



Faculté de Technologie  
Département d'Hydraulique

Laboratoire d'Hydraulique appliquée et environnement

## MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par :

**DJOUADI Wiam**

**KADDOUR Rachida**

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

Option : **Ouvrages et Aménagements Hydrauliques**

### INTITULE :

## **ETUDE THEORIQUE DU PROFILAGE HYDRODYNAMIQUE DES EVACUATEURS DE CRUES EN PUIITS**

Soutenu le 27 /09 /2022 devant le jury composé de :

- Président : Dr. CHENAFI Azzeddine
- Promoteur (s) : Dr. BRAKENI Abderrezak

Dr. AMARA Lyes

- Examineur : Dr. HAMMOUCHE Abderrahmane

# *Remerciements*

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

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

*Nos chères familles pour leurs aides.*

*Nos prometteurs : Dr. **BRAKENI A** et Dr. **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.*

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

*Le directeur du barrage Sidi Yacoub, en l'occurrence Mr **ROUICHED** pour offrir son aide  
pour compléter notre étude.*

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

*Nous remercions aussi les amis pour leurs aides.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ma mère, quoi que je fasse ou quoi que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ton bienveillance me guide et ton présence m'a toujours été la source de force. En témoignage, je t'offre ce modeste travail pour te remercier pour tout ce tu es fait pour moi.*

*A la mémoire de mon cher père, et ma tante Wardia*

*Mes sœurs : Kamilia, Soulef, Samra*

*A toutes la famille*

*Mes amis*

*Ma binôme Rachida*

**Wiam**

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail:*

*A mes chers parents qui on fait tout pour que je devienne ce que je suis*

*Mon frère Redouan qui m'a tant aidé et encouragé*

*Mon frère Hamza et mes sœurs Dyhia et Nwara*

*Ma moitié Mourad*

*Mes Amis*

*Ma binôme Wiam*

*Toute la promo 2022 en Ouvrages et Aménagements Hydrauliques*

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

***Rachida***

## Notations

$H'_o$  : Charge de dimensionnement ( $m$ )

$\bar{H}_D$  : Charge de dimensionnement sur le déversoir circulaire en mince paroi ( $m$ )

$r$  : Rayon de courbure ( $m$ )

$R$  : Rayon de la crête de déversoir circulaire ( $m$ )

$\bar{R}$  : Rayon de tube vertical ( $m$ )

$O$  : Origine

$x$  : Coordonnée horizontale ( $m$ )

$z$  : Coordonnée verticale ( $m$ )

$x_o$  : Distance horizontale entre les origines des déversoirs circulaire à paroi mince et à la crête arrondie ( $m$ )

$z_o$  : Distance verticale entre les origines des déversoirs circulaire à paroi mince et à crête arrondie ( $m$ )

$X$  : Coordonnée horizontale adimensionnelles ( $m$ )

$Z$  : Coordonnée horizontale adimensionnelles ( $m$ )

$R_e$  : Nombre de Reynolds

$W_e$  : Nombre de Weber

$L$  : Longueur du déversoir ( $m$ )

$h$  : Charge d'eau sur le déversoir ( $m$ )

$C_c$  : Coefficient de contraction

$\varepsilon$  : Rugosité relative

$m$  : Coefficient du débit du déversoir rectiligne

$C_d$  : Coefficient de débit

$g$  : Accélération gravitationnelle ( $m.s^{-2}$ )

$Q$  : Débit ( $m^3/s$ )

$Q_D$  : Débit de dimensionnement ( $m^3/s$ )

$H$  : Charge d'eau au-dessus du seuil déversant ( $m$ )

$H_D$  : Charge de dimensionnement ( $m$ )

$\bar{H}$  : Charge de dimensionnement par rapport à l'origine  $\bar{O}$  ( $m$ )

$X_m$  : Coordonnée du point haut de la nappe inférieure ( $m$ )

$E$  : Elévation maximale de la surface inférieure de la nappe ( $m$ )

$\alpha$  : Coefficient qui caractérise l'influence du profile en crête

$\lambda$  : Facteur de friction ou coefficient de frottement de Darcy Weisbach

$Z_m, Y_m$  : Coordonnée du point haut de la nappe inférieure ( $m$ )

$D$  : Diamètre ( $m$ )

$\rho$  : Masse volumique du liquide ( $Kg/m^3$ )

