (32)$$

Où :

h_1 : désigne la profondeur fluviale de l'écoulement.

V_1 : désigne la vitesse moyenne de l'écoulement constitué par le jet sortant sous la vanne.

La profondeur h_1 peut être assimilée à la charge fluviale correspondante H_f et la figure 10 permet d'écrire :

$$H_m = H_f + V_1^2/(2g) \quad (33)$$

ou bien :

$$H_m = H_f + Q^2/[2g(bh_1)^3] \quad (34)$$

Si H_k désigne la charge critique, alors :

$$H_f = s + H_k \quad (35)$$

avec, dans le cas du canal rectangulaire :

$$H_k = (3/2)K \quad (36)$$

Cas de la vanne de fond "canal rectangulaire"

En tenant compte des équations (29) et (36), l'expression (35) devient:

$$H_1 < a + (3/2)h_1 \quad (37)$$

Tant que l'inégalité (37) est satisfaite, le régime de l'écoulement reste fluvial, sur le radier situé entre la vanne et le seuil.

Soit K_c la profondeur critique correspondant au débit maximum Q_{max} permettant un écoulement fluvial de charge totale H_m , nous pouvons écrire, en vertu des relations (29), (31) et (37):

$$K < K_c = h_1 \quad (38)$$

$$Q < Q_c = b (gh_1)^{3/2} \quad (39)$$

$$H_m < H_c = a + 2h_1 \quad (40)$$

Lorsque le débit Q croissant atteint une valeur telle que la vitesse V_1 dépasse la vitesse critique, le régime de l'écoulement sous la vanne devient torrentiel pour reprendre son caractère fluvial à l'amont du seuil; Ce qui implique la présence d'un ressaut sur le radier entre les sections 1-1 et 2-2 Figure 12.

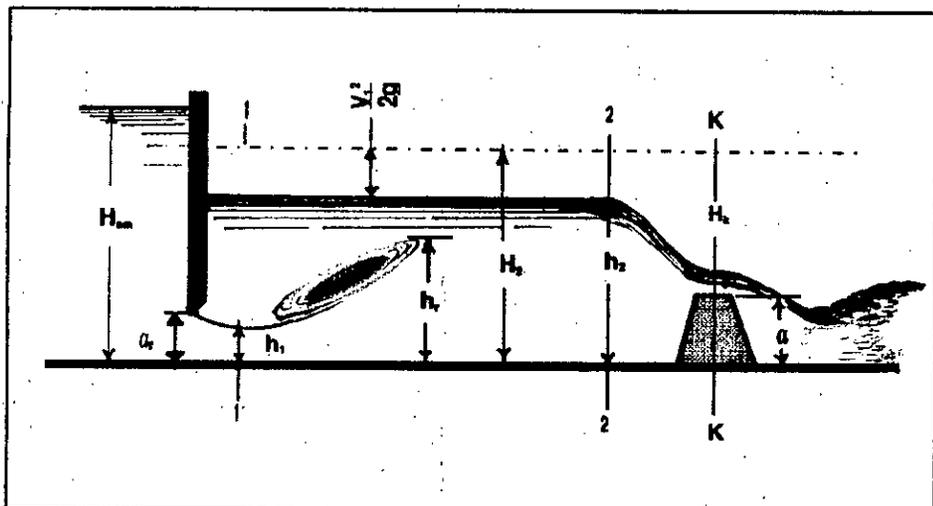


Figure 11: Ecoulement sous vanne de fond suivie d'un seuil, "Régime torrentiel dans la section 1-1, nous distinguons l'apparition du ressaut forcé par seuil".

Cas de la vanne de fond "canal rectangulaire"

Mais, la veine liquide passant sous la vanne reste noyée, tant que la profondeur h_2 à l'aval du ressaut se situe au-dessous du plan imposé par la charge H_2 , ou encore tant que:

$$H_1 - H_2 < \Delta H \quad (41)$$

Avec,

$$H_2 = a + H_k \quad (42)$$

H_1 et H_2 désignent respectivement les charges totales dans les sections 1-1 et 2-2, ΔH désigne la perte de charge due au tourbillon occasionné par le brusque élargissement se produisant à l'aval immédiat de la vanne.

Au fur et à mesure que le débit Q augmente, Cette perte de charge diminue et disparaît au moment où:

$$H_m - H_2 = 0 \quad (43)$$

Lorsque le jet sortant sous la vanne devient complètement dénoyé, l'inégalité (41) se transforme en égalité et le ressaut occupe sa position extrême correspondant au débit maximum Q_{max} , à la charge totale H_{max} et à la profondeur critique K_{max} . Finalement, le radier du canal restera couvert d'un ressaut noyé figure 11 tant que:

$$K_1 < K < K_{max} \quad (44)$$

$$H_1 < H_m < H_{max} \quad (45)$$

et,

$$Q_1 < Q < Q_{max} \quad (46)$$

II.2.1.2. CALCUL DU DEBIT MAXIMUM ADMISSIBLE.

Soient les hauteurs adimensionnelles:

$$H_1^*_{max} = H_1 / K_{max} \quad (47)$$

$$H_2^*_{max} = H_2 / K_{max} \quad (48)$$

$$\Delta H^*_{max} = \Delta H / K_{max} \quad (49)$$

$$h_1^*_{max} = h_1 / K_{max} \quad (50)$$

et,

$$h_2^*_{\max} = h_2 / K_{\max} \quad (51)$$

Pour le débit Q_{\max} , la relation (41) s'écrit sous la forme adimensionnelle suivante:

$$H_1^* - H_2^* = \Delta H^* \quad (52)$$

En tenant compte des équations (36), (42), (49) et (50), l'égalité (52) devient:

$$(a / h_1) h_1^*_{\max} + 3/2 = H_1^*_{\max} - \Delta H^*_{\max} \quad (53)$$

Soit:

$$\Gamma = [H_1^*_{\max} - \Delta H^*_{\max} - 3/2] / h_1^*_{\max} \quad (54)$$

avec,

$$\Gamma = a / h_1 \quad (55)$$

Compte tenu du fait que:

$$\Delta H^*_{\max} = H_1^*_{\max} - H_2^*_{\max} \quad (56)$$

La relation (54) peut également s'écrire comme suit :

$$\Gamma = [H_2^*_{\max} - 3/2] / h_1^*_{\max} \quad (57)$$

En considérant le facteur de correction de la quantité de mouvement égal à l'unité $\beta=1$, les pertes de charge autres que celles dues au ressaut négligeables et une répartition hydrostatique des pressions, l'équation de quantité de mouvement appliquée aux sections initiale et finale d'un ressaut, se produisant dans un canal horizontal de largeur b et de section rectangulaire constante, s'écrit :

$$bh_1^2/2 + Q^2/(gbh_1) = bh_2^2/2 + Q^2/(gbh_2) \quad (58)$$

h_1 et h_2 désignent respectivement la hauteur initiale et finale du ressaut.

En tenant compte des équations (31) et (28) la dernière relation s'écrit:

$$h_1^{*2} + 2(h_1^*)^{-1} = h_2^{*2} + 2(h_2^*)^{-1} \quad (59)$$

Cai de la vaine de fond "canal rectangulaire"

Ou bien après le développement de la relation (59) on obtient une fonction implicite de la forme suivante $h_2^* = f(h_1^*)$ soit:

$$h_2^* = [(h_1^*/2)^2 + 2/h_1^*]^{1/2} - h_1^*/2 \quad (60)$$

En notant que $h_2^*/h_1^* = h_2/h_1$, la relation (60) permet d'écrire:

En notant que $h_2^*/h_1^* = h_2/h_1$, la relation (60) permet d'écrire:

$$h_2/h_1 = 0.5 [(1 + 8/h_1^{*3})^{1/2} - 1] \quad (61)$$

En comparant la relation (60) à l'équation de Belanger donnée sous la forme :

$$Y = h_2/h_1 = 0.5 [(1 + 8F_1^2)^{1/2} - 1]$$

Avec,

F_1 : le nombre de Froude à l'amont du ressaut, il en ressort que:

$$F_1^2 = (h_1^*)^{-3} \quad (62)$$

Il est à noter que :

$$F_1 > 1 \text{ tandis que } 0 < h_1^* < 1.$$

La charge totale à l'aval du ressaut H_2 s'exprime par:

$$H_2 = h^2 + Q^2/[2g(bh_2)^2] \quad (63)$$

En tenant compte des expressions (24), (27), (28) et (30) la relation (63) devient:

$$H_2^* = h_2^* + 0.5(h_2^*)^2 \quad (64)$$

Les équations (60) et (64) montrent que Γ exprimé par l'expression (57) n'est fonction que du paramètre h_1^* .

Du point de vue pratique, les valeurs de Γ , la largeur du canal b et le tirant d'eau h_1 sont connus, l'élément recherché est h_1^* .

La valeur de ce dernier h_1^* est en effet nécessaire au calcul du débit maximum.

Les relations (30) et (50) donnent :

$$Q_{\max} = \sqrt{g} b \sqrt{h_1^3} (h_1^*_{\max})^{-3/2} \quad (65)$$

Cas de la vanne de fond "canal rectangulaire"

Cependant, h_1^* ne peut être calculé d'une manière explicite, il faut avoir recours soit à la voie graphique ou au calcul numérique.

On constate que h_1^* augmente au fur et à mesure que Γ diminue. Pour une même valeur de h_1^* et pour des valeurs croissantes de la hauteur du seuil "a", le débit maximum Q_{\max} augmente.

Une relation simple peut être proposée pour un calcul direct de h_1^* .

En effet, en tenant compte de l'équation approchée de Belanger proposée par Hager et Wanoschek [4]:

$$h_2/h_1 = \sqrt{2F_1} - 1/2, \text{ avec, } F_1 > 3$$

Ainsi, on a:

$$h_2^*/h_1^* = \sqrt{2} (h_1^*)^{3/2} - 1/2 \quad (66)$$

Des relations (64) et (66), l'équation (57) devient:

$$(h_{1^* \max}^*)^{3/2} (\Gamma + 1/2) + (3/2)(h_{1^* \max}^*)^{1/2} - \sqrt{2} - Y[h_{1^* \max}^*] (h_{1^* \max}^*)^{3/2} = 0 \quad (67)$$

Avec,

$$Y[h_{1^* \max}^*] = 2 [2\sqrt{2} - (h_{1^* \max}^*)^{3/2}]^2 \quad (68)$$

Dans le cas de la vanne de fond, la valeur de Γ est généralement comprise entre 1 et 8. la valeur de h_1^* se situe entre 0.2 et 0.47.

Ceci permet d'écrire que $h_{1^* \max}^{*3/2} \ll 2\sqrt{2}$ et ainsi la fonction $Y[h_{1^* \max}^*]$ prend la valeur de 1/4.

