République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Université Abderrahmane MIRA de Bejaia





Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par :

Melle NAIT CHERIF Klilia

M^r BRAHIMI Mohammed Islem

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en Hydraulique

Option : Ouvrages et aménagements hydrauliques

INTITULE :

ETUDE EXPERIMENTALE ET THEORIQUE D'EVACUATEUR DE CRUE EN SAUT DE SKI

Soutenu le 08/10 /2020 devant le jury composé de :

- Président : M^r BEDJOU.A
- Promoteur (s) : M^r BRAKENI.A

M^r AMARA.L

- Examinateur : M^r HAMMOUCHE.A

Année universitaire : 2019/2020



*A*u terme de cette étude, nous tenons à exprimer nos vifs remerciements envers :

*P*remier lieu, le bon dieu pour nous avoir accordé la santé, la paix, le courage, et la patience pour mener ce travail à terme.

Nos chères familles pour leurs aides morale et financière.

Nos promoteur s: Monsieur BRAKENI A et Monsieur AMARA. L pour nous avoir proposé cet intéressant thème, orienté et n'ont cessé de consulter notre travail et nous ont aidé à sa réalisation.

Tout le corps professoral et personnel du département d'Hydraulique qui ont contribué à notre formation.

Aux membres de jury qui ont accepté d'examiner notre travail et dont on espère qu'ils trouveront en ce travail une satisfaction.

Nous remercions aussi les amis pour leurs aides.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance en témoignage de ma profonde affection à :

Ma chère mère Zakia qui m'a protégé pendant toute ma vie, et qui a fait tout pour que je devienne ce que je suis.

Mon père Mouhand qui m'a tant aidé et encouragé.

Mon frère (Moumouh) et mes sœurs (Sylia, Lydia, Khadidja).

Mes nièces : Lina, Wassim, Mélissa.

Ma tante Malika et Mon oncle Madjid.

Mon cousin Hamza et ma cousine Dihia.

A mes cheres copines et sœurs Samira, kahina, Cylia, Ouardia et Sabrina

Mon cher fiancé Karim

Mon cher ami Boudiaf

Ma collègue d'étude Sara.

A mon binôme Islam.

Toute personne qui a contribué de près ou de loin à ma réussite.

KLILIA

Dédicace

A mes parents,

Quoi que je fasse ou quoi que je dise, je ne saurai point vous remercier comme il se doit. Votre affection me couvre, votre bienveillance me guide et votre présence m'a toujours été source de force. En témoignage, je vous offre ce modeste travail pour vous remercier pour tout ce vous avez fait pour moi.

A mes deux sœurs,

Khadidja et Layla; en signe d'amour et reconnaissance et gratitude pour tous les encouragements que vous avez fait pour moi et votre présence à mes côtés.

A ma très chère Karima, ton soutien a toujours été ma source de force, courage et motivation.

A ma binôme Klilia, c'était toujours un plaisir de travailler avec toi.

A mes chers amis, Badia, Housseyen, Rahma, Amira, Yahia, Oussama, Samira, Cylia, Khaled, Mahdi, Abdssamed, Ahcen, Djalil et Khayrat, Adlene, viper; je vous remercie pour votre aide et encouragement.

A tous mes amis, toute ma famille et toute personne qui a participé de près ou de loin à l'accomplissement de ce mémoire, qu'ils soient sincèrement remerciés.

Islam

LISTE DES FIGURES

| Figure I.1: Evacuateur latéral (Barrage Hamam Boughrara) |
|--|
| Figure I.2: Evacuateur frontal |
| Figure I.3: Evacuateur porté par le barrage Grison |
| Figure I.4: Evacuateur porté implanté sur les rives du barrage |
| Figure I.5: Essais sur modèle réduit, évacuateur du barrage Ostour $Q = 12\ 000\ m^3/s$ 6 |
| Figure I.6: Evacuateur porté du barrage Beni-Haroun (Algérie)7 |
| Figure I.7: Evacuateur en puits7 |
| Figure I.8: Evacuateur en siphon |
| Figure I.9: Evacuateur en puits circulaire9 |
| Figure I.10: Evacuateur en puits marguerite9 |
| Figure I.11: Siphon d'essai, vraie grandeur du Barrage Ferggoug (Algérie)10 |
| Figure I.12: Dessin schématique d'un barrage mobile11 |
| Figure I.13: Barrage Bou-Hanifia à déversoir de superficie à seuil mobile12 |
| Figure I.14: Vue en coupe d'une hausse fusible principale équipée d'un puits d'admission barrage Quipolly (Australie) |
| Figure I.15: Essai sur modèle réduit au laboratoire (hausses fusible) D'Artelia Environnement |
| Figure I.16: Evacuateur à faible charge14 |
| Figure I.17: Evacuateur « bec de canard » du barrage de Lumbilia (Burkina Faso)14 |
| Figure I.18: barrage de saut de ski de Marége, Corrèze, France16 |
| Figure I.19: dispositions typiques d'un saut de ski combiné avec un barrage à contrefort UTs |
| Figure I.20: types d'écoulement :a) auge noyée, b) auge dénoyée |
| Figure I.21: Suppression relative ΔP au fond de l'auge en fonction de $C = h/R$, comparaison entre (-) la courbe de Lauffer (1936) et () l'équation (9) |

| Figure I.22: a) Notation pour l'écoulement sur l'auge d'un saut de ski. b) (–) profil de surface |
|--|
| et () répartition du coefficient de pression de fond $Cp = \Delta p f / (\rho g H_o)$ pour l'exemple 1 avec |
| $X = \bar{x} / R ; T = \bar{t} / R.$ |
| Figure I.23: Définition pour léecoulement à travers un saut de ski à écoulement plan23 |
| Figure I.24: caractéristiques de la pression sur l'auge :a) rapport l'observation et la valeur théorique pour la hauteur de pression maximale en fonction de (h_o/R) (40°/ β) section $x_{PM}/[(R * sin \beta)/(\beta/1.5^{\circ})]^{1/5}$ en fonction de F _o ,c) répartition longitudinale de la hauteur de pression et d) schéma de définition |
| Figure I.25: Géométries de jets issues d'un saut de ski avec R=0.10m, $\beta = 40^{\circ}$, h _o =0.05m et F _o =a)3,b) 4,c)5,d) 7,e)1026 |
| Figure I.26: effet du rayon de l'auge sur les trajectoires du jet pour β =40°,h _o =0.05 m et R=a)0.10 m, b)0.40 m |
| Figure I.27: Formation du ressaut du type Q_{-} pour $\beta = 40^{\circ}$ et R=0.40 m |
| Figure I.29: réparation locale du débit (-) courbe de débit par unité de surface identique, () endroit calculé par l'équation (26) |
| Figure II.1: le banc d'essai H12 MH2 |
| Figure II.2 Pompe |
| Figure II.3: Dispositif expérimental |
| Figure II.4: composants de déversoir |
| Figure II.5: phases de mesure :a)position d'attente sans poids ;b) début de chronométrage) fin de chronométrage; d) position finale avec poids |
| Figure II.6: Information de poids et bras de levier |
| Figure II.7: Chronomètre |
| Figure II.8: Mesure de la hauteur avec (Plot Digitizer) ; Q1=7.11 * $10^{-5}(m^3/s)$ |
| Figure II.9: Mesure de la hauteur du jet avec (plot Digitizer) ; $Q2=22.5*10^{-5} (m^{3}/s)46$ |
| Figure II.10: Mesure de la hauteur avec (Plot Digitizer) ; $Q_3 = 34* 10^{-5} (m^3/s)$ |
| Figure II.11: Mesure de la hauteur avec (Plot Digitizer) ; Q4= 56* 10-5 (m3/s)49 |
| Figure II.12: Mesure de la hauteur avec (Plot Digitizer) ; $Q_5 = 11.1 \times 10^{-5} (m^3/s)$ |
| Figure II.13: Comparaison de la hauteur du jet pour Q150 |
| Figure II.14: Comparaison de la hauteur du jet pour Q252 |

| Figure II.15 : Comparaison de la hauteur du jet pour Q3 | . 51 |
|---|------|
| Figure II.16: Comparaison de la hauteur du jet pour Q4 | . 52 |
| Figure II.17: Comparaison de la hauteur du jet pour Q5 | . 52 |
| Figure II.18: les ondes de choc | . 54 |

LISTE DES TABLEAUX

| Tableau II.1: Débits des essais expérimentaux | . 42 |
|--|------|
| Tableau II.2: la hauteur expérimentale de chaque débit | . 42 |
| Tableau II.3: la hauteur analytique de chaque débit | .43 |
| Tableau II.4: La hauteur du jet pour Q1 | . 45 |
| Tableau II.5: La hauteur du jet pour Q2 | .47 |
| Tableau II.6 : La hauteur du jet pour Q3 | . 47 |
| Tableau II.7: La hauteur du jet pour Q4 | . 48 |
| Tableau II.8: La hauteur du jet pour Q5 | . 49 |
| Tableau II.9: Comparaison des résultats expérimentaux et analytiques | . 50 |

LISTE DES SYMBOLES

- : débit décroissant
- + : débit croissant
- b : largeur de canal
- C : coefficient
- D : dissipation d'énergie
- E : énergie
- F : force de pression
- F₀ : nombre de Froude
- g : accélération gravitationnelle
- h : profondeur d'écoulement
- H : hydraulique (charge)
- h_m : maximum de la trajectoire de jet inferieure
- h_M : maximum de trajectoire de jet supérieure
- h_p: pression dynamique
- h_{pm}: hauteur de pression dynamique maximal mesurée
- h_s: hauteur de vague de stock
- ho : lame d'eau
- J : jet
- L : la langueur de canal
- m : masse volumique
- n : nombre de teste
- o : flux d'approche
- O : trajectoire du jet ascendant
- P : rapport de pression
- P :h_P/h_{PM} : pression dynamique relative

Q : débit

- Q_D: Débit dimensionnement
- R : rayon du godet
- s : hauteur de chute
- S : s/ho hauteur de chute relative
- t : temps
- t_u: profondeur du flux de recirculation
- u : sous le jet d'eau
- U : trajectoire inferieur du jet
- v : vitesse d'écoulement
- w : hauteur du godet
- W:w/ho

X: $(2x/ho) \times 1 / [Fo^2 \sin (2\alpha)]$ coordonnée normalisée dans le sens du flux

X_{PM}: x/x_pemplacement établi de la pression dynamique mesurée maximale

- Z₁ : la hauteur de déversoir Creager
- Z₂ : hauteur de saut ski
- α : angle de départ
- Q_m: Débit massique
- Q_V: Débit volumique
- g : l'accélération de la pesanteur