$U_{mac}$  : Vitesse maximale du courant libre ( $m/s$ )

$v$  : Vitesse moyenne ( $m/s$ )

$n$  : Nombre de piles

$\nu$  : Viscosité cinématique du fluide ( $m^2/s$ )

$\sigma$  : Tension superficielle du liquide ( $N/m$ )

$H_s$  : Charge adimensionnelle

$k$  : Coefficient de frottement

$v_o$  : Vitesse initiale ( $m/s$ )

$r, z$  : Coordonnées cylindriques

$\varphi$  : Le potentiel des vitesses

$\omega$  : L'angle azimutal

$v_z$  : Vitesse longitudinale ( $m/s$ )

$v_r$  : Vitesse radiale ( $m/s$ )

$J_1$  : Fonction de Bessel de premier ordre

$\psi$  : Fonction de courant

$t$  : Temps ( $s$ )

$m$  : Masse ( $Kg$ )

$v_x$  : Vitesse horizontale ( $m/s$ )

$v_y$  : Vitesse verticale ( $m/s$ )

$v_{ox}$  : Vitesse initiale horizontale ( $m/s$ )

$v_{oy}$  : Vitesse initiale verticale ( $m/s$ )

$\alpha$  : Angle d'inclinaison de la partie conique

$I$  : Pente de la surface de la section conique

$R$  : Rayon de l'entonnoir ( $m$ )

$r_o$  : Rayon à l'extrémité de la partie conique ( $m$ )

$h_o$  : Profondeur d'eau à l'extrémité de la partie conique ( $m$ )

$h$  : Epaisseur de jet le long de l'axe de jet ( $m$ )

$L$  : Longueur de la partie conique ( $m$ )

$v$  : Vitesse moyenne le long de l'axe de jet ( $m/s$ )

$y_{\max}$  : L'ordonnée de point d'intersection des nappes supérieure ( $m$ )

$d_o$  : Diamètre de l'entonnoir à  $y_{\max}$  (diamètre de puits) ( $m$ )

$d_t$  : Diamètre de transition ( $m$ )

$v_t$  : Vitesse de transition ( $m/s$ )

$Q_{\max}$  : Débit maximum ( $m^3/s$ )

$Q_p$  : Débit de conception ( $m^3/s$ )

$H_B$  : Hauteur total de déversoir ( $m$ )

$h_w$  : Perte de charge ( $m$ )

$Q_m$  : Le débit massique ( $kg/s$ )

$Q_v$  : Le débit volumique ( $m^3/s$ )

# Table des matières

Notations .....	I
Table des matières .....	II
Liste des figures... ..	III
Liste des tableaux .....	IV

<b>Introduction générale</b> .....	1
------------------------------------	---

## **Chapitre I : Généralités sur les évacuateurs de crues en puits**

I.1. Introduction .....	3
I.2. Description de l'ouvrage .....	3
I.3. Types d'évacuateur de crue en puits .....	4
I.3.1. Déversoir à écoulement radial .....	5
I.3.2. Déversoir à vortex .....	5
I.3.3. Déversoir à flux libre .....	7
I.3.4. Déversoir en charge .....	7
I.3.5. Evacuateur avec écoulement tourbillonnant dans la galerie de sortie .....	8
I.4. Fonctionnement d'un évacuateur de crue en puits .....	9
I.4.1. Ecoulement à surface libre (régime dénoyé) .....	10
I.4.2. Ecoulement en charge (régime noyé) .....	10
I.4.3. Représentation graphique des modes d'écoulement .....	11
I.5. Géométrie du déversoir circulaire .....	13
I.6. Evaluation du débit .....	19
I.6.1. Ecoulement dénoyé .....	19
I.7. Conclusion .....	26

## **Chapitre II : Etude théorique du profilage de la tulipe**

II.1. Introduction .....	27
II.2. Méthode théorique du potentiel des vitesses .....	27

II.3. Théorie balistique .....	30
II.3.1. Définition .....	30
II.3.2. Les branches de balistique .....	31
II.3.2.1. Balistique intérieure .....	31
II.3.2.2. Balistique extérieure .....	31
II.3.3. Analyse du mouvement balistique .....	32
II.3.3.1. Résolution du problème dans le vide (sans frottement) .....	33
II.3.3.2. Résolution du problème dans le cas de frottement fluide laminaire (force Proportionnelle à la vitesse) .....	34
II.4. Méthode théorique simplifiée (trajectoire du filet central) .....	36
II.4.1. Entonnoir avec section conique .....	37
II.4.2. Entonnoir sans section conique .....	38
II.5. Conclusion .....	42