Finalement la relation (67) s'écrit sous la forme:

$$(h_{1^* \max}^*)^{3/2} (\Gamma + 1/4) + 3/2 (h_{1^* \max}^*)^{1/2} - \sqrt{2} = 0 \quad (69)$$

La relation (69) peut s'écrire sous la forme d'une équation du troisième degré, en posant: $X = (h_{1^* \max}^*)^{3/2}$

$$X^3 + pX + q = 0 \quad (70)$$

La résolution analytique de cette équation peut s'effectuer par la détermination de l'angle α tel que:

$$\text{Sh}(3\alpha) = 3q / [2(p^3/3)^{1/3}] \quad (71)$$

Avec,

$$q = \sqrt{2} / [\Gamma + 1/4] \text{ et } p = -(3/2) / [\Gamma + 1/4] \quad (72)$$

Cas de la vanne de fond "canal rectangulaire"

Ceci conduit à écrire:

$$\text{Sh}(3\alpha) = 2(\Gamma + 1/4)^{1/2} \quad (73)$$

et donc :

$$\alpha = (1/3) \arg \text{Sh}\{2[\Gamma + 1/4]^{1/2}\} \quad (74)$$

La racine réelle de l'équation (69) est :

$$h_{1*}^* = (4/3) \rho \text{Sh}^2 \alpha \quad (75)$$

d'où:

$$h_{1*}^* = (4/3)(3/2)(\Gamma + 1/4)^{-1} \text{Sh}^2 \alpha = 2\text{Sh}^2 \alpha / [\Gamma + 1/4] \quad (76)$$

Cette expression est une bonne approximation de la relation (57); l'erreur commise sur le calcul de h_{1*}^* n'excède pas 2%.

A partir des valeurs connues des paramètres Γ , b et h_i , le débit Q_{\max} peut être calculé par application de la relation (65).

Exemple:

Soit à déterminer le débit Q_{\max} compatible avec la présence d'un ressaut dans un canal de section droite rectangulaire muni d'une vanne de fond suivie d'un seuil de hauteur "a" égale à 0.30m pour une valeur de $h_i = 0.05\text{m}$.

Solution:

soit: $\Gamma = a / h_i = 30/5 = 6$

En appliquant la relation (76), on obtient:

$$h_{1*}^* = 0.23$$

La relation (65) permet de déterminer le débit unitaire q_{\max} :

$$q_{\max} = \sqrt{g} h_i^{3/2} / h_{1*}^* = \sqrt{9.81} (0.05)^{3/2} (0.23)^{-3/2} = 0.317 \text{ m}^2/\text{s}$$

II.2.2. ETUDE DE L'ÉCOULEMENT A DÉBIT DECROISSANT**II.2.2.1. Condition de réapparition du ressaut.**

A partir de l'instant où le débit croissant dépasse la valeur limite définie par Q_{max} , l'écoulement devient torrentiel sur le radier et provoque ainsi la disparition du ressaut.

En faisant décroître le débit, ce régime d'écoulement persiste même pour des débits sensiblement inférieurs à Q_{max} . Théoriquement ce phénomène persistera tant que:

$$H_i^* = H_c / K \geq 3/2 \quad (77)$$

Pour que le cas limite où $H_i^* = 3/2$, la perte de charge ΔH due au ressaut reste nulle, par conséquent $\Delta H_c^* = \Delta H / K = 0$. La relation (54) devient :

$$\Gamma = (H_{i\ min}^* - 3/2) / h_{i\ min}^* \quad (78)$$

L'expression donnant le paramètre H_i^* est:

$$H_i^* = h_i^* + 0.5 h_i^{*2} \quad (79)$$

Le paramètre H_i^* correspondant au débit minimum est:

$$H_{i\ min}^* = h_{i\ min}^* + 0.5(h_{i\ min}^*)^{-2} \quad (80)$$

En combinant les équations (78) et (80), il en résulte:

$$\Gamma = 1 + 0.5(h_{i\ min}^*)^{-3} - 1.5(h_{i\ min}^*)^{-1} \quad (81)$$

II.2.2.2. Calcul du débit minimum admissible.

La relation (81) est une équation du troisième degré en $h_{i\ min}^*$.

$$(h_{i\ min}^*)^3 + 1.5(\Gamma - 1)^{-1}(h_{i\ min}^*)^2 - 0.5(\Gamma - 1)^{-1} = 0 \quad (82)$$

En posant:

$$h_{i\ min}^* = X - 0.5(\Gamma - 1)^{-1} \quad (83)$$

la relation (82) devient après transformation:

$$X^3 + sX + t = 0 \quad (84)$$

Avec,

$$\begin{aligned} s &= -0.75(\Gamma - 1)^2 \quad \text{et} \\ t &= \{[1 - 2(\Gamma - 1)^2]\} / [4(\Gamma - 1)^2] \end{aligned} \quad (85)$$

Le discriminant de l'équation (84) est:

$$\Delta = (t/2)^2 + (s/3)^3 = \Gamma(\Gamma - 2) / [16(\Gamma - 1)^4] \quad (86)$$

Pour $1 < \Gamma < 2$ et $\Delta < 0$, l'équation (82) admet trois racines réelles qui peuvent être obtenues par la méthode trigonométrique.

$$X = 2(p/3)^{1/2} \text{Cos}(\alpha - 60^\circ) \quad (87)$$

avec α tel que:

$$\text{Cos}(3\alpha) = 1.5t (s^2/3)^{-1/2} \quad (88)$$

Nous ne retiendrons que la racine ayant une signification physique, soit:

$$\text{Cos}(3\alpha) = 1 - 2(\Gamma - 1)^2 \quad (89)$$

Finalement, la racine de l'équation (82) est, en tenant compte de (83):

$$h_{i \min} = \{\text{Cos}[1/3 \text{ArcCos}(1 - 2(\Gamma - 1)^2) - 60^\circ] - 1/2\} / (\Gamma - 1) \quad (90)$$

La relation (90) est applicable dans l'intervalle:

$$1 < \Gamma \leq 2 \quad \text{en remarquant que:}$$

$$\text{et:} \quad h_{i \min} = 1/2 \quad \text{Pour } \Gamma = 2$$

$$h_{i \min} = \sqrt{3}/3 \quad \text{Pour } \Gamma = 1$$

Pour $\Gamma > 2$ le discriminant Δ est strictement positif et l'équation (82) admet pour racine:

$$X = 2(p/2)^{1/2} \text{Ch}\alpha \quad (91)$$

L'angle α est tel que:

$$\text{Ch}(3\alpha) = 1.5t (s^2/3)^{-1/2} \quad (92)$$

soit:

$$\text{Ch}(3\alpha) = 2(\Gamma - 1)^2 - 1 \quad (93)$$

Finalement, la racine de l'équation (82) est, en tenant compte de (81):

$$h_{i\min} = \{ \text{Ch} [1/3 \text{ Arg Ch } (2(\Gamma - 1)^2) - 1] - 1/2 \} / (\Gamma - 1) \quad (94)$$

La relation (94) est valable pour $\Gamma > 2$.

L'expression permettant le calcul de Q_{\min} est identique à la relation (65) soit:

$$Q_{\min} = \sqrt{g b} \sqrt{h_1^3 / (h_{i\min})^{3/2}} \quad (95)$$

$$h_{i\min} = \{ \text{Cos} [1/3 \text{ Arg Cos } (1 - 2(\Gamma - 1)^2 - 60^\circ)] - 1/2 \} / (\Gamma - 1) \quad 1 < \Gamma \leq 2$$

$$h_{i\min} = \{ \text{Cos} [1/3 \text{ Arg Cos } (1 - 2(\Gamma - 1)^2 - 60^\circ)] - 1/2 \} / (\Gamma - 1) \quad \Gamma > 2 \quad (96)$$

Exemple II

Dans le cas de l'exemple cité précédemment où $\Gamma = 6$ et $h_1 = 0.05\text{m}$, $h_{i\min}$ doit être calculé en application de la relation (94), soit $h_{i\min} = 0.3827$;

Le débit unitaire q_{\min} serait donc égal, en vertu de la relation (95):

$$q_{\min} = 9.81^{1/2} * 0.05^{3/2} * 0.3827^{-3/2} = 0.148 \text{ m}^2/\text{s}.$$

Ainsi donc, la résolution analytique de l'équation (78), nous permet de calculer le paramètre $h_{i\min}$ nécessaire au calcul du débit minimum compatible avec la présence du ressaut sur le radier du bassin de dissipation d'énergie situé entre la vanne de fond et le seuil.

Q_{\min} se calcule par l'application de l'équation (65) qui prend la forme suivante:

$$Q_{\min} = \sqrt{g b} \sqrt{h_1^3 / (h_{i\min})^{3/2}}$$

où h_1 , et $h_{i\min}$ sont des paramètres connus.



**Cas de l'ouvrage
constitué de deux
seuil séparés par un
radier. "Ecoulement à débit croissant"**

II.3. Cas de l'ouvrage constitué de deux seuils séparés par un radier " Écoulement à débit croissant."

II.3.1. Effet des seuils amont et aval sur le calcul de la perte de charge due au ressaut.

La figure 12 montre un écoulement bidimensionnel passant par un ouvrage court, constitué de deux seuils de hauteur a_1 et a_2 , séparés par un radier horizontal faisant fonction de dissipateur d'énergie par ressaut hydraulique.

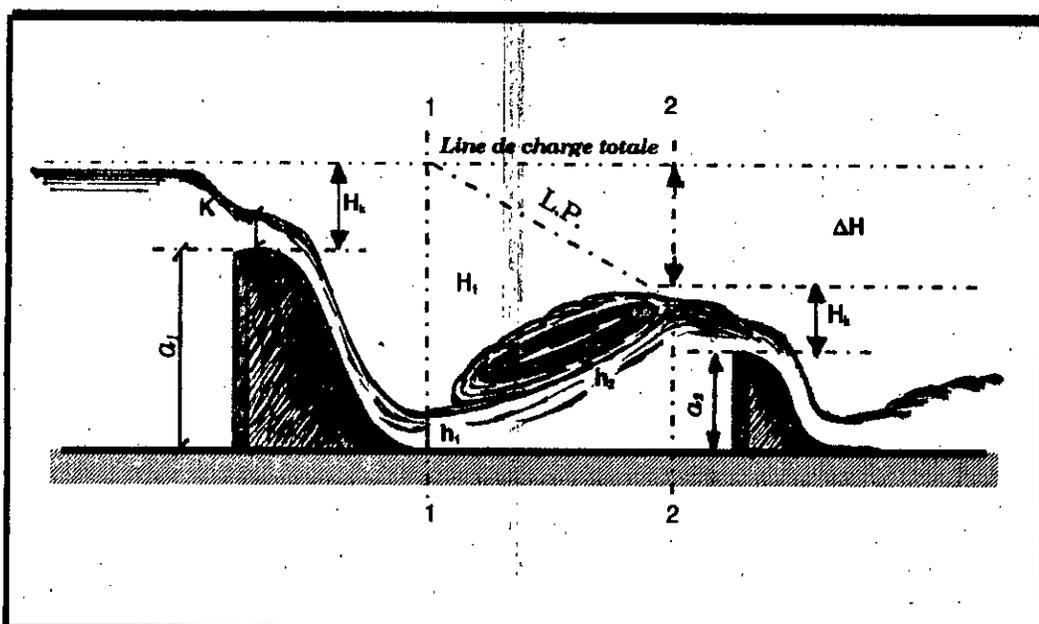


Figure 12: Schéma d'un écoulement bidimensionnel passant sur un fond constitué de deux seuils..

Les seuils a_1 et a_2 ainsi que le radier sont de même largeur "b".

Les parements avals des seuils sont tels que leur pente est supérieure à la pente critique, l'écoulement est alors en régime torrentiel.

L'écoulement à l'amont de ces seuils est par contre fluvial, par suite, leurs crêtes sont les lieux d'un écoulement en régime critique de profondeur K et de charge H_K .

Nous retiendrons comme hypothèse, justifiée d'ailleurs par la nature même de l'ouvrage, que les pertes de charge autres que celles dues au ressaut sont négligeables.

La position du ressaut est déterminée par la condition exprimée par la relation suivante:

$$\Delta H = H_1 - H_2 \quad \text{avec} \quad \Delta H \neq 0 \quad (97)$$

Où ΔH est la perte de charge due au ressaut, H_1 et H_2 sont respectivement la charge dans la section initiale et finale du ressaut.