Liste des abréviations

BCR : Béton Compacté en Rouleau

BCV : Béton Conventionnel Vibré

SOMMAIRE

| LISTE DES FIGURES | |
|---|----|
| LISTE DES TABLEAUX | |
| LISTE DES SYMBOLES | |
| INTRODUCTION GENERALE | 1 |
| Partie I: Partie bibliographique | |
| I.1 Introduction | 3 |
| I.2 Type d'évacuateurs | 3 |
| I.2.1 Evacuateur de surface | |
| I.2.1.1 Evacuateur latéral | 4 |
| I.2.1.2 Evacuateur frontal | 4 |
| I.2.1.3 Evacuateurs portés par les barrages | 5 |
| I.2.2 Evacuateur en charge | 7 |
| I.2.2.1 Evacuateur en puits | |
| I.2.2.2 Evacuateur en siphon | 9 |
| I.2.3 Evacuateur de Superficie à seuil mobile | |
| I.2.4 Evacuateur vannées | 11 |
| I.2.5 Evacuateur de crue à hausses fusibles | |
| I.2.6 Evacuateur à faible charge | 14 |
| I.2.7 Dissipateurs en saut de ski | 15 |
| I.2.7.1 Le saut de ski | 15 |
| I.2.7.2 Description | |
| I.2.7.3 Types d'écoulement | |
| I.2.7.4 Caractéristique de l'écoulement sur l'auge | |
| I.2.7.5 Trajectoire du jet | |
| I.3 Conclusion | |
| Partie II: Partie expérimentale et discussion des résultats | |
| II.1. Dispositif expérimental | |
| II.2. Objectif de l'expérience | |
| II.3. Description de banc d'essai H12 MH2 | |
| II.3.1. Caractéristiques du canal | |
| II.3.2. Dimension du canal | |

| II.3. | .3. | Capacité du réservoir de pesée | |
|--------|------|--|----|
| II.3. | .4. | Caractéristique de la pompe | |
| II.3. | .5. | Expériences applicables sur le bac hydraulique : | |
| II.4. | Dév | ersoir de Creager | |
| II.4. | .1. | Saut de ski | |
| II.5. | Prot | tocole expérimental | |
| II.5. | .1. | Mesure du temps | |
| II.5. | .2. | Mesure de hauteur | 41 |
| II.6. | Sou | rces d'incertitude | 41 |
| II.7. | Rés | ultats obtenus | 41 |
| II.7. | .1. | Résultats expérimentaux | 41 |
| II.7. | .1. | Calcul analytique | |
| II.8. | Con | nparaison et discussions des résultats (expérimentaux / analytiques) | |
| II.8. | .1. | Comparaison des résultats | |
| II.9. | Inte | rprétation des résultats | 53 |
| II.10. | С | Conclusion | 54 |
| CONC | CLUS | SION GENERALE | 54 |
| BIBL | IOGI | RAPHIE | 54 |
| ANNI | EXES | S | |

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie hydraulique est l'énergie fournie par le mouvement d'eau, sous toutes ses formes : chute d'eau, cours d'eau, courants marin, marré, vagues. Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple pour un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.

L'énergie hydraulique est en fait une énergie cinétique liée au déplacement de l'eau comme dans les courants marins, les cours d'eau, les marées, les vagues ou l'utilisation d'une énergie potentielle comme dans le cas des chutes d'eau et des barrages.

L'eau cette ressource vitale et indispensable à la vie de l'homme et être vivants est enjeu majeur du développement durable.

Selon Leonard Devinci : « l'eau est la force motrice de la nature ». Elle est disponible en quantités strictement fixes, dictées par les lois de conservation et le cycle de l'eau. Son indispensabilité et sa rareté maintienne des populations entières dans des trappes a pauvreté, et alimentent des conflits politiques qui peuvent aller éventuellement jusqu'au conflit armé. L'utilisation de l'eau durable et optimale a été l'effort des planificateurs partout dons le monde et ceci pour répondre aux demandes croissantes multiples de l'eau et avoir une bonne utilisation de cette ressource.

Ces derniers temps, plusieurs stratégies et études effectives par des chercheurs hydrauliciens visent à atteindre une bonne utilisation et disponibilité de l'eau et chercher d'énergies renouvelables en pleine croissance.

La construction d'un barrage et la création d'une retenue sont les majeurs moyens pour atteindre ces objectifs. Un barrage peut aussi avoir d'autres usages tels que l'irrigation ou l'écrêtage de crues.

Des évacuateurs de crue et des dissipateurs d'énergie sont associés à ces barrages pour évacuer le trop plein d'eau et réduire son énergie à l'aval.

Les chercheurs scientifiques se sont intéressés aux différents types d'ouvrages et effectuent plusieurs recherches et études sur les écoulements à travers les déversoirs pour définir les différentes particularités, avantages et inconvénients.

1

Le « saut de ski » qui a été imaginé par André Coyne pour des barrages se trouvant dans des allies très étroites et dans lesquelles il n'était pas possible de construire l'évacuateur de crue et la centrale hydroélectrique cote a cote.

Dans ce contexte, notre pèsent travail a donc pour but d'effectuer une étude approfondie sur le dissipateur d'énergie à travers l'évacuateur en saut de ski. La démarche scientifique adoptée dans cette étude conduit à une répartition de ce manuscrit en deux parties.

La première partie est consacrée pour une synthèse bibliographique déterminant les différents types des évacuateurs de crue utilisés dans la construction des barrages.

Le deuxième chapitre traite la préparation du modèle expérimental et la description des essais effectués sur modèle physique au niveau du Laboratoire d'Hydraulique de l'Université de Bejaia.

On rassemble dans le troisième chapitre les résultats et comparaison de la solution analytique développée de ce travail. L'interprétation et analyses des divers résultats sont également présentés.

Enfin, une conclusion générale, qui résume les principaux résultats obtenus, est donnée à la fin de notre mémoire.

Partie I

Partie bibliographique

I.1 Introduction

Les déversoirs ou évacuateurs de crues sont des ouvrages les plus importants du barrage, permettent à la retenue de ne pas atteindre une hauteur d'eau critique et d'éviter les submersions lors d'une crue. Sa fonction est donc d'évacuer l'eau retenue derrière un vannage ou barrage fixé dont la hauteur excédentaire une certaine limite.

Le déversoir est un ouvrage place généralement perpendiculairement à l'écoulement dans un canal le liquide (eau) s'écoule en formant à l'aval de cet ouvrage une veine libre.

L'écoulement dans un déversoir doit toujours se faire à surface libre à fin qu'un éventuel dépassement du débit théorique de l'évacuateur n'entraîne pas un débordement par-dessus de barrage.

Le choix du type l'évacuateur de crus est complexe il dépend de critères interactifs multiples : géologie, topographie, débit de crue à évacuer, contraintes d'exploitation, économie et paramètres sécuritaire.

Les Evacuateurs en peuvent être groupés en deux principaux types : les évacuateurs de surface et les évacuateurs en charge.

I.2 Type d'évacuateurs

I.2.1 Evacuateur de surface (Labiod, H.2015)

Il s'agit du type le plus communément utilisé et aussi le plus fiable. L'évacuateur de surface débute par un seuil. Ce seuil dans un chenal à faible pente qui amène l'eau à l'aval de la digue. L'eau emprunte ensuite le coursier dont la ponte permet de rattraper la déférence de cote entre le niveau de la retenue et celui de l'oued à l'aval. Le coursier aboutit soit directement dans l'oued (différence de cote faible), soit dans un bassin d'amortissement (cas de forte pente).

L'évacuateur de surface est placé soit : latéralement à l'axe du barrage sur une rive, ou parallèlement à l'axe du barrage.

I.2.1.1 Evacuateur latéral

Le déversoir du type latéral est adopté dans le cas où la pente du versant est faible. Ce type d'ouvrage repose directement sur le sol pas soumis à des tassements sous l'effet du massif du barrage (figure I .1).

L'écoulement dans le coursier est parallèle au seuil (latéralement à l'axe du barrage sur une suite le coursier dont la pente permet de rattraper la différence de rive) [1].



Figure I.1: Evacuateur latéral (Barrage Hamam Boughrara)

Si la pente du versant est forte, un déversoir latéral conduit à des déblais important et un déversoir frontal est alors préférable. Ce type de déversoir est également utilisé dans le cas de débit évacué très important conduisant à une longueur du seuil très important.

I.2.1.2 Evacuateur frontal

Le déversoir de type frontal est adopté par des pentes du versant fortes. L'écoulement dans le coursier est perpendiculaire au seuil (figure I.2) [1].



Figure I.2: Evacuateur frontal

I.2.1.3 Evacuateurs portés par les barrages

Pour les barrages poids BCV ou BCR et à moindre degré, les évacuateurs peuvent être incorporés au niveau du corps du barrage, on parle alors d'évacuateurs portés. Ces derniers s'adaptent convenablement aux barrages poids. Néanmoins pour les barrages voûtes, l'incorporation est plus ou moins difficile et posé souvent des contraintes d'ordre technique ou économique [1].



Figure I.3: Evacuateur porté par le barrage Grison



Figure I.4: Evacuateur porté implanté sur les rives du barrage



Figure I.5: Essais sur modèle réduit, évacuateur du barrage Ostour $Q = 12\ 000\ m^{3/s}$



Figure I.6: Evacuateur porté du barrage Beni-Haroun (Algérie)

I.2.2 Evacuateur en charge

Ils peuvent être du type puits ou type siphon (Carler, H., 1980) (figure I.7 et I.8)



Figure I.7: Evacuateur en puits



Figure I.8: Evacuateur en siphon

I.2.2.1 Evacuateur en puits

L'évacuateur en puits est un ouvrage en béton de forme circulaire (difficultés d'implantation sur corps du barrage ou rives, difficultés techniques ou financières). Il évacue l'eau par chute verticale dans la conduite enterrée débouchant à l'aval de la digue dans un bassin de dissipation. Le puits peut servir également de tour de prise d'eau. La conduite d'évacuation joue le rôle de conduite de vidange.

Pour ce type d'évacuateur, il est nécessaire d'insister sur trois aspects importants :

- La longueur déversant à considérer est égale au périmètre du déversoir.
- La convergence des filets à l'intérieur du centre du puits.
- Le noyage sur la partie basse de puits.



Figure I.9: Evacuateur en puits circulaire



Figure I.10: Evacuateur en puits marguerite

I.2.2.2 Evacuateur en siphon

Les siphons constituent des évacuateurs de superficie capables d'évacuer de très forts débits sous de faibles décréments pour un encombrement restreint (chose souhaitable pour toute conception optimale des organes d'évacuation).

Bien que la théorie du "siphon évacuateur" soit connue depuis longtemps, les projeteurs hésitent encore à employer des siphons, leurs préjugés défavorables pouvant se résumer en quatre points :

- Manque de capacité de surcharge.
- Manque de souplesse, puisqu'ils fonctionnent (par tout ou rien).
- Incertitude d'un amorçage sûr, ce dernier pouvant être empêché par le gel, les corps flottants, les entrées d'air,...etc.
- Exécution délicate, par suite de l'importance des vibrations et des efforts dynamiques auxquels ils sont soumis.



Figure I.11: Siphon d'essai, vraie grandeur du Barrage Ferggoug (Algérie)

I.2.3 Evacuateur de Superficie à seuil mobile(Labiod, H.2015)

Lorsque le site ne se prête pas à l'établissement d'un barrage réservoir fixe, un barrage mobile peut être adopté. Les éléments mobiles assurent la régulation du niveau de la retenue en fonction des variations du débit pour assurer l'alimentation de prises d'eau.