### **Chapitre III : Application de la Théorie au cas du seuil rectiligne en saut de ski.**

III.1. Introduction .....	43
III.2. Rappel du protocole expérimental .....	43
III.2.1. Dispositif expérimental .....	43
III.2.2. Objectif de l'expérience .....	43
III.2.3. Description de banc d'essai H12 MH2 .....	43
III.2.4. Déversoir de Creager .....	44
III.2.4.1. Saut de ski .....	45
III.2.5. Protocole expérimental .....	45
III.2.6. Mesure du temps .....	47
III.2.7. Mesure de la hauteur .....	48
III.2.8. Les résultats expérimentaux .....	48
III.3. Application et vérification de la méthode théorique simplifiée .....	48
III.3.1. Cas de mouvement sans frottement .....	48
III.3.2. Cas de mouvement avec frottement fluide laminaire .....	51

III.4. Interprétation des résultats .....54  
    III.4.1. Cas d'écoulement sans frottement .....54  
    III.4.2. Cas d'écoulement avec frottement fluide laminaire .....54  
III.5. Conclusion .....54

**Chapitre IV : Profilage de la tulipe de l'évacuateur en puits**

IV.1. Introduction .....55  
IV.2. Test préliminaire .....55  
IV.3. Application au cas réel du barrage Sidi Yakoub .....59  
    IV.3.1. Description sur le barrage Sidi Yakoub .....59  
    IV.3.2. Application de la théorie de profilage .....59  
    IV.3.3. Profil empirique de Wagner .....63  
    IV.3.4. Superposition des deux profils théorique et empirique de Wagner .....66  
    IV.3.5. Superposition des deux profils théorique et expérimental .....68  
    IV.3.6. Superposition des trois profils, théorique, expérimental et celui de Wagner .....69  
    IV.3.7. Interprétation des résultats .....70  
IV.4. Conclusion .....70

**Conclusion Générale** ..... 71

**Bibliographie** .....72

**Annexes** .....73

**Résumé**

## Liste des figures

Figure (I.1) : Evacuateur de crue en puits. (Khatsuria, 2005) .....	4
Figure (I.2) : Types d'évacuateurs en tulipes avec des puits a) et c) verticaux et b) et d) inclinés à déversoirs a) et b) circulaires et c) et d) semi-circulaires (Hager, 2009) .....	4
Figure (I.3) : Différentes formes de tulipes ou déversoir à crête non rectiligne. (Hager, 2009) .....	5
Figure (I.4) : Evacuateur à vortex (Khatsuria, 2005) .....	6
Figure (I.5) : déversoir à crête non rectiligne en forme de « bec de canard » ou « marguerite » utilisés avec les évacuateurs en tulipe (Hager, 2009) .....	7
Figure (I.6) : décharge par tunnel pressurisé (Khatsuria, 2005) .....	8
Figure (I.7) : Déversoir avec écoulement tourbillonnant dans la galerie de sortie (Khatsuria, 2005) .....	9
Figure (I.8) : phases de fonctionnement d'un évacuateur en tulipe (Hager, 2009) .....	10
Figure (I.9) : schéma de fonction et définition de la courbe de tarage (Gardel, 1949) .....	11
Figure (I.10) : Indépendance de l'écoulement dénoyé quant aux conditions aval (Gardel, 1949) .....	12
Figure (I.11) : Indépendance de l'écoulement noyé quant aux formes amont (Gardel, 1949) .....	12
Figure(I.12) : Définition de la géométrie du déversoir circulaire à paroi mince (Hager ,2009) .....	13
Figure(I.13) : Surface typique des nappes inférieures et supérieures en coordonnées adimensionnelles (Wagner, 1956) .....	15
Figure (I.14) : Coefficient du débit $\bar{C}_d/\bar{C}_{d1}$ en fonction de $\bar{H}/\bar{H}_D$ (Hager, 2009) .....	16
Figure (I.15) : limite du jet transformé $Z^*(X^*)$ avec les mesure du Wagner pour différentes valeurs de H/R (Wagner, 1956) .....	17
Figure (I.16) : comparaison entre les équations (I.13) et les mesures de Wagner (Wagner, 1956) .....	18
Figure (I.17) : Profil du déversoir circulaire tracé par la méthode du filet centrale (Ouamane, 1995) .....	19
Figure (I.18) : Déversoir circulaire (Ouamane, 1995) .....	20