Les charges initiale et finale du ressaut sont données par les relations suivantes:

$$H_1 = a_1 + H_k \quad (98)$$

$$H_2 = a_2 + H_k \quad (99)$$

L'égalité exprimée par l'équation (97) devient dans ce cas:

$$\Delta H = a_1 - a_2 \quad (100)$$

La relation (100) montre que la perte de charge due au ressaut est égale à la différence des hauteurs des seuils a_1 et a_2 sont des paramètres géométriques de dimension connue après l'exécution de l'ouvrage représenté par la figure 12.

Par conséquent, La perte de charge ΔH est simplement évaluée par application de la relation (100).

II.3.2. Paramètre adimensionnel des seuils en fonction des caractéristiques du ressaut.

Le ressaut occupe en fait sa position extrême correspondant au débit

q_{max} . Si le débit évacué par l'ouvrage est supérieur au débit maximum q_{max} le ressaut jusque là stationnaire, se déplace vers l'aval et disparaît, laissant place à un écoulement franchement torrentiel, occupant le radier ainsi que la crête du seuil a_2 . Figure 12.

Cet écoulement est indésirable car les forces tractrices qu'il occasionne sont néfastes à l'ouvrage par leur caractère érosif. Il est par conséquent indispensable de calculer le débit maximum q_{max} compatible avec la présence du ressaut sur le radier du dissipateur d'énergie.

Nous rappelons que pour sa position extrême, le ressaut est caractérisé par la perte de charge ΔH , les charges initiale et finale $H_{1\max}$ et $H_{2\max}$ ainsi que la hauteur critique K_{\max} correspondant au débit maximum Q_{\max} .

Nous rappelons aussi que :

$$H_{1\max} = H_1 / K_{\max}$$

$$\Delta H_{\max} = \Delta H / K_{\max}$$

En tenant compte du fait que, pour un canal de section rectangulaire constante, la charge critique H_c est égale 1,5 fois la hauteur critique K , la combinaison des relations (27) et (49) permet d'écrire:

$$(H_{1\max} - 3/2)K_{\max} = a_1 \quad (101)$$

D'autre part, en tenant compte de l'équation (49), l'expression (100) devient:

$$\Delta H_{\max} = (a_1 - a_2) / K_{\max} \quad (102)$$

Le rapport des relations (101) et (102) est:

$$\Delta H_{\max} / (H_{1\max} - 3/2) = (a_1 - a_2) / a_1 \quad (103)$$

Soit:

$$\Phi = \Delta H_{\max} / (H_{1\max} - 3/2) \quad (104)$$

avec,

$$\Phi = 1 - a_2/a_1 \quad (105)$$

Il est à noter pour que le ressaut puisse se former, la hauteur du seuil a_2 doit être inférieure à celle du seuil a_1 , car la perte de charge ΔH exprimée par la relation (102) doit être positive.

Etant donné que $a_1/a_2 < 1$, la relation (105) montre que le paramètre sans dimensions Φ est inférieur à l'unité.

Si les seuils a_1 et a_2 sont d'égale hauteur, le paramètre Φ est nul ainsi que ΔH ; par conséquent, $\Delta H_{\max} = \Delta H / K_{\max} = 0$ et la perte de charge ΔH serait nulle, ce qui implique l'absence du ressaut sur le radier du bassin de dissipation d'énergie.

De même, si la hauteur du seuil a_2 est nulle, la relation (42)

montre que la charge totale à l'aval du ressaut se confond avec la charge critique H_k et le ressaut ne peut alors exister car l'écoulement à l'aval de celui-ci doit être fluvial.

Après toutes ces considérations, nous pouvons écrire:

$$0 < \Phi < 1 \quad (106)$$

La relation (104) exprime le paramètre Φ comme une fonction de deux variables ΔH_{\max} et $H_{1\max}$, nous allons voir que ces deux variables sont en fait dépendantes.

L'équation des quantités de mouvement appliquées aux sections initiale et finale d'un ressaut se produisant dans un canal horizontal, peut s'exprimer par :

$$h_1^2/2 + q^2/(gh_1) = h_2^2/2 + q^2/(gh_2) \quad (107)$$

Le ressaut se formant sur le radier horizontal est considéré en fait comme un ressaut classique malgré la présence du seuil a_2 de ce fait l'équation de BELANGER, définissant le rapport des hauteurs conjuguées h_1 et h_2 du ressaut en fonction du nombre de Froude à L'amont reste encore en vigueur, soit:

$$Y = 1/2[(1 + 8F_1^2)^{1/2} - 1]$$

Avec,

$$F_1^2 = q^2/(gh_1^3) \quad (108)$$

Nous savons que pour un canal rectangulaire de section constante l'équation (24) peut s'écrire:

$$(Q/b)^2 = q^2 = K^2g \implies K^2 = q^2/g \quad (109)$$

Par suite, en tenant compte des relations (107) et (108) il vient que:

$$F_1 = h_1^{-3/2} \quad \text{et on a : } h_1 = h_1/K \quad (110)$$

D'autre part, pour $F_1 > 1$ nous obtenons $0 < h_1 < 1$ et pour $F_1 = 1$, l'écoulement est critique et $h_1 = 1$.

En tenant compte de (50), (108) et (64) la relation (107) devient:

$$h_1^2 + 1/2h_1^{-1} = h_2^2 + 1/2h_2^{-1}$$

On constate que la relation (107) passe d'une fonction de trois variables q , h_1 et h_2 à une fonction de deux variables seulement h_1 et h_2 .

La charge totale à l'amont du ressaut étant:

$$H_1 = h_1 + q^2 / (2gh_1^3) \quad (111)$$

Les équations (28) et (109), permettent d'exprimer la relation (111) comme suit:

$$H_1 = h_1 + 1/2h_1^{-2} \text{ avec } H_1 = H_1/K \quad (112)$$

De la même façon la charge totale à l'aval du ressaut s'écrit:

$$H_2 = h_2 + q^2 / (2gh_2^3)$$

Les équations (28) et (109), permettent d'exprimer la relation (63) de la façon suivante:

$$H_2 = h_2 + 1/2h_2^{-2} \text{ avec } H_2 = H_2/K$$

Par suite, en tenant compte de l'équation (64) et (111) la relation (52) devient:

$$\Delta H = H_1 - H_2$$

Les relations (5), (52), (59) et (64) nous indiquent clairement que le paramètre sans dimension Φ exprimé par l'équation (104) n'est fonction que de la seule variable $h_{1 \max}$.

II.3.3. Relation approchée du paramètre adimensionnel Φ en fonction de la hauteur relative initiale du ressaut h_1 .

L'application pratique de la relation (104) consiste à évaluer le paramètre $h_{1 \max}$ à partir de la valeur connue de Φ . Cependant cette évaluation ne peut se faire de manière explicite et le recours à la voie graphique ou numérique est nécessaire.

A la lumière du tableau 1 consignant les valeurs de $h_{1 \max}$ et Φ , Il est possible de proposer une relation explicite permettant de déterminer $h_{1 \max}$ en fonction de Φ .

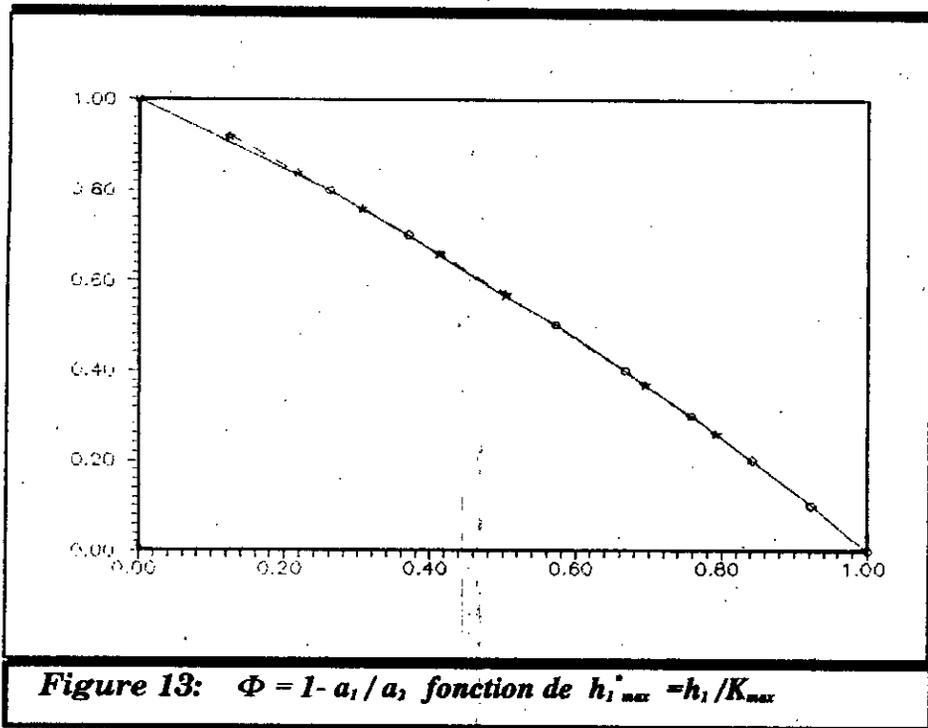
Cas de l'ouvrage constitué de deux vannes séparées par un radier - Ecoulement à débit croissant.

Les valeurs regroupées dans le tableau 1 ont été calculées par l'exécution d'un programme basé sur la méthode des approximations successives.

Tableau 1: Valeurs théoriques des paramètres adimensionnels $h_{1\max}$ et ϕ .

ϕ	1	0.8	0.7	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
$h_{1\max}$	0	0.2624	0.3704	0.5728	0.6672	0.7569	0.8421	0.9230
Si en applique la fonction inverse on trouve les résultats suivants								
ϕ	0.26	0.37	0.57	0.66	0.76	0.84	0.92	—
$h_{1\max}$	0.7915	0.6945	0.5040	0.4123	0.3062	0.2177	0.1242	—

La relation $\Phi = f[h_{1\max}]$ est représentée graphiquement sur la figure 13.



De plus, quelques remarques s'imposent :

1)- Lorsque Φ tend vers l'unité, $h_{1\max}$ tend à s'annuler.

$$\Phi \longrightarrow 1,$$

$$h_{1\max} \longrightarrow 0.$$

Nous avons déjà attiré l'attention sur le fait que $a_2 \approx 0$ par conséquent la condition $[\Phi, h_{1\max}]$, appartenant à l'intervalle $[1,0]$ impose, en vertu de l'équation (100), que $a_1 \gg a_2$.

(C'est le cas d'un Barrage déversoir).

2) - Lorsque Φ tend vers zéro, $h_{i \max}$ tend vers l'unité.

(régime critique)

$$\Phi \longrightarrow 0, \quad h_{i \max} \longrightarrow 1$$

La condition $[\Phi, h_{i \max}] \in E$ tel que $E = [1, 0]$ impose, en vertu de la relation (105), que $\alpha_i = \alpha_s$.

3) - $\Phi = f(h_{i \max})$ se situe au-dessus de la droite $\Phi + h_{i \max} = 1$ passant par les points $[1, 0]$ et $[0, 1]$.

Ainsi, $\Phi = f(h_{i \max})$ ne peut être que de la forme:

$$\Phi^m + h_{i \max}^n = \text{Constante.} \quad (113)$$

Où, $m > 1$ et $n > 1$.