Un barrage mobile type, en Tunisie est le barrage Laroussia, qui implantée à la basse vallée de la Medjerdah. Il permet par la surélévation du niveau d'eau d'alimenter le grand Canal destiné pour l'irrigation, le canal Medjerdah Cap-Bon pour l'irrigation et l'alimentation en eau potable et de la centrale hydroélectrique.

Un barrage mobile est constitué d'éléments mobiles et fixes (figure I.12). Les parties fixes, généralement en maçonnerie, comprennent essentiellement :

- Le radier comportant, dans certains cas, un seuil surélevé par rapport au fond,
- Les piles et les culées qui supportent, dans certains cas, une passerelle de manœuvre,

- Les espaces séparant deux piles consécutives sont appelés « pertuis » ou « passes ». Ils sont obturés par les éléments mobiles,

- Les fondations sur lesquelles s'appuient les parties fixes. Les parties mobiles sont, en général, en charpente métallique. Ils comprennent les vannes levants (batardeaux), segment, hausses et clapets et les vannes hydrauliques « toit » et « secteurs ».



Figure I.12: Dessin schématique d'un barrage mobile

I.2.4 Evacuateur vannées (Labiod ,H.2015)

Il existe une grande variété de vannes mobiles, de nombreux critères peuvent être adoptés pour les classer, à savoir :

- En fonction de la disposition des pertuis : vannes de surface et de profondeur.

- Par rapport à la destination d'exploitation : des vannes principales, batardeau, vannes de secours et celles de constructions, remarquons à la fois qu'on tend à employer les mêmes vannes pour des diverses destinations.

- D'après les matériaux principaux : métalliques, en béton armé, en bois, bien sûr les vannes métalliques sont les plus répandues dans le monde.

- Le mode d'appui : certaines vannes sont simplement appuyées sur les culées ou les piles, d'autres sur le seuil de l'ouvrage.

- Le mode de déplacement : il existe des vannes le vantes ou plongeantes, des vannes roulantes, des vannes rotatives, des vannes à plusieurs axes de rotations, etc.

- Le mode de manœuvre : on a des vannes à manœuvre manuelle, mécanique ou automatique.

Nous exposons l'exemple du barrage de Bou-Hanifia (figure I.13), ouvrage en enrochement de 45 m de hauteur au-dessus du thalweg.

Le débit à évacuer pour préserver le massif de toute submersion en cas de crues catastrophiques est de 6 000 m3/s. Compte tenu de la capacité d'évacuation de l'ouvrage de

vidange de fond qui est de 500 m3/s, c'est 5 500 m3/s qu'il convenait de restituer à la rivière.

Les conditions topographiques et géotechniques ont conduit à l'adoption d'un déversoir de superficie de largeur relativement faible (70 m) sur lequel la lame d'eau doit atteindre 11 m pour évacuer le débit de 5 500 m3/s.



Figure I.13: Barrage Bou-Hanifia à déversoir de superficie à seuil mobile

I.2.5 Evacuateur de crue à hausses fusibles

Le déversoir en hausse fusible a été inventé en 1989 par François Lempérière. Ce système est l'équivalent d'un tampon fusible, semblable à des hausses multiples placées sur la crête de déversoir. Elles ont la forme d'un déversoir en labyrinthe dans lequel chaque hausse représente un cycle du labyrinthe.



Figure I.14: Vue en coupe d'une hausse fusible principale équipée d'un puits d'admission barrage Quipolly (Australie)



Figure I.15: Essai sur modèle réduit au laboratoire (hausses fusible) D'Artelia Environnement

I.2.6 Evacuateur à faible charge(Labiod ,H.2015)

L'évacuateur à faible charge (bec de canard) est constitué d'un seuil présentant une partie curviligne, généralement semi-circulaire, et deux parties rectilignes de chaque côté (figure I.16).

Mais, pour simplifier la mise en œuvre, on peut aussi concevoir des seuils qui se développent en plan selon trois côtés d'un rectangle allongé



Figure I.16: Evacuateur à faible charge



Figure 1.17: Evacuateur « bec de canard » du barrage de Lumbilia (Burkina Faso)

Dans un cas comme dans l'autre, ce seuil constitue la partie supérieure d'une « boite », dans laquelle le matelas d'+eau permet d'amortir l'énergie de chute. Le débit transite en suit dans un coursier en béton posé sur le talus aval de la digue et dont la pente permet de rejoindre le pied aval du barrage ou un dispositif de dissipation d'énergie restitue le débit dans le lit mineur du marigot.

L'écoulement pourra par ailleurs être amélioré en donnant une forme arrondie à la partie supérieure du seuil (figure I.17), l'adaptation de charge aussi importante devra être mise en balance, mais très souvent le « bec de canard » pourra représenter une alternative financièrement intéressante. Dans le cas de débits à évacuer relativement élevés. Il peut être judicieux de le concevoir comme un déversoir primaire destiné à évacuer les crues les plus fréquentes. On prévoira alors un déversoir secondaire, plus sommairement protégé, pour évacuer les crues de fréquence rare.

On pourra par exemple profiter d'un col naturel situé en bord de cuvette qui, moyennant quelques aménagements, constituera un déversoir latéral peu exposé à subir des dégâts majeurs, puisqu'il ne fonctionnera que lors de crues exceptionnelles.

Un autre argument en faveur de ce type de déversoir est la possibilité d'adapter facilement par-dessus le coursier un ouvrage de franchissement. En effet, étant donnée la géométrie de la structure, le coursier reste relativement étroit, et ce même si la longueur déversant est importante, on disposera alors des poutres ou une dalle en béton armé à la partie supérieure des bajoyers. Si la crête du barrage est destinée à la circulation, un tel choix peut donc conduire à des économies notables.

I.2.7 Dissipateurs en saut de ski

I.2.7.1 Le saut de ski (Bouregeois,S.2009)

Le saut de ski a été imaginé par André Coyne pour des barrages se trouvant dans des vallées très étroites et dans lesquelles il n'était pas possible de construire côte à côte de la centrale hydroélectrique et l'évacuateur de crue. Coyne eut alors l'idée de placer un évacuateur de crue, déviant le jet, au-dessus de la centrale. Cet évacuateur prit le nom de « saut de ski » (ou cuillère de dissipation) : il permet d'envoyer le jet bien à l'aval du barrage.

Le premier saut de ski fut construit sur le barrage de Maréges (France) en 1931. Dans le cas où l'on désire préserver la base du barrage et où l'on dispose d'un grand espace dans la rivière à l'aval, il est intéressant de construire un tel saut de ski et de considérer le fond de la rivière comme le bassin amortisseur de ce jet. Un saut de ski peut être décrit par quatre paramètres géométriques : la forme de la cuillère, sa position la plus basse, son rayon et son angle de sortie.



Figure I.18: barrage de saut de ski de Marége, Corrèze, France

La forme de la cuillère est de préférence lisse (même si des cuillères en ligne brisée existent) et composée de courbes circulaire ou parabolique pour faciliter au mieux l'écoulement de l'eau. Bien que la parabole soit réputée pour ses écoulements réguliers, les cuillères circulaires sont plus généralement utilisées. Il est aussi possible de combiner ces deux formes dans une même cuillère.

La position inférieure de la cuillère est le plus souvent choisie en fonction du niveau du sol à l'endroit voulu afin d'éviter l'utilisation de grandes quantités de béton. Dans le cas où la cuillère est posée sur la centrale hydroélectrique, ce problème ne se pose pas.

Le rayon de la cuillère (R), dans le cas d'une forme circulaire, est déterminé pour que l'écoulement s'y produisant soit en contact permanent avec la cuillère et pour que celle-ci conduise au mieux le jet vers l'aval. En cas de mauvais dimensionnement, la pression de contact entre le jet et le saut de ski peut diminuer jusqu'à conduire à de la cavitation et à un endommagement de la cuillère. De nombreuses formules existent dans la littérature : elles lient le rayon à l'énergie de l'écoulement dans la cuillère.

L'angle de sortie du jet (par rapport à l'horizontale) est choisi en fonction de la vitesse de l'écoulement et de la différence d'altitude entre le saut et le lieu d'impact. S'ils sont à la même altitude, l'angle donnant le plus long jet est théoriquement celui à 45° parce que sa forme est parabolique. Si le saut est plus élevé que le point d'impact, l'angle optimum diminue. Il est préférable de placer la sortie du jet à une hauteur de 0.1*R (pour les grandes chutes) à 0.125*R (pour les petites chutes) au-dessus de la position la plus basse de la cuillère : cela conduit à un angle de sortie de 26° . Dans la pratique, la majorité des sauts ski ont un angle de sortie compris entre 20° et 40° .

Lors du passage dans l'air du jet d'un saut de ski, celui-ci dissipe 12% de son énergie.

I.2.7.2 Description

Les effets essentiels d'un saut de ski sont d'éloigner de l'ouvrage un jet d'eau guidé par une auge recourbée vers le haut et de dissiper une partie de l'énergie du jet dans l'air. Le saut de ski se situe soit au pied d'un barrage. Soit à une hauteur intermédiaire entre le niveau de la rivière et le couronnement. Le canal amont de l'auge est un coursier à pente considérable. La (figure I.19) montre une disposition typique d'un saut de ski combiné.



Figure I.19: dispositions typiques d'un saut de ski combiné avec un barrage à contrefort UTs

Le saut de ski dirige le jet d'eau en un endroit d'impact déterminé et il est nécessaire de bien examiner toutes les conséquences cet impact du point de vue de l'endommagement de la rivière et de son lit. Il y a également lieu de tenir compte des effets éventuels sur les ouvrages annexes situé près d'un site de barrage qui pourraient souffrir de la présence de brume dans l'air. Il est recommandé de vérifier les caractéristiques d'écoulement par des essais sur modèle réduit.

Des investigations sur modèle physique et sur prototype répondent aux questions les plus importantes pour la dissipation d'énergie et le potentiel d'affouillement (Damle et al.1966, Jain et Gupta 1965 et Handa et Thomas 1966). Les considérations ci-après ne traitent que de l'évolution du jet entre le coursier et le point d'impact.

I.2.7.3 Types d'écoulement

Le saut d ski est composé d'un canal amont de pente d'une partie courbe avec un rayon de courbure R dans la coupe à l'aval. On distingue deux cas d'écoulement ;

- a) Le premier cas apparait pour des débits Q beaucoup plus petit que le débit de dimensionnement Q_D et se manifeste par un ressaut hydraulique dans l'auge et un déversement à son extrémité aval.
- b) Le second cas est celui bien connu du jet libre qui s'élance vraiment dans l'air et dont la zone d'impact se trouve loin à l'aval. la (figure I.20) représente ces deux configurations.

Pour le dimensionnement de l'auge :

Le cas a) implique de connaitre le débit limite pour lequel le ressaut hydraulique apparait encore. En revanche, la suppression sur le radier due à la courbure des lignes de courant est la question principale soulevée par le cas b).de plus, les aspects concernant la cavitation doivent être examinés. En effet, des sous-pressions importantes peuvent se manifester à l'extrémité aval de l'auge.