Figure(I.19) : Diminution Du débit en fonction de la hauteur $h/D$ de la charge amont (Gardel, 1949) .....	21
Figure (I.20) : Effet du rayon de courbure de la crête sur le débit (Gardel, 1949) .....	21
Figure (I.21) : Déversoir circulaire a mince paroi (Ouamane, 1995) .....	23
Figure (I.22) : Caractéristiques géométriques du déversoir circulaire (Ouamane, 1995) .....	25
Figure (I.23) : Comparaison des résultats des équations (I.45) (I.46) et les mesure de Indelkoffer(1977) .....	26
Figure (II.1.a) : Schéma représentatif d'un déversoir plan axisymétrique (Sanoyan et Khublaryan, 1960) .....	27
Figure (II.1.b) : Distribution des vitesses le long de l'axe de déversoir (Sanoyan et Khublaryan, 1960) .....	28
Figure (II.2) : le graphe de la fonction de courant $\Psi$ sur $r$ pour divers $z$ (Sanoyan et Khublaryan,1960) .....	29
Figure (II.3) : Les contours théoriques des profils de déversoir (Sanoyan et Khublaryan, 1960) .....	29
Figure (II.4) : les courbes caractéristiques des profils théoriques et expérimentaux (Sanoyan et Khublaryan, 1960) .....	30
Figure (II.5) : mouvement d'un projectile lancé obliquement (PHY-144, 2011) .....	31
Figure (II.6) : mouvement d'un projectile lancé horizontalement .....	32
Figure (II.7) : schéma du mouvement .....	32
Figure (II.8) : évacuateur de crue en puits avec une section conique (Saptsin.V.P ,2005) .....	37
Figure (II.9) : Evacuateur de crue en puits sans section conique (Saptsin.V.P ,2005) .....	38
Figure (III.1) : le banc d'essai H12 MH2 .....	44
Figure (III.2) : Dispositif expérimental .....	44
Figure (III.3) : Composants de déversoir .....	45
Figure (III.4) : Phases de mesure : a) position d'attente sans poids ; b) début de chronométrage ; c) fin de chronométrage ; d) position finale avec poids .....	46
Figure (III.5) : Chronomètre.....	47
Figure (III.6) : Comparaison des trajectoires des nappes expérimentales et analytiques pour Q1 cas sans frottement .....	49
Figure (III.7) : Comparaison des trajectoires des nappes expérimentales et analytiques pour Q2 cas sans frottement .....	49

Figure (III.8) : Comparaison des trajectoires des nappes expérimentales et analytiques pour Q3 cas sans frottement .....	50
Figure (III.9) : Comparaison des trajectoires des nappes expérimentales et analytiques pour Q4 cas sans frottement .....	50
Figure (III.10) : Comparaison des trajectoires des nappes expérimentales et analytiques pour Q5 cas sans frottement .....	51
Figure (III.11) : Comparaison des trajectoires des nappes expérimentales et analytiques pour Q1 cas avec frottement fluide laminaire .....	51
Figure (III.12) : Comparaison des trajectoires des nappes expérimentales et analytiques pour Q2 cas avec frottement fluide laminaire .....	52
Figure (III.13) : Comparaison des trajectoires des nappes expérimentales et analytiques pour Q3 cas avec frottement fluide laminaire .....	52
Figure (III.14) : Comparaison des trajectoires des nappes expérimentales et analytiques pour Q4 cas avec frottement fluide laminaire .....	53
Figure (III.15) : Comparaison des trajectoires des nappes expérimentales et analytiques pour Q5 cas avec frottement fluide laminaire.....	53
Figure (IV.1) : schéma du profilage de la tulipe d'évacuateur en puits .....	57
Figure (IV.2) : schéma de calcul d'un évacuateur en puits (Himeric Yu.A, 1957) .....	58
Figure (IV.3) : photos aériennes du barrage Sidi Yacoub .....	59
Figure (IV.4) : profilage de la tulipe du barrage Sidi Yacoub .....	62
Figure (IV.5) : phénomène de CROTCH .....	63
Figure (IV.6) : les allures des courbes des nappes inférieure et supérieure pour différentes valeurs de $\frac{H_s}{R}$ (Wagner, 1956) .....	64
Figure (IV.7) : Profil de Wagner de la tulipe d'évacuateur de crue du barrage Sidi Yacoub .....	66
Figure (IV.8) : superposition des deux profils analytique et empirique de Wagner .....	67
Figure (IV.9) : superposition des deux profils théorique et expérimental .....	69
Figure (IV.10) : superposition des trois profils, théorique, expérimental et celui de Wagner .....	69