4) - Les valeurs du tableau 1 nous incitent à écrire :

$$h_{i \max i} = f(\Phi_i), \quad \Phi_i = f(h_{i \max i})$$

EXEMPLE:

$$\Phi = 0.57 \text{ =====> } h_{i \max} = 0.504$$

$$\Phi = 0.50 \text{ =====> } h_{i \max} = 0.5728$$

Ceci montre que les exposants m et n figurant en (113) sont de même valeur:

Soit: $m = n$

5) - Les remarques 1) et 2) imposent que la constante de l'équation (113) doit être égale à l'unité.

Pour le domaine des valeurs des paramètres h_i et Φ tels que :

$$0.23 < h_i < 0.48$$

$$0.56 < \Phi < 0.78$$

les valeurs du tableau 1 ont permis d'attribuer à l'exposant m une valeur moyenne de $9/8$ et l'équation (113) prend alors la forme définitive suivante :

Cas de l'ouvrage constitué de deux seuils séparés par un radier - Ecoulement à débit croissant.

$$[h_{1 \max}']^{9/2} + \Phi^{9/2} = 1 \quad (114)$$

La relation (114) est une bonne approximation de l'expression (104) et l'erreur commise sur le calcul de $h_{1 \max}'$ ne dépasse guère 1,2%

II.3.4. Calcul du débit maximum admissible

Il est utile de rappeler que q_{\max} est le débit maximum compatible avec la présence du ressaut sur le radier du bassin de dissipation d'énergie représenté par la figure (12).

Si le débit q dépasse, même légèrement la valeur limite définie par q_{\max} le ressaut se déplace vers l'aval et disparaît subitement.

De la combinaison des relations (28) et (109) il résulte :

$$q_{\max} = \sqrt{g} \sqrt{h_1'} (h_{1 \max}')^{-3/2} \quad (115)$$

Du point de vue pratique, les données du problème sont :

- Hauteurs des seuils a_1 et a_2 , dont le rapport détermine une valeur du paramètre Φ par application de la relation (105). Par suite, $h_{1 \max}'$ est entièrement défini par application de la relation (114).

Finalement, tous les paramètres sont connus pour le calcul de q_{\max} , en vertu de la relation (115).

Dans le cas où la hauteur initiale h_1 du ressaut n'est pas connue, le calcul de q_{\max} est tout de même possible.

En effet, nous savons que, pour un ressaut se produisant dans un canal horizontal de section constante la perte de charge due au ressaut s'écrit :

$$\Delta H = (h_2 - h_1)^3 / [4(h_1 h_2)] \quad (116)$$

En tenant compte des relations (49), (50) et (51), l'équation (114) devient :

$$\Delta H'_{\max} = (h_{2 \max}' - h_{1 \max}')^3 / [4(h_{1 \max}' h_{2 \max}')] \quad (117)$$

Ou bien, en tenant compte de l'expression (59) :

$$\Delta H'_{\max} = \left[\left[\left(\frac{X}{2} \right)^2 + 2/X \right]^{1/2} - (3X)/2 \right]^3 / 4 \left[\left[\left(\frac{X^2}{2} \right)^2 + 2X \right]^{1/2} - X^2/2 \right]^{-1} \quad (118)$$

où : $X = h_{1 \max}'$

Cas de l'ouvrage constitué de deux seuils séparés par un radier - Ecoulement à débit croissant.

La relation (118) montre que ΔH_{\max} est entièrement déterminé par la seule variable $X = h_{1\max}$.

En tenant compte de (102) et (109) il résulte que:

$$q_{\max} = \sqrt{g} [(a_1 - a_2) / \Delta H_{\max}]^{3/2} \quad (119)$$

Les éléments connus pour le calcul du débit q_{\max} sont :

- a_1 et a_2
- $\Phi = 1 - a_2/a_1$
- $h_{1\max} = [1 - \Phi]^{1/2}$
- ΔH_{\max}

Finalement, la relation (119) permet le calcul de q_{\max} sans tenir compte de la hauteur initiale h_1 du ressaut.

Le calcul de q_{\max} est également possible si seules les valeurs de a_1 et de la vitesse maximale V_1 au pied du ressaut sont connues.

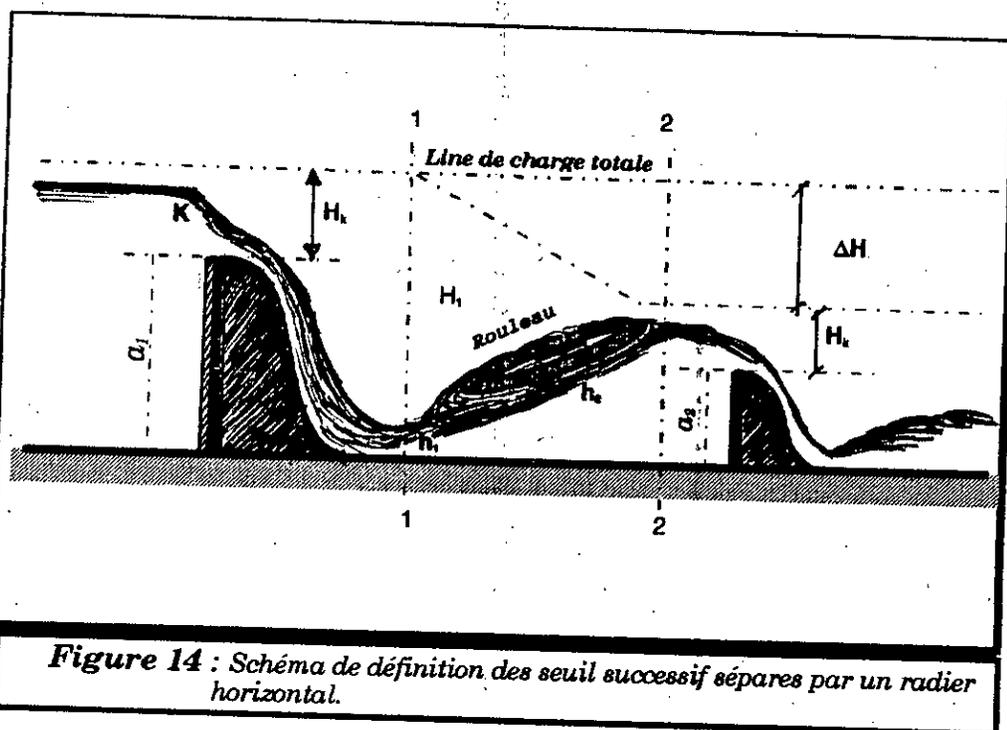


Figure 14 : Schéma de définition des seuils successifs séparés par un radier horizontal.

La figure 14 permet d'établir la relation suivante:

$$h_1 + V_1^2 / (2g) = a_1 + H_k \quad (120)$$

(perte de charge négligées sur le parement aval du seuil a_1)

Cas de l'ouvrage couronné de deux vannes séparés par un radier - Ecoulement à débit croissant.

Avec:
$$h_1 = q / V_1 \quad (121)$$

$$H_k = 3/2 K \quad (122)$$

La relation (120) devient:

$$(K^2 g)^{1/2} / V_1 + V_1^2 / (2g) = a_1 + (3/2) K \quad (123)$$

on pose :
$$Z = \sqrt{K}$$

La relation (123) prend la forme définitive sous la forme (124):

$$Z^3 + s Z^2 + t = 0 \quad (124)$$

avec:
$$s = -3 V_1 / (2 \sqrt{g}) \quad (125)$$

$$t = V_1 [V_1^2 / (2g) - a_1] / \sqrt{g} \quad (126)$$

Et si de plus:
$$Z = X - s/3 \quad (127)$$

Alors (124) devient:

$$X^3 - p X - q = 0 \quad (128)$$

$$p = 3 V_1^2 / (4g) > 0 \quad (129)$$

$$q = V_1 [V_1^2 / (2g) - 2a_1] / (2 \sqrt{g}) < 0, \text{ car } 2a_1 > V_1^2 / (2g) \quad (130)$$

l'équation exprimée par (128) est une équation du 3^{ème} degré, dont le discriminant Δ est:

$$\Delta = [a_1 V_1^2 / (4g)] [a_1 - V_1^2 / (2g)] \quad (131)$$

Le discriminant Δ est strictement négatif car $a_1 < V_1^2 / (2g)$ par suite, l'équation (128) admet trois racines, ces dernières peuvent être déterminées par la méthode trigonométrique:

On détermine l'angle α tel que:

$$\cos(3\alpha) = 3q / [2(p^2/3)^{1/2}] \quad (132)$$

Soit :
$$\cos(3\alpha) = 1 - 4a_1 g V_1^{-2} \quad (133)$$

La seule racine à retenir est:

$$X = 2(p/3)^{1/2} \cos(\alpha + 60^\circ) \quad (134)$$

$$= [\cos(\alpha + 60^\circ)] V_1^2 / \sqrt{g}$$

En tenant compte de (123), (124) et (127), il vient que:

$$\sqrt{K_{\max}} = V_1 [1/2 + \cos(\alpha + 60^\circ)] / \sqrt{g} \quad (135)$$

Cas de l'ouvrage constitué de deux seuils séparés par un radier - Ecoulement à débit croissant.

Par suite, le débit q_{\max} défini par (109) s'exprime comme suit:

$$q_{\max} = V_1^2 [1/2 + \text{Cos}(\alpha + 60^\circ)]^2 / g \quad (136)$$

La relation (136) montre que q_{\max} est une fonction de V_1 et α_1 .

La combinaison des relations (120) et (135) permet d'exprimer la hauteur initiale h_1 du ressaut comme une fonction explicite de V_1 et α_1 , soit:

$$h_{1 \max} = \alpha_1 + \{3[1/2 + \text{Cos}(\alpha + 60^\circ)]^2 - 1\} V_1^2 / (2g) \quad (137)$$

Où:

h_1 et h_2 désignent respectivement la hauteur initiale et finale du ressaut.



II.4. Conclusion

L'étude théorique a eu pour objectif l'élaboration de relations analytiques pouvant mener au calcul des débits maximum et minimum compatibles avec la présence d'un ressaut de type A.

L'intérêt de ces relations réside d'une part dans le fait qu'elles permettent d'éviter la résolution par voie graphique, notamment celle proposée par G. Lapray et que d'autre part, les études antérieures ne se sont pas intéressées au calcul des débits maximum et minimum compatibles avec la présence d'un ressaut du type A sous l'effet d'un seuil continu.

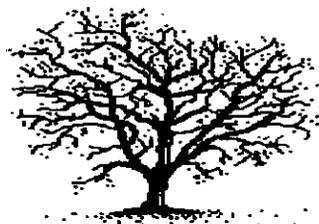
Ce calcul du débit maximum est pourtant nécessaire car il représente en fait le débit à ne pas dépasser afin d'éviter la disparition du ressaut.

Le développement théorique effectué, pour le cas de la vanne de fond, a mené à l'établissement de la fonction liant le paramètre adimensionnel Γ à la hauteur relative initiale $h_{i \text{ MAX}}$ du ressaut nécessaire au calcul du débit maximum admissible. La résolution analytique du problème a été rendu possible grâce à la relation simplifiée de Belanger proposée par Hager ainsi qu'à l'introduction de la valeur moyenne, estimée à 1/4, de la fonction $Y(h_{i \text{ MAX}})$.

Quant au calcul du débit Minimum admissible, l'étude théorique a montré qu'il pouvait être mené par la résolution analytique d'une équation du troisième degré, à l'aide des fonctions trigonométriques et hyperboliques, mais que le choix de la solution du problème dépendait de la valeur du paramètre adimensionnel Γ .