La géométrie près du point de détachement sous l'angle δ (figure I.20.b) et un niveau d'eau suffisamment en dessous de ce point nécessite une attention particulière.



Figure I.20: types d'écoulement :a) auge noyée, b) auge dénoyée

I.2.7.4 Caractéristique de l'écoulement sur l'auge

A. Répartitions des vitesses et des pressions

Soit un canal amont rectangulaire prismatique de pente α et de largeur b.la hauteur d'eau h_o à l'amont se calcule d'après une courbe de remous. A cause de la vitesse élevée V_o=q/h_o, le nombre de Froude F_o=q/ (gh_o³)^{1/2}>1. L'écoulement est torrentiel et des effets d'aération superficielle peuvent se manifester.

La charge à la section x (z=0)= x_* où z est la coordonnée verticale, s'écrit :

$$H_{\rm o} = h_{\rm o} + \frac{q^2}{2gh_{\rm o}^2} = h_{\rm o} \left(1 + \frac{1}{2}F_{\rm o}\right) \tag{I.1}$$

Pour F>> 1, l'équation (I.1) peut être approchée par $H_0/h_0 \equiv \left(\frac{1}{2}\right) F_0^2$. L'erreur de cette approximation est inférieure à 10 % si $F_0 > 3.4$, et peut être négligée si $F_0 > 6$ (moins de 5 %). Par conséquent, le changement longitudinal de la hauteur d'eau h(x) est négligeable. La hauteur d'eau à travers l'auge correspond alors à la hauteur d'eau amont $h\approx h_0$ la charge correspondante étant H_0 (figure I.20.b). Par conséquent, les lignes de courant sont circulaires concentriques le long de l'auge, et rectilignes à l'amont de l'auge.

La répartition transversale des vitesses V = V(r) à travers l'auge à angle d'ouverture β suit avec le rayon de courbure r d'une ligne de courant, la loi ;

$$V * r = const$$
(I.2)

En tenant compte de la surface libre (indice s), l'équation (I.2) s'écrit également comme suit :

v*r= v_s * r_s = v_s (R-h_o) où v_s =[2g (H - h)]^{1/2}. Le débit $\int v dr$ entre les limites r= R-h_o et r=R devient alors

$$q = \boldsymbol{v}_{\boldsymbol{s}} (h-R).\ln\left[1 - \frac{h_{\boldsymbol{s}}}{R}\right]$$
(I.3)

Evidemment, $h_0 < R$; pour $C = h_0/R \ll 1$ cette relation peut être approchée par

$$q/v_{s}h_{o} = (1-\zeta)\left[1+\frac{1}{2}\zeta+\frac{1}{3}\zeta^{2}\right] = 1-\frac{1}{2}\zeta-\frac{1}{6}\zeta$$
 (I.4)

Comparée à l'équation (I.3), l'équation (I.4) est précise à moins de 2% 0 < C < 0.5 près, si le débit q est donc toujours plus petit pour des lignes de courant courbées vers le haut que pour des écoulements correspondant à des lignes de courant rectilignes.

La répartition transversale de la pression p(r) se calcule d'après l'équation de Bernoulli

$$\frac{p}{\rho g} = H_g - \frac{v^2}{2g} - (R - r)$$
 (I.5)

La pression à la surface libre est égale à la pression atmosphérique $p(r=R-h_o)=0$, d'où, Hs= $h_o+Vs^2/(2g)$ d'où en éliminant V d'après l'équation (I.2), on déduit

$$\frac{p}{\rho g} = H_{\rm S} - \frac{V_{\rm S}^2}{2g} \left(\frac{R - h_{\rm o}}{r}\right)^2 + r - R \tag{I.6}$$

La pression au fond p_f du canal se calcule en posant r = R, donc

$$\frac{P_f}{\rho g} = h - \frac{V_S^2}{2g} \left[1 - (1 - \zeta)^2 r \right]$$
(I.7)

Pour la hauteur de pression au fond est hydrostatique, En revanche, pour, Vs peut être éliminé par l'équation (I.4) et la surpression due aux lignes de courant courbes s'exprime par :

$$\frac{\Delta_{pf}}{\rho g} = \frac{q^2}{2gh_o^2} \left[\frac{1 - (1 - \zeta)^2}{((1 - \zeta)/(2 - \zeta^2)/6)^2} \right]$$
(I.8)

Où approximativement par

$$\frac{\Delta pf}{\rho g} = \frac{q^2}{2g{h_o}^2} \left[2\zeta \left(1 - \frac{1}{2}\zeta\right) \left(1 - \zeta\right)^{-1} \right]$$
(I.9)

La (figure I.21) permet de comparer les valeurs de la surpression relative obtenues. Par les relations exactes (Lauffer 1936) avec celles obtenues par l'équation (I.9). Pour 0 < C < 0.8, les écarts sont inférieurs à 10 %. On constate que ΔP est proportionnel au carré de la vitesse d'approche V₀=q/h₀ et à la courbure C=h₀/R, pour C<0.25, l'équation (I.9) s'écrit :

$$\frac{\Delta pf}{\rho g} = F_0 \frac{h_o}{R} \tag{I.10}$$



Figure I.21: Suppression relative ΔP au fond de l'auge en fonction de C = h/R, comparaison entre (-) la courbe de Lauffer (1936) et (...) l'équation (9)



Figure 1.22: a) Notation pour l'écoulement sur l'auge d'un saut de ski. b) (-) profil de surface et (---) répartition du coefficient de pression de fond $Cp=\Delta pf/(\rho gH_0)$ pour l'exemple 1 avec $X=\bar{x}/R$; $T=\bar{t}/R$
Les résultats ci-dessus ne tiennent pas compte de l'effet de gravitation sur l'écoulement. Des calculs numériques à deux dimensions ont été effectués par Lenau et Cassidy (1969). La (figure I.22b) donne un résultat typique. La définition des paramètres est donnée dans la (figure I.22a).



Figure I.23: Définition pour lécoulement à travers un saut de ski à écoulement plan

Heller el al. (2005) ont conduit une recherche expérimentale sur l'hydraulique des sauts ski avec un canal d'approche horizontal. La (figure I.23) illustre l'installation par un schéma : les conditions D'approche sont la hauteur d'eau h_0 , la vitesse moyenne V_0 et la charge correspondante H_0 . En outre, l'installation inférieure α_0 et α_u , les hauteurs maximales de ces trajectoires h_M et h_m , la hauteur de l'auge w, le dénivelé entre le point de départ et le canal aval s la hauteur d'eau en dessous du jet t_u. La hauteur h_{pm} et la section correspondante x_{pm} de pression maximale sont mesurées ainsi que la répartition de la pression à travers l'auge. La hauteur de pression maximale $h_{pT}=\Delta_{pf} / (\rho g h_0)$ est égale à la valeur calculée par l'équation (I.10).

La (figure I.24) a) montre le rapport h_{PM}/h_{PT} en fonction du paramètre (h_o/R) (40°/ β). On constate que le rapport entre les hauteurs mesurées et calculées est égal à 1 seulement pour des petites valeurs de (h_o/R) (40°/ β) <0.20. Pour des valeurs plus grandes, on doit poser (Heller et al. 2005).

$$\frac{h_{PM}}{h_{PT}} = \frac{1}{5} \left[\frac{h_{\circ}}{R} \frac{40^{\circ}}{\beta} \right]^{-1}; \operatorname{Pour} \frac{h_{\circ}}{R} \frac{40^{\circ}}{\beta} > 0.20$$
(I.11)



Figure I.24: caractéristiques de la pression sur l'auge :a) rapport l'observation et la valeur théorique pour la hauteur de pression maximale en fonction de (h_o/R) (40°/ β) section $x_{PM}/[(R * sin \beta)/(\beta/1.5^{\circ})]^{1/5}$ en fonction de F_o,c) répartition longitudinale de la hauteur de pression et d) schéma de définition

Cette expression peut aussi être décrite par $h_{PM}/h_o = (1/5) (\beta/40^\circ) F_o$. La hauteur de pression maximale h_{pm} sur une auge dépend ainsi linéairement de la hauteur d'eau du canal d'approche, de l'angle de déflection β et du carré du nombre de Froude d'approche. Une valeur minimale de $\beta=15^\circ$ est appropriée.

La section X_{pm} ou la pression est maximale selon la (figure I.23) est donnée par (figure I.24b).

$$\frac{x_{PM}}{R \ast \sin \beta} - \left(\frac{1.5}{\beta}\right)^{1/5}, \text{ pour } \beta > 15^{\circ}$$
(I.12)

Pour des angles $\beta < 15^{\circ}$, la longueur de l'auge courbée est trop courte pour développer la pression le long de l'auge $h_p(x)$, où l'origine des coordonnées se trouve à l'extrémité aval (figure 24d), peut être représentée par les deux paramètres adimensionnels $P=h_p/h_{PM}$ et $X_{PM}=X/X_{PM}$. Comme illustré par la figure (I.24 c), les mesures s'approchent de la courbe

$$P = [X_{PM} * \exp(1 - X_{PM})]^{1.5}$$
(I.13)

On constate que l'effet de la répartition non hydrostatique des pressions disparait pour $x/(R*\sin\beta) < -3$.

B. Influence des angles de départ sur trajectoires du jet

La (figure I.25) montre des trajectoires de jets issus d'un saut de ski. Le nombre de Froude se situe entre 3 et 10. Pour des conditions identiques, on constate que les angles de départ α_o et α_u deviennent plus petits lorsque F_o augmente. De plus, l'angle α_o Par conséquent, un jet d'eau issu d'un saut de ski se disperse le long de sa trajectoire.

Juon et Hager (2000) ont démontré que les trajectoires de tels jets sont pratiquement paraboliques identique à la trajectoire d'une masse ponctuelle uniquement sous l'effet de la seule gravité. Une dérivation des équations est présentée sous 4. Soient $z_0=0$ et $z_0=h_0$ l'origine des coordonnées verticales des trajectoires inférieures et supérieures. Avec α_j l'angle de départ de l'auge, l'équation de la trajectoire est

$$Z(x) = z_{o} + tanaj * x - g/(2V_{o} \cos 2aj) * x^{2}$$
 (I.14)

Les jets dont angle de départ n'est défini, sont décrits avec les coordonnées généralisées

Xj= $(2x/h_o)$. $1/[F_o^2 \sin(2\alpha j)]$ et Zj= $[(z - z_o)/(hm - z_o)]$ ou hm/h_o= z_o/h_o + (1/2) $F_o^2 \sin^2 \alpha j$ est l'élévation maximale du jet. Les deux trajectoires sont alors définies par :

$$Z_j = X_j - X_j^2$$
, pour $X_j \ge 0$... (I.15)

Tous les essais relatifs aux trajectoires sont comparés à l'équation (I.15) pour définir les angles départ α_o et α_u . Le résultat de cette optimisation s'exprime par

$$\frac{\alpha_{\circ}}{\beta} \left(\frac{70^{\circ}}{\beta}\right)^{1/6} = \frac{1}{2} \left[1 + exp\left(-8\left(\frac{h_{\circ}}{R}\right)^2\right) \right], \text{ Pour} 0 \le \frac{h_{\circ}}{R} \le 1 \text{ et}$$
(I.16)

$$\frac{\alpha_{u}}{\beta} \left(\frac{140^{\circ}}{\beta}\right)^{1/6} = \frac{1}{2} \left[1 + exp\left(-8\left(\frac{h_{o}}{R}\right)^{2}\right) \right], \text{ Pour } 0 \le \frac{h_{o}}{R} \le 1$$
(I.17)

Figure I.25: Géométries de jets issues d'un saut de ski avec R=0.10m, $\beta = 40^{\circ}$, $h_o=0.05m$ et $F_o=a(3,b)(4,c)(5,d)(7,e)(10)$

Les deux expressions sont identiques à l'exception de l'angle de référence, notamment 70° pour α_0 et 2× 70 = 140° pour α_u . Par conséquent, les angles α et β sont identiques pour une petite courbure de l'auge mais se différencient lorsque la hauteur d'eau relative h₀/R s'accroit. Les équations(I.16) et (I.17) sont applicables pour des nombres de Froude F₀≥4.