## Liste des tableaux

Tableau (III.1): les résultats expérimentaux de Nait Cherifi.K, Brahim.M.....	48
Tableau (IV.1) : les coordonnées des points le long de l'axe du jet, les vitesses moyennes et l'épaisseur du jet des points .....	56
Tableau (IV.2) : les coordonnées des points le long de l'axe du jet, les vitesses moyennes et l'épaisseur du jet des points, cas du déversoir du barrage Sidi Yacoub .....	60
Tableau (IV.3) : les coordonnées des nappes supérieures et inférieure du jet de déversement, cas du barrage Sidi Yacoub .....	61
Tableau (IV.4) : les coordonnées adimensionnelles du profil de Wagner de la tulipe d'évacuateur du barrage Sidi Yacoub .....	65
Tableau (IV.5) : les coordonnées dimensionnelles du profil de Wagner de la tulipe d'évacuateur du barrage Sidi Yacoub .....	67
Tableau (IV.6) : les coordonnées du profil expérimental de la tulipe du barrage Sidi Yacoub .....	68

# Introduction Générale

Les évacuateurs de crues sont les principaux organes de la sécurité des barrages, cette dernière dépend avant tout d'un bon profilage permettant le bon fonctionnement de l'évacuateur. La capacité d'évacuation et la sécurité de l'ouvrage sont donc les deux questions essentielles que pose l'étude d'un évacuateur de crue, qui va être nuancée par le type de l'évacuateur.

Les évacuateurs de crues sont en règle générale composés d'un seuil déversant en béton, éventuellement surhaussé par une vanne en acier. La géométrie du profilage des seuils déversant joue un rôle primordial dans leur interaction avec l'écoulement, avec des impacts directs aussi bien sur le seuil que sur la relation entre le niveau d'eau dans le réservoir en amont et le débit évacué. Ainsi la forme des déversoirs a fait l'objet de très nombreuses études dès les années 1890. Ce profil standard est dimensionné pour une crue (crue de dimensionnement), et donc avoir garantir de faire face à toutes crues au cours de sa durée de vie. Les pressions exercées par l'écoulement sur le seuil seront supérieures ou égales à la pression atmosphérique (pas de risque de cavitation). Et que le niveau de la retenue sera minimal.

Le travail qui est présenté ici, est une étude concernant les évacuateurs de crues en puits, spécifiquement le profilage de la tulipe de l'évacuateur en puits par la méthode théorique simplifiée (trajectoire du filet central). Cette dernière est parmi les méthodes analytiques développées uniquement par les russes, et delà nous avons consultés beaucoup de littérature russe, afin de pouvoir comprendre la procédure de calcul selon la méthode analytique simplifiée. Cette dernière sert à déterminer la trajectoire du filet central pour une lame d'eau déversante, ensuite déduire les positions des nappes supérieure et inférieure, tel que la nappe inférieure sera le profil de la tulipe de l'évacuateur en puits, qui est l'objectif de notre étude.

Pour pouvoir effectuer cette étude de la manière la plus adéquate possible, le travail ci-présent est décomposé en quatre parties, où chacune porte sur un aspect bien particulier du problème.

Le premier chapitre traitera des généralités sur les évacuateurs de crues en puits, leurs différents types, leurs fonctionnements ainsi que le calcul de leurs géométries.

Le second quant à lui, concerne l'étude théorique du profilage de la tulipe d'un évacuateur en puits, en régime dénoyé, particulièrement par la méthode théorique des potentiels des vitesses premièrement, ensuite par la méthode théorique simplifiée.