En ce qui concerne l'étude de l'ouvrage constitué de deux seuils séparés par un radier horizontal, celle-ci nous a conduit aux résultats suivants:

- *La perte de charge due au ressaut peut être évaluée par la différence des hauteurs des seuils amont et aval.*
- *Le paramètre adimensionnel Φ des seuils amont et aval, n'est fonction que de la hauteur relative initiale du ressaut $h_1 = h/K$, où K est la profondeur critique.*
- *Le débit maximum admissible compatible avec la présence du ressaut, évalué par la voie analytique, n'est fonction que du paramètre Φ , c'est à dire des caractéristiques géométriques des seuils amont et aval.*



Troisième partie

Etude expérimentale

III.1. INTRODUCTION

Le but de cette partie est la vérification expérimentale des relations théoriques que nous avons proposées.

Dans un premier temps, nous avons effectué quelques essais visant à confirmer la fiabilité de la relation simplifiée de Belanger proposée par Hager et de déterminer la valeur moyenne de la fonction $Y(h_{1, \max})$.

Dans un second temps, l'étude expérimentale s'est consacrée à la détermination des débits maximum et minimum compatibles avec la présence du ressaut sur le radier du bassin de dissipation d'énergie. Pour cela, la détermination des valeurs expérimentales de $\Gamma = a/h_1$, h_1 et Γ est nécessaire.

Les valeurs expérimentales de $\Gamma = a/h_1$ sont obtenues en mesurant, pour chaque valeur du débit, la hauteur a du seuil situé à l'aval ainsi que la hauteur initiale du ressaut. Le couple de valeurs (a, h_1) correspond en fait à la position extrême du ressaut et le seuil est franchi en régime critique. La valeur du débit correspondant à cette position du ressaut est aussi déterminée. Cette valeur du débit volume permet le calcul du débit unitaire q , $q = Q/b$, où b est la largeur du canal utilisé. La valeur du débit unitaire permet alors le calcul de la profondeur critique par application de la relation $K = (q^2/g)^{1/3}$, en notant le fait que la profondeur critique ne peut être mesurée par voie expérimentale. Ainsi, le paramètre adimensionnel $h_{1, \max}^ = h_{1, \max}/K$ est aisément évalué.*

Le procédé ci-dessus décrit est réitéré pour chaque valeur du débit volume Q passant par le canal.

Le seuil, situé à l'aval des ouvrages testés est constitué d'une paroi qui peut se déplacer verticalement; ceci permet de ramener le ressaut à sa position initiale pour les débits croissants ou décroissants.

Les hauteurs initiale et finale du ressaut, mesurées au moyen d'une règle graduée, permettent le calcul de leur rapport Y , des charges initiale et finale du ressaut et, par conséquent, de la perte de charge due à celui-ci.

Pour le cas de l'ouvrage constitué de deux seuils séparés par un radier horizontal, l'étude permet de constater l'effet du seuil amont sur les caractéristiques du ressaut. De plus, l'introduction de ce seuil simplifie considérablement le calcul de la perte de charge due au ressaut en considérant que celle-ci est égale à la différence des hauteurs des seuils amont et aval.

Enfin, les courbes expérimentales obtenues sont comparées à celles issues du développement théorique et des conclusions intéressantes sont dégagées.

III.2. CAS DE LA VANNE DE FOND SUIVIE D'UN SEUIL.

III.2.1. Vérification expérimentale de la relation simplifiée de Belanger.

Bien que la relation simplifiée de Belanger, proposée par Hager, ait été vérifiée par ce dernier, il nous a semblé utile de procéder à cette même vérification. Nous rappelons que cette relation exprime le rapport Y des hauteurs conjuguées h_1 et h_2 du ressaut, en fonction du nombre de Froude amont F_1 .

$$Y = h_2/h_1 = \sqrt{2 F_1^2 - 1} / 2$$

La vérification expérimentale de cette dernière relation a été effectuée, pour le cas de la vanne de fond suivie d'un seuil, de la façon suivante :

- i. Un ressaut du type A est créé sur le radier à partie horizontale de l'ouvrage pour un débit donné que l'on mesure. Le ressaut est contrôlé grâce au seuil situé à l'aval et se produit alors entièrement sur le radier.
- ii. Les hauteurs h_1 et h_2 sont mesurées à l'aide d'une règle graduée et permettent, pour le débit mesuré en i , d'évaluer le rapport $Y = h_2/h_1$. La valeur du débit mesuré en i , ainsi que la valeur de la hauteur initiale h_1 du ressaut mesuré en ii , permettent le calcul du nombre de Froude F_1 à l'amont par application de la relation :

$$F_1^2 = q^2 / (gh_1^3)$$

dans laquelle q désigne le débit unitaire et g l'accélération de la pesanteur prise égale à $9,81 \text{ ms}^{-2}$.

iii. Les procédures décrites en i. et ii. sont répétées pour une autre valeur du débit. Il faut cependant rappeler que la variation du débit entraîne le déplacement du ressaut et le seuil, situé à l'aval, doit être actionné dans le sens vertical dans le but de faire revenir le ressaut à sa position initiale.

Le tableau 2. regroupe les valeurs expérimentales des débits unitaires, des hauteurs initiale et finale du ressaut, du nombre de Froude à l'amont du ressaut ainsi que celles du rapport Y des hauteurs conjuguées. Les couples de valeurs (Y, F_1) obtenues ont permis le tracé de $Y = f(F_1)$ dont la courbe est représentée sur la figure 15.

Cette courbe montre que la relation simplifiée de Belanger donne des valeurs de Y légèrement inférieures aux valeurs données par la relation exacte et que les points expérimentaux ne s'écartent pas beaucoup de celle-ci. L'écart maximum obtenu ne dépasse guère 1,2 %.

L'hypothèse simplificatrice, proposée par Hager et que nous avons considérée dans notre développement théorique est, par conséquent, largement justifiée.

Tableau 2. Valeurs expérimentales du rapport Y des hauteurs conjuguées h_1 et h_2 du ressaut du type A et du nombre de Froude F_1 à l'amont.

q (m^2/s)	0,021	0,025	0,029	0,033	0,040	0,041	0,0423	0,0425
h_1 (cm)	1,100	1,350	1,600	1,750	2,050	2,100	2,150	2,160
h_2 (cm)	8,050	9,050	9,600	10,400	11,600	11,750	12,000	12,05
$Y = h_2/h_1$	7,320	6,704	6,000	5,942	5,658	5,595	5,581	5,578
F_1	5,529	5,094	5,094	5,091	4,554	4,354	4,308	4,298

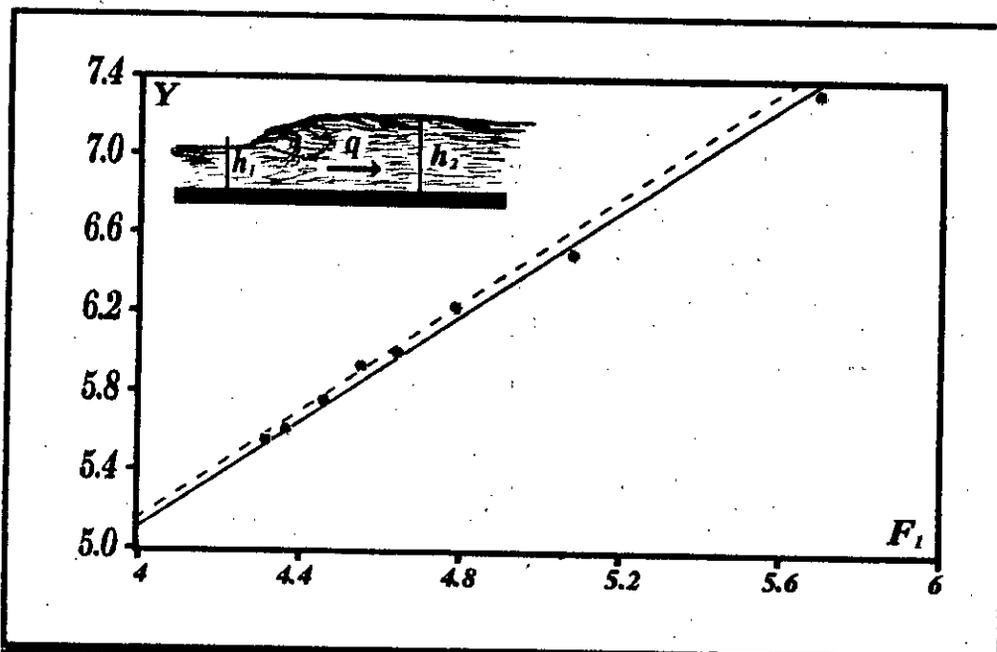


Figure 15: Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut $Y = h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude à l'amont : $F_1^2 = q^2/(gh_1^3)$
 (—) Relation approchée de Belanger selon Hager : $Y = \sqrt{2F_1 - 1}/2$
 (....) Points expérimentaux.
 (—) Courbe tracée selon l'équation de Belanger :
 $Y = 1/2 [(1 + 8F_1^2)^{1/2} - 1]$

III.2.2. Détermination expérimentale de la valeur de la fonction $(h_{1,max}^*)$.

Lors du développement théorique visant à déterminer l'expression analytique de $h_{1,max}^*$ en fonction de Γ , il a été nécessaire d'évaluer la fonction suivante (68):

$$Y(h_{1,max}^*) = 2[2\sqrt{2} - (h_{1,max}^*)^{3/2}]^2$$

Nous avons attribué à cette fonction la valeur de 1/4 du fait que $h_{1,max}^{3/2} \ll 2\sqrt{2}$. Nous nous proposons, dans ce qui suit, de vérifier par voie expérimentale la valeur de cette fonction pour différentes valeurs du paramètre $h_{1,max}^*$.

Pour cela, le modèle utilisé étant la vanne de fond suivie d'un seuil, les hauteurs initiales du ressaut sont mesurées pour chacun des débits utilisés. Ceux-ci, permettent le calcul des profondeurs critiques correspondantes et les différentes valeurs du paramètre $h_{1,max}^*$ sont ainsi aisément déterminées:

$$h_{1,max}^* = h_1 / K_1, \quad K_1 = [q^2/g]^{1/3} \quad (138)$$

Les valeurs expérimentales obtenues sont regroupées dans le tableau 3.

Tableau 3: Valeurs de la fonction $Y(h_{1\max}^*) = 2[\sqrt{2 - (h_{1\max}^*)^2}]^2$ en fonction des valeurs expérimentales de $h_{1\max}^*$

q (m ³ /s)	0,021	0,025	0,029	0,033	0,037	0,041	0,0423
h_1 (cm)	1,100	1,350	1,600	1,750	1,900	2,100	2,150
K (cm)	3,555	3,994	4,410	4,806	5,187	5,554	5,671
$h_{1\max}^*$	0,309	0,338	0,363	0,364	0,366	0,378	0,379
$Y(h_{1\max}^*)$	0,283	0,288	0,293	0,294	0,294	0,296	0,297

Le tableau 3 montre que, pour $0.3 < h_{1\max}^* < 0.38$ correspondant à un nombre de Froude à l'amont du ressaut tel que $4.2 < F_1 < 6$, la fonction $Y(h_{1\max}^*)$ ne varie que très peu et voit sa valeur telle que:

$$0.28 < Y(h_{1\max}^*) < 0.3.$$

Cette faible variation de la fonction $Y(h_{1\max}^*)$ nous permet d'affecter à celle-ci, avec une erreur tout à fait acceptable de l'ordre de 3% au maximum, la valeur de 0.29, correspondant à la moyenne arithmétique des valeurs expérimentales figurant au tableau 3. Il est à signaler que cette approximation n'affecte pas, ou si non très peu (de l'ordre de 2% au maximum), le calcul du débit maximum admissible q_{\max} .