La (figure I.27) compare deux jets identiques pour des rayons de courbure R=0.10 m et 0.40m. Jet résultant du petit rayon de l'auge entraine un angle de départ beaucoup plus petit que celui avec le grand rayon. Une petite variation sur α_0 ou sur α_u donne ainsi une trajectoire qui est dirigée dans une zone d'impact complètement différent de celle calculée. La définition de ces deux angles détermine alors la zone d'impact du jet et les conséquences relatives à l'affouillement potentiel. Le rapport entre les angles (α_0/α_u)=2^{1/6}=1012 est constant selon les équations (I.16) et (I.17), de telle sorte que l'angle de la trajectoire supérieure est 10% plus grand que celui de la trajectoire inférieure. Par conséquent, les deux trajectoires suivent un chemin parabolique, mais avec un angle de départ différent. Dans les prototypes, la trajectoire peut être calculée par l'équation (I.16) ; suite à la formation de la mousse, la trajectoire inférieure à celle calculée(I.17).

Figure 1.26: effet du rayon de l'auge sur les trajectoires du jet pour $\beta = 40^\circ, h_o = 0.05$ m et R=a)0.10 m, b)0.40 m

La dissipation relative sur l'ensemble de l'ouvrage d'un jet généré par un saut de ski (de la section de départ jusqu'à l'aval de la zone d'impact) sur un canal à fond rigide peut être calculée indirectement. Heller et al. (2005) introduit l'efficacité du saut de ski par $\eta = \Delta H/H_a$ où la charge amont H_o=s-w+h_o+v_o²/ (2g). Avec S=s/h_o la hauteur de chute relative et A=60°

 $[tan(h_o/R)]^{1/2}$ Le paramètre qui tient compte de la courbure relative de l'auge, le résultat s'exprime par

$$\eta = \frac{\beta - A}{10A} + 0.060 \text{S}, \text{ pour } 0 \le \text{S} \le 9$$
 (I.18)

Par conséquent, la dissipation d'énergie à travers un saut de ski croit avec la hauteur relative de chute S et l'angle de déflection β mais elle décroit avec une augmentation de la courbure relative h_o/R. Des valeurs typiques d'efficacité $\eta = 40\%$ peuvent être atteintes. Cette valeur peut être modifiée la présence d'un coussin d'eau créé par affouillement.

C. Formation du ressaut sur l'auge (Chocking)

L'auge d'un saut de ski présente une pente négative dans le coursier. Si le nombre de Froude dans l'auge devient proche de l'unité, un changement des conditions d'écoulement peut se produire. Le passage de l'écoulement torrentiel à un écoulement fluvial provoque ainsi un ressaut hydraulique dans l'auge avec une vitesse beaucoup plus petite que celle dans la section de départ du saut de ski. La profondeur critique se produit sur le bec de départ du saut de ski et l'écoulement tombe directement sur la fondation de l'auge avec un risque d'affouillements importants (Rouvé 1971). Il est donc nécessaire de connaître les conditions hydrauliques pour lesquelles l'écoulement torrentiel dans l'auge se transforme en un écoulement fluvial. En anglais, on parle de Choking pour ce cas dangereux qui signifie étrangler un courant à haute vitesse.

Comme démontré par des essais, une hystérèse gouverne le phénomène de formation du ressaut hydraulique dans l'auge (Quintela et Abecasis 1979). La limite entre les deux types d'écoulements n'est donc pas identique pour une augmentation ou une diminution du débit. Le calcul de la limite de formation du ressaut hydraulique s'effectue en appliquant le théorème de la quantité de mouvement et de la conservation de l'énergie. En admettant une répartition hydrostatique des pressions sur l'auge-ce qui n'est toutefois pas toujours correct – le théorème de la quantité de mouvement pour un écoulement critique au bec du départ de l'auge s'écrit

$$\frac{1}{2}h_{o} + \frac{q^{2}}{gh_{o}} = \frac{1}{2}(h_{c} + w)^{2} + \frac{q^{2}}{gh_{c}}$$
(I.19)

Avec $h_c/h_o = F_o^{2/3}$, cette relation donne pour la limite inférieure de formation du ressaut (Haller et al.2005)

$$w = \frac{w}{h_o} = \left[1 - 2F_o^{4/3} + 2F_o^2\right]^{1/2} - F_o^{2/3}$$
(I.20)

La limite supérieure de formation du ressaut admet une hauteur d'eau aval sur le bec de départ du saut de ski (hc + w), donc

$$\frac{1}{2}h_o^2 + \frac{q^2}{gh_o} = \frac{1}{2}(h_c + w)^2 + \frac{q^2}{[g(h_c + w)]}$$
(I.21)

La relation (I.21) peut être réécrite comme

$$w = \frac{1}{2} \left[(1 + 8F_o^2)^{1/2} - 1 \right] - F_o^{2/3}$$
(I.22)

A partir des essais, les relations suivantes sont retrouvées pour le débit croissant (+) et le débit décroissant (-) (Heller al. 2005)

$$W_{+} = 0.06(F_{o} - 1)^{1.2}$$
, pour $1 < F_{o} < 4$ (I.23)

$$W_{-} = 0.90(F_{o} - 1)^{0.90}$$
, pour 1o<4 (I.24)

Figure I.27: Formation du ressaut du type Q_{-} pour $\beta = 40^{\circ}$ et R=0.40 m

La formation du ressaut peut donc être évitée avec une faible hauteur de l'auge W. Typiquement, on a β = 30° et une courbure de l'ordre h/R 0,10. On trouve ainsi W 10(1-cos30°) =1,34. Le nombre de Froude minimal pour éviter la formation dur ressaut est alors

 $F_o = 3$. La (figure I.29) illustre une auge avec un ressaut hydraulique. On constate que l'écoulement tombe comme une lame déversant au pied de l'auge au lieu de décoller comme un jet dans l'air.

I.2.7.5 Trajectoire du jet

La trajectoire parcourue par un jet plan quittant un saut de ski peut être déterminée approximativement par une analyse balistique en considérant un point de masse jeté en l'air avec une vitesse de départ V_d d'inclinaison initiale α du jet. Cette hypothèse néglige la présence d'une pression interne résiduelle dans le jet. Il est facile de démontrer qu'elle est satisfaite pour $F_d >> 1$.

En négligeant la résistance d'air sur le jet d'eau, la trajectoire du jet devient :

$$\bar{t} = \tan \delta * \bar{x} - \frac{g\bar{x}^2}{2V_d^2 \cos^2 \delta}$$
(I.25)

La définition des coordonnées (\bar{x}, \bar{t}) est donnée dans la figure (I.31a).

Avec : $\overline{T} = \overline{t}/H$ et $\overline{X} = \overline{x}/H$, l'équation (I.25) s'exprime par :

$$\overline{T} = \tan \alpha * \overline{X} \cdot \left(\frac{\overline{X}}{2\cos\delta}\right)^2 \tag{I.26}$$

Figure I.28: Trajectoire du jet libre, (—) *surfaces inférieure et supérieure du jet,* (…) *centre du jet,* (…) *équation (17.26) pour* $\alpha = 0$

La charge amont $H=V_d/2g$ est liée à la vitesse de départ V_d . La géométrie de la surface du jet est observée sur modèle par Marchetti (1963). Ses résultats sont comparés dans la figure (I.31) avec les solutions de l'équation (I.26) pour $\alpha = 0^\circ$.

Comme déjà discuté dans le paragraphe (III.4), les caractéristiques de l'écoulement sur l'angle auge et le rayon de l'angle auge peuvent fortement influencer les angles de départ des trajectoires inférieures et supérieures d'un jet. La (figure I.31) montre la répartition locale du débit par unité de surface d'après les essais de Marchetti (1963). La section du point d'impact calculé est aussi indiquée. On constate que le maximum de débit se concentre bien autour du point déterminé. Les essais décrits ci-dessus se rapportent à une charge $H_d = 3$ m et une chute verticale $\bar{t}=-3$ m. Comparées au prototype, ces dimensions sont faibles. En augmentant H_d , \bar{t} et α , le jet se disperse beaucoup plus dans l'espace. La section d'impact calculée par

l'équation (I.26) correspond donc à une valeur maximale. Ce fait doit être considéré pour des essais sur modèles réduits.

Figure I.29: réparation locale du débit (-) courbe de débit par unité de surface identique, (...) endroit calculé par l'équation (26)

I.3 Conclusion

L'évacuateur de crue est une des pièces les plus importantes du barrage. Il permet à la retenue de ne pas atteindre une hauteur d'eau critique et d'éviter la submersion lors d'une crue. Sa fonction est donc d'évacuer l'eau excédentaire de la retenue et de l'envoyer vers l'aval. L'écoulement dans un évacuateur doit toujours se faire à surface libre afin qu'un éventuel dépassement du débit théorique de l'évacuateur n'entraîne pas un débordement par-dessus le barrage.

Il convient toutefois de maîtriser l'ampleur du risque de perdre les gains environnementaux obtenus dans la production d'électricité renouvelable par la destruction d'une partie du lit de la rivière. Pour diminuer ces dommages, il est possible de placer des indentations de la forme du saut de ski à la place de celui-ci.

Les sauts à ski en combinaison avec les bassins profonds sont un type d'énergie économique et efficace dissipateur en aval des grands barrages.

Cette partie est consacrée pour une synthèse bibliographique déterminant les différents types des évacuateurs de crue utilisés dans la construction des barrages.

Partie II

Partie expérimentale et discussion des résultats

II.1. Dispositif expérimental

L'étude expérimentale consiste à reproduire le phénomène au laboratoire, dans cette partie, on se propose d'étudier l'évolution de la ligne d'eau à travers l'évacuateur de Creager et le jet à travers le saut de ski jusqu'à la retombée au fond du canal.

Dans la partie en question, nous aborderons deux étapes : la préparation du modèle expérimental et la description des essais effectués sur le modèle au niveau du Laboratoire d'Hydraulique de l'Université de Bejaia. Après on présente les nombreux protocoles expérimentaux en vue de les comparer avec les résultats analytiques, dans le but de comparer entre les résultats de calculs analytiques et les mesures expérimentales.