Le troisième chapitre, contient un rappel du protocole expérimental des deux étudiants Nait Cherifi.K et Brahim.M, qui ont effectués des essais au cas de seuil rectiligne en saut de ski, au niveau de laboratoire d'hydraulique de l'université de Bejaia, et ça dans le but d'appliquer la théorie simplifiée, et vérifier les résultats analytiques obtenus.

La dernière partie du travail, portera sur une étude préliminaire pour un cas du déversoir circulaire premièrement, ensuite appliquer la théorie simplifiée sur un cas réel du barrage Sidi

Yacoub de la wilaya de Chlef-Algérie, et comparer les résultats obtenus avec le profil expérimental (réel) et le profil empirique de Wagner.

Le travail se termine par une conclusion générale qui regroupera les principaux points saillant de celui-ci.



**CHAPITRE I**

# Généralités sur les évacuateurs en puits

## I.1. Introduction

Dans les évacuateurs en tulipe, l'eau est évacuée par un puits vertical ou incliné prenant naissance dans la retenue et sortant en aval par un ouvrage en charge ou à surface libre après une section de contrôle (CFBR, 2013).

Un déversoir à crête courbe peut s'avérer économique. En effet les déversoirs à crête circulaire ont des dimensions minimales en plan, ce qui permet de recommander ce type d'évacuateur lorsqu'il n'y a pas d'espace pour prévoir d'autres types de déversoirs (Hager, 2009). L'un de ses plus grands avantages est son aptitude à atteindre une capacité presque maximale avec des pertes de charges relativement faibles et grâce à cet avantage il est idéal pour atténuer la crue entrante, quand l'espace de stockage temporaire du réservoir est assez large (Khatsuria, 2005). De plus, ce type de déversoir se situe entièrement en dehors du barrage, ce qui est particulièrement intéressant en cas d'une digue (Hager, 2009). Mais d'autre part, ces évacuateurs sont sensibles aux corps flottants car le diamètre du puits, ainsi que la section du coude inférieur de raccordement à la galerie d'évacuation ou la section de contrôle de l'écoulement aval, sont souvent trop faibles par rapport aux dimensions d'un arbre avec racines et branches, pour cela, il est recommandé d'avoir un diamètre supérieur à 6 m et une géométrie adaptée au passage des corps flottants (CFBR, 2013).

On ne rencontre pas ce type d'évacuateur uniquement dans les barrages, mais aussi dans les structures de contrôle de l'érosion ou bien des ponceaux routiers (déversoir d'entrée de goutte ou bien ponceaux d'entrée de chute) (Khatsuria, 2005).

## I.2. Description de l'ouvrage

L'évacuateur de crue en puits (figure I.1) est constitué de 3 grandes parties :

- Un déversoir de surface à crête ronde souvent circulaire appelé tulipe (d'où le nom d'évacuateur en tulipe), il est calé sous la cote de la retenue normale du barrage, ce qui permet d'évacuer un débit significatif à cette cote, il joue le rôle d'une entrée déversante lorsque les écoulements sont radiaux ainsi il guide les flux d'eau et contrôle le débit.
- Une partie en forme de puits, sur laquelle on installera la crête et dans laquelle l'eau va s'écouler.
- La dernière partie, est une galerie horizontale qui prolonge le puits à l'aide d'un coude, et qui passe sous l'ouvrage ou sous l'un de ses appuis et rejoint la vallée au pied du barrage, son rôle consiste à évacuer les eaux qui proviennent du tunnel vers l'aval de l'ouvrage (Ouamane, 1995).