III.2.3. Effet de la valeur expérimentale de $Y(h_{1\max}^*)$ sur l'expression de $h_{1\max}^*$.

Notre développement théorique a abouti à la relation (67) exprimant Γ en fonction de $h_{1\max}^*$:

$$(h_{1\max}^*)^{3/2} (\Gamma - 1/2) + (3/2)(h_{1\max}^*)^{1/2} - \sqrt{2} - Y(h_{1\max}^*) (h_{1\max}^*)^{3/2} = 0$$

En affectant à la fonction $Y(h_{1\max}^*)$ sa valeur moyenne expérimentale issue de III.2.1, soit $Y_{\text{exp}}(h_{1\max}^*) = 0.21$ (Alors que $Y_{\text{th}}(h_{1\max}^*) = 1/4$), la relation (67) prend la forme définitive suivante:

$$(h_{1\max}^*)^{3/2} + [3/2 (h_{1\max}^*)^{1/2}] (\Gamma + 0.21)^{-1} - \sqrt{2} (\Gamma + 0.21)^{-1} = 0 \quad (139)$$

Admettant pour racine réelle la relation suivante:

$$h_{1\max}^* = 2(\text{Sh}^2 \alpha) (\Gamma + 0.21)^{-1} \quad (140)$$

avec:

$$\alpha = \text{argsh} [2(\Gamma + 0.21)^{-1}] \quad (141)$$

Ce sont donc les relations (140) et (141) qu'il faut considérer pour le calcul du débit maximum admissible compatible avec la présence d'un ressaut du type A.

Cette dernière remarque est par ailleurs justifiée en analysant les courbes représentées sur la figure 16.

Celle-ci montre en effet que les points expérimentaux ont tendance à se situer autour de la courbe en traitillés exprimant la relation (140).

La courbe en trait plein, exprimant la relation (76) issue du développement théorique, donne des valeurs de $h_{i \max}$ inférieures à celles calculées par (140) Ceci pour un même rapport $\Gamma = a / h_1$, et les valeurs du débits maximum admissible seraient alors plus élevées.

Les paramètres a et h_1 sont des éléments connus du problème et permettent par leur rapport, le calcul de $\Gamma = a / h_1$. L'élément inconnu du problème est le débit maximum admissible q_{\max} qui peut aisément se calculer en tenant compte des relations (60), (140) et (141): $q_{\max} = \sqrt{g h_1^{3/2} / h_1^{1/2}}$

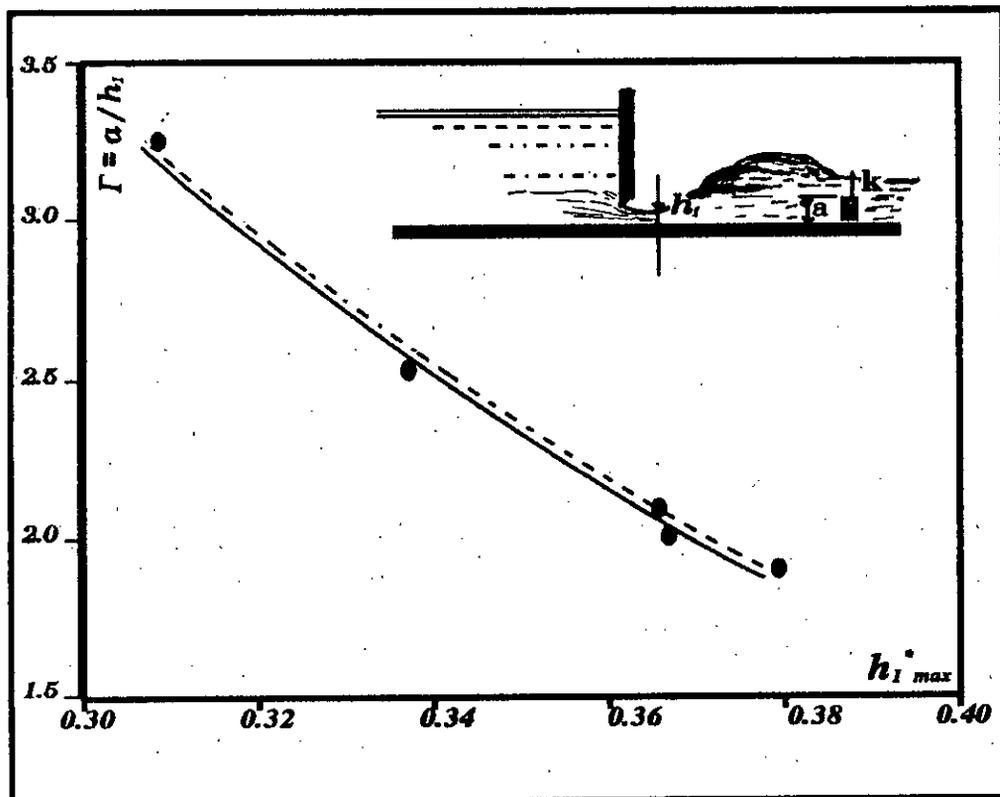


Figure 16 : Variation de Γ en fonction de h_1^{\max} .

(—) Courbe théorique tracée selon la relation: $h_1^{\max} = 2 \text{Sh}^2 \alpha / (\Gamma + 1/4)$

(---) Points expérimentaux. $\alpha = 1/3 \text{argsh} [2 (\Gamma + 1/4)^{1/2}]$.

(- · -) Courbe tracée selon la relation $h_1^{\max} = 2 \text{Sh}^2 \alpha / (\Gamma + 0.21)$
 $\alpha = 1/3 \text{argsh} [2 (\Gamma + 0.21)^{1/2}]$

Les valeurs expérimentales de toutes les caractéristiques du ressaut, parmi lesquelles celles des paramètres Γ et $h_{1\max}$ sont consignées dans le tableau 4.

Celui-ci a été dressé de la façon suivante:

- Les caractéristiques du ressaut h_1 et h_2 , le débit q et la hauteur a du seuil ont été mesurées.

- La profondeur critique K a été calculée en application de la relation $K = (q^2/g)^{1/3}$.

$$- h_1 = h_1/k.$$

$$- H_2 = h_2 + 1/2 h_2^3$$

$$- \Delta H = H_1 - H_2$$

$$- F_1 = (q^2/gh_1^3)^{1/2}$$

$$- h_2 = h_2/k.$$

$$- H_1 = h_1 + 1/2 h_1^3$$

Tableau 4: Regroupant toutes les caractéristiques du ressaut.

q (m ³ /s)	0.021	0.025	0.029	0.033	0.037	0.041	0.0423
h_1 (cm)	1.100	1.350	1.600	1.750	1.900	2.100	2.150
h_2 (cm)	8.500	9.050	9.600	10.400	11.200	11.750	12.000
K (cm)	3.555	3.994	4.410	4.806	5.187	5.554	5.671
$h_{1\max}$	0.309	0.338	0.363	0.364	0.366	0.378	0.379
h_2	2.391	2.266	2.177	2.164	2.159	2.155	2.116
H_1	5.545	4.714	4.157	4.137	4.098	3.877	3.481
H_2	2.478	2.363	2.282	2.270	2.266	2.262	2.227
ΔH	3.067	2.351	1.875	1.867	1.832	1.615	1.254
a (cm)	3.450	3.400	3.400	3.700	4.000	4.100	4.150
$\Gamma = a/h_1$	3.136	2.518	2.125	2.114	2.105	1.952	1.930
$Y = h_2/h_1$	7.727	6.700	6.000	5.943	5.894	5.595	5.581
F_1	5.811	5.088	4.575	4.550	4.510	4.301	4.284

III.2.4. DETERMINATION DE $h_{1\max}$ EN FONCTION DE Γ

Le ressaut du type A occasionne la plus grande perte de charge ΔH_{\max} lorsqu'il s'installe entièrement sur le radier à partie horizontale.

Nous avons vu en fait que cette position extrême du ressaut correspond au débit maximum admissible q_{\max} calculé dans III.2.3.

Si le débit q évacué par l'ouvrage dépasse la valeur q_{\max} , le ressaut se déplace vers l'aval laissant place à un écoulement torrentiel sur le radier et même au droit du seuil.

Pour ramener le ressaut à sa position initiale, deux possibilités peuvent être envisager:

- i. le déplacement vertical du seuil aval de bas en haut, sans modification du débit q .
- ii. La diminution du débit q par manipulation de la vanne située sur la conduite alimentant le bassin amont de l'ouvrage étudié, sans modification de la hauteur du seuil aval.

Les possibilités i et ii ont pour effet de retransformer l'écoulement torrentiel (après disparition du ressaut), à l'amont immédiat du seuil, en écoulement fluvial, ayant pour conséquence la réapparition progressive du ressaut.

Nous nous sommes intéressés expérimentalement à la possibilité ii car, du point de vue pratique, le débit q peut être contrôlé par manipulation d'une vanne (vanne de fond, vanne secteur, etc...) tandis que le seuil aval est installé dans l'ouvrage de manière définitive sans avoir la possibilité de modifier sa hauteur. Il est à noter cependant qu'à chaque débit maximum correspond une hauteur de seuil aval ainsi qu'une valeur du débit minimum.

Les valeurs expérimentales issues de la manipulation décrite en ii sont regroupées dans le tableau 5.

Tableau 5: Valeurs expérimentales des caractéristiques du ressaut du type A correspondant au débit minimum.

h_1 (cm)	2.200	2.350	3.000	4.000	4.500
a (cm)	2.650	3.150	4.800	7.250	8,550
Γ	1.204	1.340	1.600	1.812	1.900
q_{\max} (m ³ /s)	0.0247	0.0285	0.0420	0.067	0.081
K (cm)	3.950	4.320	5.714	7.828	8.893
$h_{1, \max}$ (cm)	0.557	0.544	0.525	0.511	0.506
q_{\min} (m ³ /s)	0.0347	0.0403	0.0637	0.1048	0.1284

L'installation dont nous avons disposée ne nous a pas permis de mesurer les valeurs de $h_{i\min}$ telles que $\Gamma > 2$. Les relations permettant le calcul de $h_{i\min}$ en fonction de Γ ne seront vérifiées que pour $1 < \Gamma \leq 2$. Le tableau 5 montre, en particulier, que pour les mêmes valeurs de la hauteur a du seuil aval ainsi que la hauteur initiale du ressaut, le débit q_{\min} est nettement inférieur au débit q_{\max} admissible.

Cela montre que si le débit évacué par l'ouvrage dépasse la valeur q_{\max} admissible, le ressaut ne peut réapparaître que pour un débit sensiblement inférieur à celui pour lequel il existait. Le radier à partie horizontale de l'ouvrage ne pourra plus jouer son rôle de dissipateur d'énergie.

La figure 17. montre que l'expérimentation confirme la théorie quant au calcul du paramètre $h_{i\min}$, du moins pour les valeurs de Γ tel que : $1 < \Gamma \leq 2$.