II.2. Objectif de l'expérience

L'objectif de notre travail repose sur la détermination de la variation de la ligne de l'eau tout au long du canal en effectuant l'expérience et ce afin de déterminer l'équation de la trajectoire du jet après l'auge.

II.3. Description de banc d'essai H12 MH2

Le canal hydraulique pédagogique H12 MK2 à surface libre et à pente variable de 5 mètres de longueur, permet d'étudier les principes sur les écoulements uniformes dans un canal à la surface libre et d'étudier les ressauts hydrauliques et les écoulements au-dessus d'un déversoir à seuil épais (figure II.1).

Figure II.1: le banc d'essai H12 MH2

II.3.1. Caractéristiques du canal

L'ensemble des caractéristiques du canal se résume dans ce qui suit.

-Un canal inclinable avec parois latérales en plexiglas

- Visualisation complète de l'écoulement
- Fonctionne en circuit fermé.
- Instrument complet comprenant :

-Un dispositif précis pour la mesure de débit par pesée.

- Limnimétrie à vernier.

-Tube Pitot.

• Modèles standards fournis :

-Déversoir a paroi mince avec nappe ventilée.

-2déversoirsà seuil épais.

-Vanne de sortie réglable.

-Venturi.

-Vanne verticale guillotine.

-Piles de pont.

- L'installation se place sur le sol.
- Seule une alimentation électrique est nécessaire.
- Convient parfaitement à des démonstrations devant des groupes d'étudiant.

II.3.2. Dimension du canal

Le canal est de dimensions suivantes :

- Longueur 5 m.
- Hauteur 150 mm.
- Largeur 75 mm.

II.3.3. Capacité du réservoir de pesée

La capacité du réservoir de pesée est 136 litres.

II.3.4. Caractéristique de la pompe

Les caractéristiques de la pompe sont les suivantes :

- Type : Centrifuges.
- Matière : Bronze.
- Vitesse de relation : (2850 tr/min).

- Alimentation : électrique monophasée 220/240v-50 Hz.
- Débit compris entre 50 l/min sous une hauteur d'eau de 15 m.

Figure II.2 Pompe

II.3.5. Expériences applicables sur le bac hydraulique :

Les expériences qui peuvent être appliquées sur le bac sont les suivantes :

- Fortement dans un canal à écoulement uniforme.
- > Ecoulement sous une vanne verticale de type guillotine.
- > Ecoulement sur un déversoir à paroi mince.
- Etudes d'un déversoir à seuil épais.
- > Changement de profondeur lors d'un ressaut hydraulique.
- Ecoulement à travers un venturi.
- Ecoulement avec apport latéral.

II.4. Déversoir de Creager

Le déversoir du type de Creager est immergé à l'intérieur du canal et fixé sur ses parois comme le montre le figure (II.3) qui suit.

Figure II.3: Dispositif expérimental

Ses dimensions sont les suivantes :

- Une longueur 13 cm.
- Une hauteur 12 cm.

II.4.1. Saut de ski

Le saut de ski est composé de :

- Une gollote d'approche.
- Le déflecteur est examiné ; il est caractérisé par un canal amont horizontal et une partie courbe à contre-pente qui guide le jet dans l'air. Le déflecteur peut lancer le jet soit tout au long de l'axe du canal amont, soit en le déviant vers le centre de la vallée si l'ouvrage se trouve sur la côte de cette dernière.

Figure II.4: composants de déversoir

II.5. Protocole expérimental

Afin de peser le débit dans le banc hydraulique, on mesure le temps de remplissage du réservoir.

Plus les débits sont plus importants, plus, on a la remontée du fléau qui se fait relativement vite.

Pour effectuer la mesure, on prend une masse supérieure à celle du réservoir vide pour assurer l'équilibre.

On rajoute alors une série de masse de 5Kg, puis on déclenche le chronomètre, le temps enregistré correspond à celui d'une certaine masse d'eau.

On fait arrêter le chronomètre lorsque le fléau remonte à haute position.

Figure II.5: phases de mesure :a)position d'attente sans poids ;b) début de chronométrage) fin de chronométrage; d) position finale avec poids

Comme le bras de levier est de 3 pour 1, chaque masse placée sur l'accroche poids est multiplier par 3 ; chaque 1Kg représente 3Kg d'eau recueillie dans le réservoir d'eau.

Figure II.6: Information de poids et bras de levier

La méthode de mesure du débit repose sur la mesure du temps et du débit massique qui sera ensuite transformée en débit volumique par la formule suivante :

On a la formule générale du débit suivante

$$Q = v * s \tag{II.1}$$

La formule du débit massique est comme suit :

$$Q_m = \frac{m}{t} \tag{II.2}$$

La formule du débit volumique est :

La relation entre le débit massique et le débit volumique :

$$Q_v = \frac{v}{t} \tag{II.3}$$

On a :

$$\rho = \frac{m}{v} \tag{II.4}$$

Donc :

$$m = \rho \times v \tag{II.5}$$

On sait que $Q_m = \frac{m}{t}$, en remplaçant m on aura :

$$Q_m = \frac{(\rho \times v)}{t} \tag{II.6}$$

On obtient la relation entre le débit volumique et le débit massique :

$$Q_V = \frac{Q_m}{t} = \frac{[kg/s]}{[kg/m^3]}$$
 (II.7)

Q_m: Le débit massique en (Kg/s).

 Q_v : Le débit volumique (m³/s).

- m : la masse (Kg).
- t : le temps (s).
- 9 : masse d'eau (Kg/m³).

Pour la masse, on prend une masse de 5 Kg durant toute l'expérience. Le temps de remplissage du réservoir représente la variabilité de la masse.

II.5.1. Mesure du temps

La mesure du temps se fais à l'aide d'un appareil électronique appelé chronomètre qui est représenté sur la figure(II.7) qui suit.

Figure II.7: Chronomètre

II.5.2. Mesure de hauteur

La mesure de la hauteur de l'écoulement qui se fait généralement à l'aide du Limnimétre qui représente un dispositif intrusif et perturbe ainsi l'écoulement. Dans notre expérience, la mesure de la hauteur est effectuée par la photométrie.

La photométrie représente une technique qui vise la détermination du profil de la surface libre avec calibrage métrique sur une photo instantanée prise lors de l'effectuation de l'expérience. La prise de la photo se fait à une distance du canal assez suffisante et d'une manière perpendiculaire pour prendre le canal et avoir une bonne vision et précision.

II.6. Sources d'incertitude

Lors de la réalisation de n'importe quelle expérience ou mesure, l'opérateur ne peut en aucun cas effectuer des mesures rigoureusement exactes, les résultats sont exposés à des erreurs et des approximations. Ces dernières doivent être estimées pour calculer leurs conséquences dans les résultats obtenus.

L'erreur absolue d'une grandeur mesurée se définit comme étant l'écart entre le résultat obtenu expérimentalement et la valeur déterminée théoriquement.

Dans notre cas, les sources d'incertitude se manifestent en :

- Vieillissement du matériel se trouvant en sein du laboratoire de l'université, ce qui peut causer un dysfonctionnement d'une partie ou d'une autre de l'expérience.
- Corrosion des joints du déversoir, ce qui entraine des ondes de choc provoquées par les forts débits.
- Perturbation du jet de l'eau à cause des ondes de choc.
- Les erreurs dues au retard lors du chronométrage.
- Distorsion et déformation des parois du déversoir à cause de son utilisation.
- Les erreurs dues aux moyens de mesures, la manipulation et la position de l'opérateur (il doit être perpendiculaire au déversoir).

II.7. Résultats obtenus

II.7.1. Résultats expérimentaux

Conformément au protocole décrit dans le chapitre précédent, le paramètre important, qui est le débit a été mesuré comme suit :

$$Q_V = \frac{v}{t} \tag{II.8}$$

t : Le temps ;

T_{moy}: La moyenne de mesure du temps ;

 Q_m : Débit massique (Kg/s);

 Q_v : débite volumique (m³/s).

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

| Essai | T moyen(s) | Qm (kg/s) | Qv (cm3/s) |
|-------|------------|-----------|------------|
| 1 | 221 | 0.0711 | 71.1 |
| 2 | 67 | 22.5 | 225 |
| 3 | 44.5 | 34 | 340 |
| 4 | 27 | 56 | 560 |
| 5 | 13.5 | 1.11 | 1111 |

Tableau II.1: Débits des essais expérimentaux

Les hauteurs expérimentales correspondantes à chaque débit et qui sont regroupées dans le tableau (II.2) sont obtenues par la photométrie.

 Tableau II.2: la hauteur expérimentale de chaque débit

| Le débit (cm ³ /s) | La hauteur expérimentale h ₀ (cm) |
|-------------------------------|--|
| Q1 | 0.17 |
| Q2 | 0.32 |
| Q3 | 0.43 |
| Q4 | 0.69 |
| Q5 | 1.1 |

II.7.1. Calcul analytique

Les résultats des hauteurs analytiques sont obtenus par la résolution de l'équation de Bernoulli qui nous a conduits à une équation du troisième degré résolue par la suite par Excel comme le montre le tableau (II.3).

$$Z_1 + H_1 = Z_2 + \frac{v^2}{2g} \tag{II.9}$$

$$Z_1 + H_1 - Z_2 = \frac{v^2}{2g} \tag{II.10}$$

On a :

$$Z_1 + H_1 - Z_2 = \emptyset \tag{II.11}$$

$$V = \frac{Q}{s} \tag{II.12}$$

$$S = b \times h_0 \tag{II.13}$$

On obtient:

$$h^3 - \emptyset h^2 + \frac{q^2}{2gb^2} = 0 \tag{II.14}$$

Avec :

H₁: La charge hydraulique (cm)

Z1: La hauteur de déversoir (cm)

Z₂: La hauteur de saut de ski (cm)

Q : Débit
$$(cm^3/s)$$

h₀ : La hauteur d'eau (cm)

g : Accélération de la pesanteur (m^2/s)

| Debit (cm ³ /s) | H(cm) | Ø (cm) | V(cm/s) | h_0 (cm) |
|-----------------------------------|-------|--------|---------|---------------------|
| Q1 | 1.42 | 12.42 | 55.76 | 0.061 |
| Q2 | 1.8 | 12.8 | 93.75 | 0.19 |
| Q3 | 2.3 | 13.3 | 105.42 | 0.28 |
| Q4 | 2.75 | 13.75 | 108.21 | 0.46 |
| Q5 | 3.5 | 14.5 | 134.6 | 0.89 |

Tableau II.3: la hauteur analytique de chaque débit

Les résultats de la trajectoire des jets quittant un saut de ski sont de forme parabolique : au plus bas ordre d'approximation, elles suivent une dynamique des points de masses, avec

 $Z_0 = \frac{h_0}{2}$, la vitesse d'écoulement d'approche V_0 et l'angle de départ $\alpha = 17^\circ$, l'équation de la trajectoire indique :

$$Z(x) = Z_0 + x \tan \alpha - \frac{g}{2V^2 \cos^2 \alpha} x^2 \qquad (II.8)$$

On obtient :

$$y = \frac{h_0}{2} + x \tan \alpha - \frac{g}{2V^2 \cos^2 \alpha} x^2 \tag{II.9}$$