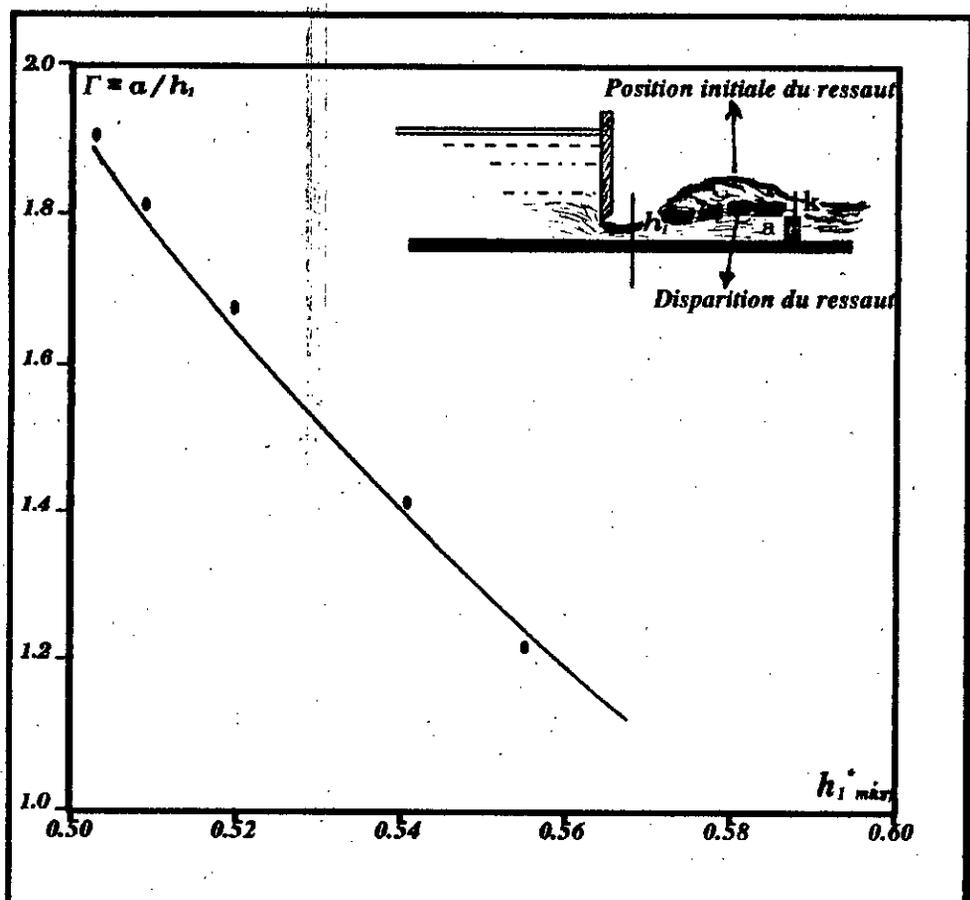


Figure 17: Variation de Γ en fonction de $h_{i\min}$
 (—) Courbe théorique tracée selon la relation:
 $h_{i\min} = \left[\cos\left[\frac{1}{3} \arccos(1 - (\Gamma - 1)^3) - 60^\circ\right] - \frac{1}{2} \right] (\Gamma - 1)$
 Valable pour $1 < \Gamma \leq 2$
 (.) Points expérimentaux.

III.3. CAS DE L'OUVRAGE CONSTITUE DE DEUX SEUILS SEPARES PAR UN RADIER.

Cette partie de l'étude est consacrée à l'analyse des caractéristiques d'un ressaut du type A prenant naissance à l'aval immédiat d'un seuil de hauteur a_1 . Pour permettre de positionner le ressaut sur le radier à partie horizontale, un second seuil de hauteur $a_2 < a_1$ est nécessaire. Celui-ci peut se déplacer dans le sens vertical et il est franchi en régime critique.

III.3.1. MESURE DES CARACTERISTIQUES DU RESSAUT.

Le ressaut provoqué est considéré comme étant classique, sa longueur serait donc égale à six fois la hauteur finale du ressaut. Le parement aval du seuil a_1 est tel que l'écoulement est en régime torrentiel et le seuil est franchi en régime critique.

Les caractéristiques de l'ouvrage ainsi que celles de l'écoulement sont mesurées, à savoir:

- a_1 hauteur du seuil amont fixée.
- a_2 hauteur du seuil aval.
- h_1 hauteur initiale du ressaut.
- h_2 hauteur finale du ressaut.
- ΔH perte de charge due au ressaut rapportée à la profondeur critique.
- q débit unitaire évacué par l'ouvrage.

Les valeurs expérimentales de ces caractéristiques sont regroupées dans le ci-après .

Tableau 6 : Valeurs expérimentales des caractéristiques du ressaut dans le cas d'un ouvrage constitué de deux seuils de hauteur a_1 et a_2 , tels que $\Phi = 1 - a_2/a_1$.
 Le canal est de profil rectangulaire de largeur $b = 7.5$ cm.
 La hauteur du premier seuil est fixe $a_1 = 13.5$ cm.
 Le débit maximum est de 193 l/mn
 Le nombre de Froude amont Φ_1 est tel que:
 $4.30 \leq \Phi_1 \leq 5.535$

q (m ² /s)	0.0425	0.040	0.038	0.035	0.031	0.027	0.020
h_1 (cm)	2.150	2.050	1.950	1.800	1.600	1.420	1.100
h_2 (cm)	12.050	1.600	11.300	10.900	10.300	9.550	8.050
K (cm)	5.590	5.460	5.280	5.000	4.610	4.200	3.440
$h_{1\max}$	0.378	0.375	0.369	0.360	0.349	0.338	0.319
h_2'	2.118	2.124	2.140	2.180	2.234	2.270	2.348
H_1'	3.877	3.930	4.041	4.218	4.454	4.714	2.438
H_2'	2.229	2.235	2.249	2.285	2.334	2.367	2.438
ΔH	1.648	1.695	1.792	1.933	2.120	2.347	2.886
a_2 (cm)	4.150	4.000	3.950	3.900	3.850	3.650	3.250
Φ	0.692	0.703	0.707	0.711	0.715	0.729	0.759

Le tableau précédent a été dressé de la manière suivante:

*Les différents débits unitaires q , h_1 , h_2 et a_2 ont été évalués expérimentalement.
 *La profondeur critique K a été calculée en application de la relation suivante:

$$K = (q^2 / 9.81)^{1/3}$$

$$h_{1\max} = h_1 / K$$

$$h_2' = h_2 / K$$

$$H_1' = h_1 + (2h_1'^2)^{1/2}$$

$$H_2' = h_2 + (2h_2'^2)^{1/2}$$

$$\Phi = 1 - a_2 / a_1$$

$$\Delta H = H_1' - H_2'$$

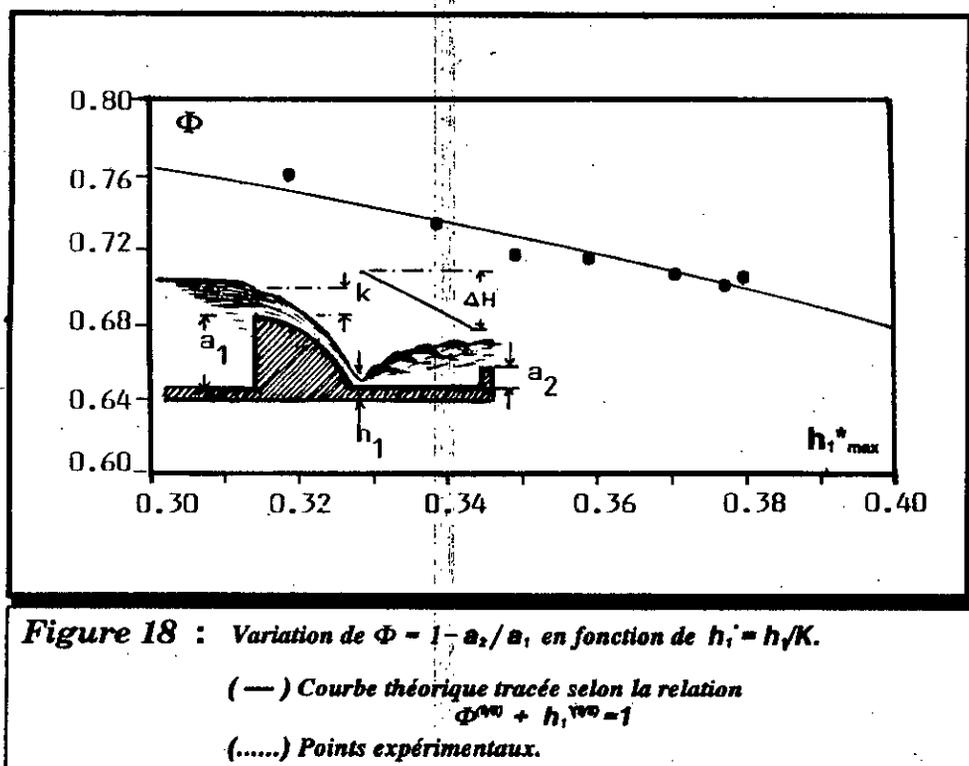
III.3.2. VERIFICATION EXPERIMENTALE DE Φ EN FONCTION DE $h_{1\max}$

Le développement théorique effectué sur l'ouvrage a abouti à l'importante conclusion suivante: l'introduction du seuil amont de hauteur a_1 permet le calcul du débit maximum admissible sans avoir recours à la mesure de la hauteur initiale h_1 du ressaut. Ce débit n'est fonction, en effet, que des caractéristiques géométriques a_1 et a_2 des seuils constituant l'ouvrage.

$$\begin{aligned}\Phi &= 1 - a_2 / a_1 \\ (h_{1 \max}^*)^{3/2} + \Phi^{3/2} &= 1 \\ q_{\max} &= \sqrt{g [(a_1 - a_2) / \Delta H^*_{\max}]^{3/2}} \\ \Delta H^*_{\max} &= f(h_{1 \max}^*)\end{aligned}\quad (142)$$

La présente partie de l'étude expérimentale vise à confirmer la validité de la relation (118).

Pour cela, le tableau 6 a permis le tracé de la courbe de fonction $\Phi = f(h_{1 \max}^*)$ représentée sur la figure 18.



La figure 18 montre une bonne concordance entre la courbe théorique et les valeurs expérimentales. L'écart maximum observé ne dépasse guère 1.1% et concerne le couple de valeurs $(h_{1 \max}^*, \Phi) = (0.349, 0.715)$.

III.3.3. DETERMINATION EXPERIMENTALE DE LA PERTE DE CHARGE ΔH EN FONCTION DES CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DE L'OUVRAGE

Nous avons montré, au chapitre II, que la perte de charge ΔH due au ressaut était égale à la différence des hauteurs des seuils a_1 et a_2 de l'ouvrage:

$$\Delta H = a_1 - a_2$$

Cette égalité résulte de deux conditions:

- Les seuils a_1 et a_2 sont franchis en régime critique.
- La perte de charge autre que celle due au ressaut est négligeable.

Nous avons transformé l'égalité (95) en termes adimensionnels en divisant ses deux membres par la hauteur a_1 du seuil amont de l'ouvrage.

$$\Delta H/a_1 = (a_1 - a_2)/a_1 = 1 - a_2/a_1$$

Soit :

$$\Delta H/a_1 = \Phi.$$

Le tableau 7 regroupe les valeurs expérimentales des paramètres

$$\Delta H/a_1 \text{ et } \Phi.$$

La droite en trait plein de la figure 18 représente en fait la première bissectrice correspondant à l'égalité $\Delta H/a_1 = \Phi$. Nous pouvons remarquer que les points expérimentaux se répartissent autour de celle-ci et que l'écart maximum observé ne dépasse guère 2.6% correspondant au couple de valeur $(\Delta H/a_1, \Phi) = (0.685, 0.703)$.