Avec :

$$V_0 = \frac{Q}{h_0 \times b} \tag{II.10}$$

Pour Q1:

 $h_0 = 0.17 \text{ cm}$ V₁=55.76 (cm/s)

Figure II.8: Mesure de la hauteur avec (Plot Digitizer) ; $Q1=7.11\times10^{-5}$ (m³/s)

| Х | Y | X | Y |
|-----|------|-----|------|
| 0 | 3.4 | 3 | 2.8 |
| 0.5 | 3.51 | 3.5 | 2.4 |
| 1 | 3.54 | 4 | 1.92 |
| 1.5 | 3.48 | 4.5 | 1.35 |
| 2 | 3.34 | 5 | 0.7 |
| 2.5 | 3.11 | 5.5 | 0 |

Tableau II.4: La hauteur du jet pour Q1

Pour Q2 :

 $h_0=0.32 \text{ cm}$ V_0=93.75 cm³/s

Figure II.9: Mesure de la hauteur du jet avec (plot Digitizer) ; $Q2 = 22.5 \times 10^{-5} (m^3/s)$

| Х | Y | X | Y |
|-----|------|-------|------|
| 0 | 3.17 | 5.5 | 3.05 |
| 0.5 | 3.3 | 6 | 2.86 |
| 1 | 3.41 | 6.5 | 2.64 |
| 1.5 | 3.49 | 7 | 2.39 |
| 2 | 3.54 | 7.5 | 2.11 |
| 2.5 | 3.56 | 8 | 1.8 |
| 3 | 3.55 | 8.5 | 1.46 |
| 3.5 | 3.51 | 9 | 1.09 |
| 4 | 3.44 | 9.5 | 0.69 |
| 4.5 | 3.34 | 10 | 0.26 |
| 5 | 3.21 | 10.17 | 0 |

 Tableau II.5: La hauteur du jet pour Q2

Pour Q3 :

h₀=0.43 cm

 $V_0\!\!=\!\!105.42\;cm^{3/}\!/s$

Figure II.10: *Mesure de la hauteur avec (Plot Digitizer)*; $Q_3 = 34 \times 10^{-5} (m^3/s)$

| X | Y | X | Y |
|---|------|------|------|
| 0 | 3.18 | 7 | 2.89 |
| 1 | 3.44 | 8 | 2.45 |
| 2 | 3.59 | 9 | 1.91 |
| 3 | 3.65 | 10 | 1.27 |
| 4 | 3.61 | 11 | 0.53 |
| 5 | 3.47 | 11.5 | 0 |
| 6 | 3.23 | | |

Tableau II.6 : La hauteur du jet pour Q3

Pour Q4

h₀=0.69 cm

 $v_0 = 108.21 \text{ cm}^3/\text{s}$

Figure II.11: *Mesure de la hauteur avec (Plot Digitizer)*; $Q_4 = 56 \times 10^{-5} (m^3/s)$

| X | Y | X | Y |
|-----|------|------|------|
| 0 | 3.25 | 4.5 | 3.62 |
| 0.5 | 3.38 | 5 | 3.54 |
| 1 | 3.5 | 6 | 3.3 |
| 1.5 | 3.59 | 7 | 2.96 |
| 2 | 3.66 | 8 | 2.52 |
| 2.5 | 3.7 | 9 | 1.98 |
| 3 | 3.72 | 10 | 1.34 |
| 3.5 | 3.71 | 11 | 0.6 |
| 4 | 3.68 | 11.8 | 0 |

| Tableau II.7 : La hauteur du jet pour Q | 94 |
|--|----|
|--|----|

Pour Q5 :

h₀=1.1 cm

 $v_0 = 134.6 \ cm^3/s$

Figure II.12: Mesure de la hauteur avec (Plot Digitizer); $Q_5 = 11.1 \times 10^{-5} (m^3/s)$

| X | Y | X | Y |
|---|------|----|------|
| 0 | 3.5 | 9 | 3.86 |
| 1 | 3.78 | 10 | 3.6 |
| 2 | 4 | 11 | 3.28 |
| 3 | 4.16 | 12 | 2.9 |
| 4 | 4.24 | 13 | 2.46 |
| 5 | 4.3 | 14 | 1.96 |
| 6 | 4.28 | 15 | 1.4 |
| 7 | 4.2 | 16 | 0.78 |
| 8 | 4.06 | 17 | 0 |

Tableau II.8: La hauteur du jet pour Q5

II.8. Comparaison et discussions des résultats (expérimentaux / analytiques)

II.8.1. Comparaison des résultats

Le tableau suivant regroupe les valeurs des hauteurs trouvées expérimentalement et celles déterminées analytiquement pour chaque débit.

| Débit (cm ³ /s) | h ₀ expérimentale (cm) | h ₀ analytique (cm) | Erreur relative % |
|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| Q1 | 0.17 | 0.061 | 64.12 |
| Q2 | 0.32 | 0.19 | 40.63 |
| Q3 | 0.43 | 0.28 | 34.88 |
| Q4 | 0.69 | 0.46 | 33.33 |
| Q5 | 0.95 | 0.79 | 16.84 |

Tableau II.9: Comparaison des résultats expérimentaux et analytiques

Pour les données précédentes, le calcul analytique obtenu par l'équation de trajectoire du jet est reporté et représenté sur les graphes de (II.13) à (II.17).

Figure II.13: Comparaison de la hauteur du jet pour Q1

Figure II.14: Comparaison de la hauteur du jet pour Q2

Figure II.15 : Comparaison de la hauteur du jet pour Q3

Figure II.16: Comparaison de la hauteur du jet pour Q4

Figure II.17: Comparaison de la hauteur du jet pour Q5

II.9. Interprétation des résultats

La ligne de la trajectoire représentée dans les cinq figures précédentes est obtenue par voie photométrique, les erreurs d'incertitude doivent être prises en considération.

La figure (II.13) représente la comparaison entre la variation de la ligne de la trajectoire du jet et celles de la nappe supérieure et inférieure, et qui montre la non-uniformité due à l'effet de la tension superficielle (effet parasite d'échelle au débit utilisé dans l'expérience qui est d'une valeur de 7.11×10^{-5} m³/s, qui est une force insuffisante pour pousser le jet ; ce qui a influencé sur son mouvement et c'est ce qu'on appelle le principe d'inertie.

Concernant le deuxième essai représenté sur la figure (II.14), portant sur une augmentation de la valeur du débit, l'allure de la courbe de la trajectoire du jet est d'une forme parabolique sous l'effet de gravité et qui se situe pratiquement entre la courbe de la nappe supérieure et inférieure.

En outre, pour les troisièmes et quatrièmes essais représentés sur les deux figures (II.15) et (II.16), où on a augmenté la valeur du débit, on enregistre une chute importante de l'erreur relative, c'est pourquoi la variation de la ligne de la trajectoire du jet prend une allure parabolique et se situe exactement entre la variation de la nappe supérieure et inférieure. Les résultats souhaités ont été enregistrés dans le troisième et quatrième essai où on a utilisé des valeurs du débit correspondantes qui interviennent dans la stabilisation de l'écoulement.

Pour le cinquième essai représenté sur la figure (II.17), on remarque que la ligne de la trajectoire prend une allure plus élevée à cause d'un fort débit qui circule dans des sections moins importantes et donc on a la vitesse de l'écoulement qui est grande, ce qui provoque la formation des ondes de choc, comme le montre la figure (II.18) et c'est pourquoi on obtient l'allure de la courbe de la hauteur de la trajectoire qui dépasse celle de la nappe supérieure.

Figure II.18: les ondes de choc

II.10. Conclusion

La présente partie a pour but la présentation de l'objectif de l'expérience et l'appareillage expérimental utilisé pour l'effectuer en décrivant les méthodes de mesures.

Le but de notre étude expérimentale repose sur la détermination de la trajectoire du jet en utilisant la photométrie et la méthode de mesure de la hauteur (plot Digitizer).

Cette méthode nous a permis d'atteindre l'objectif visé de l'expérience dans le troisième et quatrième essai où on a utilisé des débits correspondants et obtenu la ligne de la trajectoire qui prend une allure parabolique située entre la courbe de la nappe supérieure et inférieure ; et c'est le résultat souhaité de l'expérience. Ceci nous pousse à dire que la photométrie est bien adaptée pour la résolution de ce genre de problèmes.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

A travers ce modeste travail, nous avons essayé de toucher à l'un des problèmes importants et complexes en hydraulique : écoulements à surface libre en l'occurrence celui des écoulements à travers des évacuateurs de crue avec un déversoir de Creager muni d'un « saut de ski » (ou cuillère de dissipation) par voie théorique et expérimentale.

L'intérêt de ce sujet se trouve de connaître de quelle manière le jet se projettera le long du canal en déterminant l'angle de sortie du jet (par rapport à l'horizontale) qui est choisi en fonction de la vitesse de l'écoulement et de la différence d'altitude entre le saut et le lieu d'impact.

Au premier temps, nous avons établi le fonctionnement du saut de ski qu'on a développé par la détermination des équations applicables pour la résolution de ce genre de problèmes.

Ensuite, nous avons essayé de toucher au noyau de notre travail en réalisant une expérience à l'aide d'une méthode nommée la photométrie réussie à l'aide de plot Digitizer dans le but de la détermination de la variation de l'écoulement dans la nappe supérieure et inférieure.

Les résultats obtenus nous ont servi pour le développement et la résolution de l'équation de la trajectoire du jet en se basant sur les principes de la balistique et l'effet de gravité, qu'on a par la suite traduit dans des graphes appropriés pour chaque débit.

Le dernier chapitre est consacré pour la présentation des résultats obtenus et la comparaison des résultats expérimentaux et analytiques dans le but de mieux comprendre le principe de notre expérience et son objectif visé.

Les expériences réalisées au sein du laboratoire de l'Université de Bejaia nous ont permis de constater que la variation de la trajectoire dépend essentiellement du débit.

A la lumière des expérimentations et calculs analytique effectuées dans ce travail, nous pouvons affirmer que la méthode de mesure de la hauteur avec (Plot Digitizer) est parfaitement adaptée à ce genre de problème.

Enfin, au terme de ce modeste travail, nous espérons avoir contribué à la résolution analytique d'un des problèmes de l'écoulement à travers des évacuateurs muni d'un saut de ski, qui reste un vaste domaine de recherche.

54

BIBLIOGRAPHIE

LABIOD, H. Surélévation du plan d'eau du barrage Izdihar a Sidi Abdelli, etude de faisabilité, *Mémoire de fin d'étude, Master, Université Abdou Bekr Bel kaid, Alerie, 105* pages, juin 2015.

CARLIER, F., Hydraulique générale et appliquée, *Edition Eyrolles*, Paris, 1980.

BOURGEOIS,S. Effet indentations des sauts de ski sur la fosse d'érosion en aval des évacuateurs de crue de barrage, *projet de fin d'étude*, *Ingéniorat*, Université de Liège, France,2009.