Ceci montre clairement que les valeurs expérimentales obtenues admettent la loi linéaire $\Delta H/a_1 = \Phi$ et par voie de conséquence

$$\Delta H = a_1 - a_2.$$

Tableau 7: Valeurs expérimentales des paramètres sans dimension $\Delta H/a_1$ et $\Phi = 1 - a_2/a_1$ dans le cas d'un ressaut en canal rectangulaire muni de deux seuils de hauteurs a_1 et a_2 .

$\Delta H/a_1$	0.682	0.685	0.700	0.716	0.724	0.730	0.735
Φ	0.692	0.703	0.707	0.711	0.715	0.729	0.759

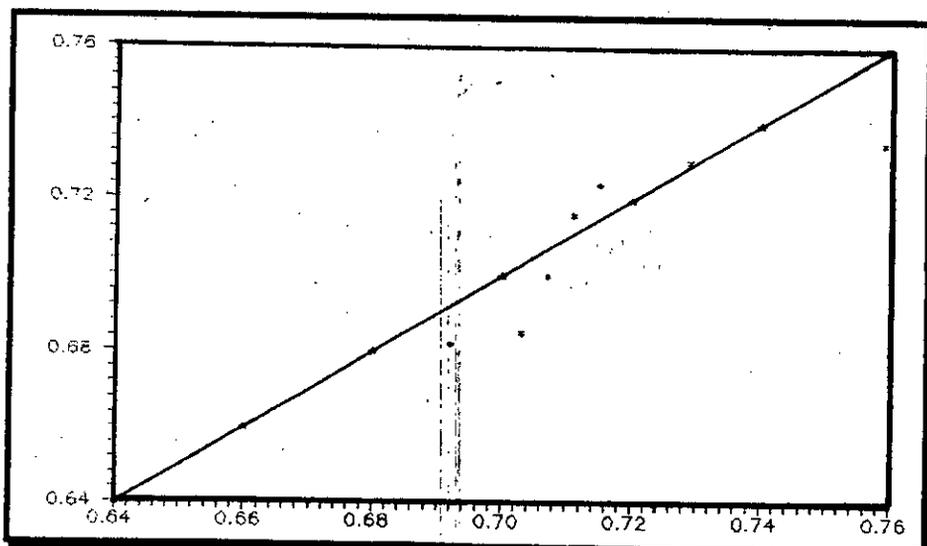


Figure 19: Variation de $\Delta H/a_1$ en fonction de Φ .
 (—) Courbe théorique: $\Delta H/a_1 = \Phi$ soit $\Delta H = a_1 - a_2$
 (...) Points expérimentaux.

III.4. CONCLUSION

Dans le cas de la vanne de fond suivie d'un seuil, les essais nous ont permis d'ajuster la relation théorique permettant le calcul du débit maximum admissible en attribuant à la fonction $Y(h_{1,max})$ la valeur de 0.29.

L'expérimentation menée par des débits croissants et décroissants a montré que le ressaut, après avoir quitté le radier à partie horizontale de l'ouvrage, ne pouvait réapparaître que pour des débits nettement inférieurs à ceux pour lesquels il existait.

De plus, le calcul des débits maximum et minimum, compatibles avec la présence du ressaut, peut s'effectuer de manière explicite avec des écarts maximum tout à fait acceptables.

Dans le cas de l'ouvrage constitué de deux seuils séparés par un radier horizontal, les essais effectués ont permis de conclure à la fiabilité des relations théoriques que nous avons proposées pour le calcul des débits maximum et minimum sous les conditions suivantes:

- Les seuils sont franchi en régime critique.
- La perte de charge autre que celle dues au ressaut est effectivement négligeable.

L'expérimentation a enfin montré que les caractéristiques du ressaut ainsi que les débits maximum et minimum, compatibles avec la présence de celui-ci, pouvaient être déterminés d'une manière analytique avec des écarts ne dépassant guère 2 à 3 %.



CONCLUSION

Conclusion générale

La présente étude a eu pour but d'établir des relations analytiques simples et explicites permettant le calcul des débits maximum et minimum compatibles avec la présence d'un ressaut sur le radier du bassin de dissipation d'énergie.

Deux types d'ouvrages couramment utilisés dans la pratique de l'ingénieur hydraulicien ont été considérés:

- 1- La vanne de fond suivie d'un seuil de hauteur a qui peut se rencontrer dans les ouvrages de régulations ou d'irrigation.*
- 2- l'ouvrage constitué de deux seuils de hauteurs a_1 et a_2 séparés par un radier à partie horizontale.*

Ce type de structure peut être utilisé pour les mesures de débit dans les canaux ouverts et moyennant un ressaut (jaugeurs à ressaut) ou peut constitué lui-même le type classique de barrage déversoir lorsque la hauteur a_1 est très supérieure à la hauteur a_2 .

Pour atteindre l'objet visé par l'étude, nous nous sommes intéressés à trois grandes parties:

-Une première partie bibliographique regroupant des travaux plus ou moins récents traitant le thème que nous avons choisi.

L'étude bibliographique a montré l'importance accordée, jusqu'à l'heure actuelle, au phénomène du ressaut en tant que dissipateur d'énergie dans les canaux ouverts notamment dans le canal de section droite rectangulaire muni d'un seuil.

La répartition des vitesses ainsi que de la masse volumique à l'intérieur de la masse liquide constituant le ressaut font également l'objet de nombreuses recherches.

Le travail que nous avons entrepris s'est basé essentiellement sur l'étude de Forster et Skrinde [14] et rapportée par Chow [1], pour ce qui concerne la vanne de fond et sur les études beaucoup plus récentes de Hager et Sinniger [5, Hager et Bretz [6].

Les travaux effectués par G. Lapray ont également intéressés notre étude pour ce qui concerne notamment l'ouvrage constitué de deux seuils séparés par un radier horizontal. La méthode graphique proposée par l'auteur et qui demeurerait au stade théorique est ainsi remplacée par une solution analytique simple dont la validité est confirmée par l'expérimentation au laboratoire.

Il est à noter, que s'il existe de nombreux travaux examinant le ressaut, classique et forcé, sous l'angle de son évolution et de son comportement, il n'existe pratiquement pas ou si non peu de travaux qui traitent le rôle du ressaut dans le dimensionnement des structures hydrauliques.

Exception faite des travaux de Forster et Skrinde qui élaborent un graphe pour le dimensionnement du seuil à l'aval du ressaut, encore utilisé à l'heure actuelle.

Mais ces travaux se sont basés sur une hypothèse simplificatrice, à savoir que la répartition des pressions à l'aval du ressaut est hydrostatique.

La seconde partie de notre travail est consacrée aux développements théoriques, avec le maximum de rigueur, visant à établir des relations simples permettant le calcul des caractéristiques du ressaut et des débits maximum et minimum admissibles.

Certaines relations obtenues se sont avérées fortement implicites, ce qui nous a amené à les substituer par des formules approchées simples admettant des erreurs acceptables de l'ordre de 2 à 3 %.

Nous avons montré par ailleurs, que le débit maximum admissible, dans le cas de l'ouvrage constitué de deux seuils, est indépendant de la hauteur initiale du ressaut. Ce débit ne dépend en effet que des caractéristiques géométriques a_1 et a_2 des seuils.

Ce résultat peut mener à la conception d'un nouveau type de jaugeur à ressaut dont la caractéristique principale serait la modularité.

De plus, une relation simple est proposée pour le calcul de la perte de charge ΔH due au ressaut sans pour autant calculer les charges initiale et finale de celui-ci. En effet, ΔH peut être évaluée par la différence des hauteurs des seuils amont et aval.

L'introduction du seuil amont de hauteur a_1 a permis de former le paramètre adimensionnel Φ , étroitement lié à la perte de charge ΔH et à la hauteur relative initiale du ressaut.

Enfin, la troisième partie du travail regroupe les résultats issus des essais effectués au laboratoire; L'objectif étant la vérification des relations théoriques proposées dans la seconde partie.

L'analyse des résultats nous a permis de conclure à la validité des relations issues du développement théorique, notamment celle menant au calcul du débit maximum admissible pour l'ouvrage constitué de deux seuils, ainsi que celle du débit minimum admissible pour le cas de la vanne de fond. Par contre, il a été nécessaire de procéder au réajustement de la relation théorique exprimant le paramètre $h_{1 \max}$ en fonction de Γ , en ce qui concerne la vanne de fond.



BIBLIOGRAPHIE

- [1] Chow, Ven, Te, "Open channel Hydraulics"
Mc Graw-Hill, New-York, 1973, 394.
- [2] 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.
- [3] Hager, W.H., Wanoschek, R., "Hydraulic jump in triangular channel"
Journal of Hydraulic research., Vol.25, 1987, 5, 49-564;
Vol.26, 1988, 4, 494-496; Vol.27, 1989, 1, 186-188.
- [4] Rajaratnam, N., "The forced hydraulic jump"
Water power, 1964, January 14-19, February 61-65.
- [5] Hager, W. H., Sinniger, R. " Flow characteristics of the hydraulic jump in a stilling basin with an abrupt bottom rise"
Journal of Hydraulic research. Vol. 23, 1985, 101-113;
Vol. 24, 1986, 207-215.
- [6] Hager, W. H., Bretz, N. V., "Hydraulic jump at positive and negative steps"
Journal of Hydraulic research. Vol. 24, 1986, 237-253.
- [7] Bretz, N. V., "Ressaut hydraulic forcé par seuil"
L.C.H, E.P.F.L, Communication 2, 1988, 9-42.
- [8] Hager, W.H., Bremen, R. Kawagoshi, N., "Classical hydraulic jump; lenght of roller"
Journal de recherches hydrauliques, Vol.28, N° 5, 1990 pp. 591-608.
- [9] Shukry, A.,(1957), "The efficiency of floor under drowned hydraulic jump"
Proc.ASCE, Journal of hydraulic division, Vol.83, HY3, Paper No.1260, pp.1-18; Vol.83, HY5, Paper No.1417, p.31; Vol.83, HY6, Paper N°.1456, pp.15-24; Vol.84, 1958, pp.33-37;
Vol. 84,1958, HY5, Paper No.1832, pp. 35-38.
- [10] 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.
- [11] Kennison, K.R., "The hydraulic jump in open channel flow at high velocity"
Trans. ASCE, Vol. 42, 1916, 338-420.
- [12] Safranez, K., "Wechsels prung und die Energievernichtung deswassers"
Der Bainingenieur, Helf 49, 1927, 898-905.

- [13] Bakhmeteff, B.A., Matzke, A.E., "the hydraulic jump in terms of dynamic similarity"
Trans. ASCE, Vol. 101, 1936, 630-680.
- [14] Forester, J.W., Skrinde, R.A., "Control of the hydraulic jump by sills"
Trans. ASCE, Vol. 115, 1950, 973-1022.
- [15] Wanoschek, R., Hager, W.H., "Hydraulic jump in trapezoidal channel"
Journal de recherches hydrauliques, Vol.27, 1989, Nr.3, 429-446.
- [16] Lapray, G., "Théorie de la longueur fluidodynamique"
Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 1974.
- [17] Hager, W.H., Li, Damei, "Dissipateur d'énergie contrôlé par seuil"
Journal de recherches hydrauliques, Vol.30, 1992, 165-181.
- [18] Heggen, R.J., "choke angle in supercritical contractions"
Journal of hydraulic Engineering; 114 (4) ; 1988.
- [19] Kansoh, R.M., "blocking depth variation in open channel due to bstacles"
24 th IAHR congress, Madrid. Spain; 1991.
- [20] Hager, W.H., Mazumder, S.K., "flow choking in an expanding bucket"
Water Power and dam construction, April 1993.