Dhillon, GS, Sakhuja, VS, Paul, TC (1981), Mesures pour contenir le jet d'un jet à aubes mobiles dans les structures installées, *Irrigation and Power*, 38 (3), 237-245. Gumensky, DB (1953), Conception des parois latérales des goulottes et déversoirs, *Trans*. ASCE 119, 355-372.

Gunko, FG, Burkov, AF, Isachenko, NB, Rubinstein, GL, Sloviova, AG, Yuditsky, GA (1965), Recherche sur le régime hydraulique et l'affouillement local du lit de la rivière en dessous déversoirs de barrages à tête haute, dans *Proc.* 11 *Congrès de l'IAHR* Leningrad, 1 (50), 1-10.

Heller, V., Hager, WH, Minor, H.-E. (2005), Hydraulique de saut à ski, *Journal of Hydraulic Engineering*, 131 (5), 347-354.

Critères de conception hydraulique HDC (1964a), *barrages à débordement élevé* : godets rabattables et courbe des orteils pressions, 112-7, Corps of Engineers, Vicksburg MI USA. Critères de conception hydraulique HDC (1964b), *barrages à débordement élevé* : distance de projection du godet, 112-8, Corps of Engineers, Vicksburg MI USA.

Juon, R., Hager, WH (2000), Seau rabattable sans et avec déflecteurs, *Journal of Hydraulic Engineering*, 126 (11), 837-845.

Kawakami, K. (1973), A study on the computation of horizontal distance of jet issu from déversoir de saut à ski, *Trans. JSCE*, 5, 37-44 (en japonais).

Khatsuria, RM (2005), Hydraulique des déversoirs et dissipateurs d'énergie, Marcel Dekker, Nouveau York.

Orlov, V. (1974), Die Bestimmung des Strahlsteigwinkels beim Abfluss über einen Sprungschanzenüberfall, *Wasserwirtschaft-Wassertechnik*, 24 (9), 320-321 (en allemand).

Quadri, SAW, Jilani, AKM, Fakhri, AI (1977), Quelques aspects sur la conception de la trajectoire seaux, dans *Proc*. 46 Session de recherche, Central Board of Irrigation and Power (CBIP) Trivandrum, 41-46.

Rajan, BH, Shivashankara Rao, KN (1980), Design of trajectory bucets, *Journal of Irrigation and Power* India, 37 (1), 63-76.
Schmocker, L., Pfister, M., Hager, WH, Minor, H.-E. (2006), Caractéristiques d'aération du ski jump jets, *Journal of Hydraulic Engineering*, (soumis).

Shivashankara Rao, KN (1982), Conception de dissipateurs d'énergie pour les déversoirs de grande capacité, 13 *Congrès* ICOLD 1 Rio de Janeiro, 311-328.

Varshney, RS, Bajaj, ML (1970), Godets de saut à ski sur barrages indiens, *Journal of Irrigation et Power* India, 27 (4), 383-393.

Vischer, DL, Hager, WH (1998), Hydraulique du barrage, Wiley, Chichester.

Zünd, B., Minor, H.-E. (2006), Widerstandsminderung in Wasser-Luft-Gemischen, in Wasserbau-Symposium: *Stauhaltungen und Speicher - von der Tradition zur Moderne*, Graz, 2, 460-474.

ANNEXES

Tableau A.2.1

Tableau A.2.2

| | Ç | 21 | |
|----------|-----------|------------------|------|
| | | | |
| Nappe in | nferieure | Nappe supérieure | |
| | | | |
| Х | Y | Х | Y |
| 0 | 3 | 0 | 3,8 |
| 0,7 | 3,12 | 0,3 | 3,88 |
| 1,36 | 3,22 | 1,05 | 3,96 |
| 2,09 | 3,26 | 1,69 | 4,04 |
| 2,87 | 3,27 | 2,18 | 4,03 |
| 3,56 | 3,22 | 2,84 | 3,99 |
| 4,27 | 3,15 | 3,55 | 3,9 |
| 5,1 | 2,99 | 4,2 | 3,76 |
| 5,89 | 2,77 | 5,2 | 3,51 |
| 6,5 | 2,57 | 6,14 | 3,22 |
| 7,2 | 2,31 | 6,85 | 2,97 |
| 7,65 | 2,11 | 7,61 | 2,7 |
| 8,33 | 1,7 | 8,31 | 2,35 |
| 8,95 | 1,29 | 8,9 | 2 |
| 9,21 | 1,09 | 9,43 | 1,66 |
| 9,5 | 0,77 | 9,86 | 1,18 |
| 9,75 | 0,44 | 10,01 | 0,96 |
| 9,9 | 0,29 | 10,33 | 0,55 |
| 10,13 | 0 | 10,68 | 0 |

| | (| 22 | |
|------------------|------|------------------|------|
| | | | |
| Nappe inferieure | | Nappe supérieure | |
| X | Y | X | Y |
| 0 | 3 | 0 | 3,34 |
| 0,79 | 3,17 | 0,88 | 3,65 |
| 1,37 | 3,23 | 1,74 | 3,76 |
| 2,04 | 3,26 | 2,62 | 3,77 |
| 2,6 | 3,28 | 3,36 | 3,72 |
| 3,69 | 3,17 | 4,36 | 3,61 |
| 4,69 | 3,01 | 5,38 | 3,4 |
| 5,39 | 2,8 | 6,51 | 3,13 |
| 6,12 | 2,57 | 7,48 | 2,88 |
| 6,98 | 2,31 | 8,62 | 2,42 |
| 7,72 | 2,05 | 9,41 | 1,93 |
| 8,32 | 1,75 | 9,8 | 1,6 |
| 8,79 | 1,39 | 10,01 | 1,38 |
| 9,01 | 1,21 | 10,3 | 1,03 |
| 9,37 | 0,86 | 10,61 | 0,65 |
| 9,8 | 0,42 | 10,73 | 0,37 |
| 10,17 | 0 | 10,89 | 0 |

Tableau A.2.3

| Q3 | | | |
|----------|-----------|----------|-----------|
| Nappe in | nferieure | Nappe su | ıpérieure |
| Х | Y | Х | Y |
| 0 | 3 | 0 | 3,34 |
| 0,02 | 3,01 | 0,57 | 3,53 |
| 1,08 | 3,26 | 1,22 | 3,66 |
| 1,96 | 3,3 | 2,08 | 3,81 |
| 2,77 | 3,31 | 3,03 | 3,82 |
| 3,77 | 3,19 | 4,15 | 3,7 |
| 5,18 | 2,84 | 5,46 | 3,53 |
| 6,19 | 2,47 | 6,72 | 3,23 |
| 7,01 | 2,11 | 7,65 | 2,78 |
| 7,46 | 1,88 | 8,54 | 2,28 |
| 7,98 | 1,58 | 9,44 | 1,8 |
| 8,65 | 1,16 | 9,73 | 1,62 |
| 9,73 | 0,37 | 10,46 | 1,1 |
| 10,19 | 0 | 10,95 | 0,75 |
| | | 11,22 | 0,51 |
| | | 11,7 | 0 |

Tableau A.2.4

| Q4 | | | |
|------------------|------|------------------|------|
| Nappe inferieure | | Nappe supérieure | |
| Х | Y | X | Y |
| 0 | 3 | 0 | 3,5 |
| 0,05 | 3,1 | 1,18 | 3,84 |
| 0,94 | 3,3 | 2,24 | 4,02 |
| 1,9 | 3,5 | 3,4 | 4,04 |
| 2,82 | 3,47 | 4,08 | 3,95 |
| 4,03 | 3,36 | 5,69 | 3,56 |
| 5,37 | 3,11 | 6,53 | 3,36 |
| 6,6 | 2,82 | 7,9 | 2,82 |
| 7,57 | 2,46 | 8,8 | 2,46 |
| 8,47 | 2,02 | 9,7 | 2,05 |
| 9,16 | 1,57 | 10,45 | 1,75 |
| 9,83 | 1,19 | 11,69 | 1,1 |
| 10,47 | 0,8 | 12,68 | 0,59 |
| 11,05 | 0,35 | 13,32 | 0,18 |
| 11,5 | 0 | 13,6 | 0 |

Annexes

Tableau A.2.5

| Q5 | | | |
|------------------|-------|------------------|------|
| | | | |
| Nappe inferieure | | Nappe supérieure | |
| | | | |
| Х | Y | Х | Y |
| 0 | 3,07 | 0 | 3,93 |
| 1,74 | 3,25 | 0,36 | 4,17 |
| 2,87 | 3,31 | 0,87 | 4,48 |
| 3,4 | 3,31 | 1,44 | 4,87 |
| 4,63 | 3,18 | 2,15 | 5,21 |
| 5,4 | 3,058 | 2,72 | 5,38 |
| 6,23 | 2,88 | 3,44 | 5,52 |
| 6,96 | 2,68 | 4,19 | 5,57 |
| 7,85 | 2,4 | 4,94 | 5,56 |
| 8,39 | 2,15 | 5,64 | 5,44 |
| 9,14 | 1,77 | 6,39 | 5,24 |
| 9,91 | 1,4 | 7,14 | 4,97 |
| 10,74 | 0,93 | 7,99 | 4,65 |
| 11,24 | 0,61 | 8,91 | 4,26 |
| 11,97 | 0 | 9,91 | 3,8 |
| | | 10,88 | 3,31 |
| | | 11,96 | 2,69 |
| | | 12,75 | 2,13 |
| | | 13,43 | 1,6 |
| | | 13,87 | 1,25 |
| | | 14,37 | 0,84 |
| | | 14,72 | 0,46 |
| | | 15,2 | 0 |

Résumé

En hydraulique à surface libre, beaucoup de problèmes se manifestent notamment ceux des écoulements à travers les évacuateurs de crue.

Dans notre étude, nous avons essayé de traiter un écoulement par- dessus un déversoir de Creager muni d'un saut de ski et ce par voie expérimentale et théorique.

Les résultats obtenus nous ont aidés à atteindre l'objectif de notre travail en l'occurrence la détermination de la trajectoire du jet libre sur le saut de ski.

Mots clés : écoulement, déversoir, saut de ski, trajectoire du jet, évacuateur du crue.

Abstract

In free-surface hydraulics, many problems arise, in particular those of flow through the spillways.

In our study, we tried to treat a flow over a Creager weir equipped with a ski jump, experimentally and theoretically.

The results obtained helped us to achieve the objective of our work in this case determining the trajectory of the free jet on the ski jump.

Keywords: flow, weir, ski jump, jet trajectory, spillway.

ملخص

في المكونات الهيدروليكية ذات السطح الحر ، تظهر العديد من المشكلات ، لا سيما مشاكل التدفق عبر مجاري التدفق. في در استنا ، حاولنا معالجة التدفق فوق سد Creager المجهز بقفزة تزلج ، تجريبيًا ونظريًا. ساعدتنا النتائج التي تم الحصول عليها في تحقيق الهدف من عملنا في هذه الحالة بتحديد مسار الطائرة الحرة في قفزة التزلج.

الكلمات المفتاحية : التدفق ، السد ، القفز على الجليد ، الالمسار النف, مفيض.