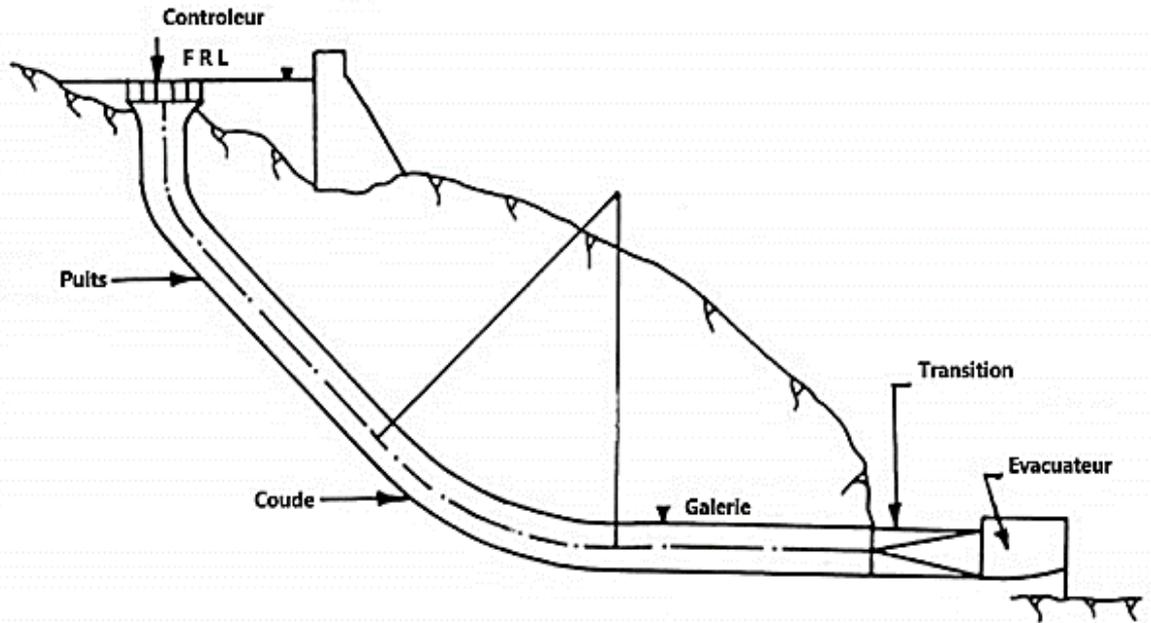


Figure (I.1) : Evacuateur de crue en puits. (Khatsuria, 2005)

### I.3. Types d'évacuateur de crue en puits

Les évacuateurs en tulipe peuvent être classés selon plusieurs critères :

- Selon la disposition du déversoir et le puits d'évacuation, divers types d'évacuateurs en tulipe peuvent être distingués (figure I.2)
  - Le type A est un évacuateur à puits vertical, il est la solution standard normalement aménagée comme une tour de béton, indépendante du barrage.
  - Le type B caractérisé par un puits incliné excavé dans la rive rocheuse ou intégré dans le béton du barrage.
  - Les types C et D se distinguent par une géométrie semi-circulaire approchée par l'écoulement d'un seul côté.

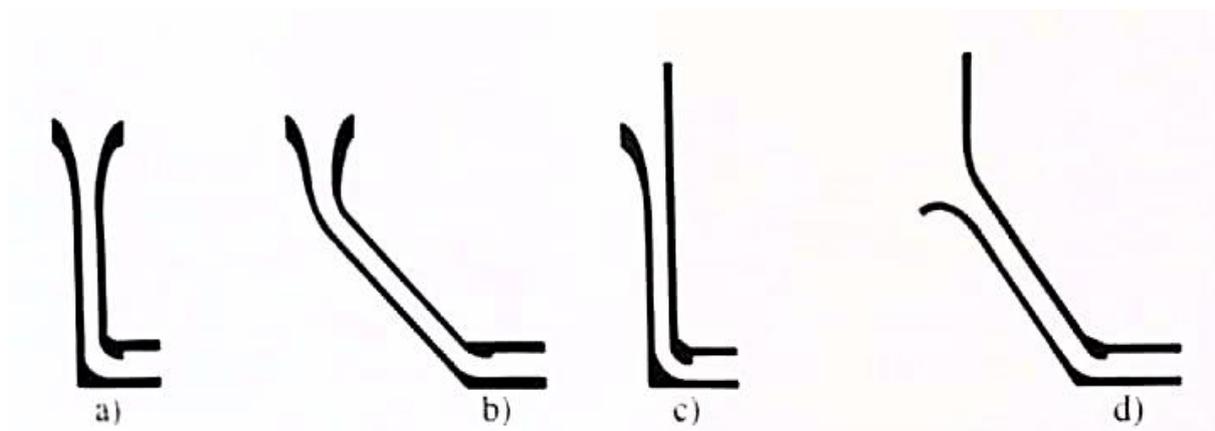


Figure (I.2) : Types d'évacuateurs en tulipes avec des puits a) et c) verticaux et b) et d) inclinés à déversoirs a) et b) circulaires et c) et d) semi-circulaires (Hager, 2009)

En ce qui concerne la tulipe ou le déversoir à crête non rectiligne, plusieurs formes sont possibles (figure I.3).

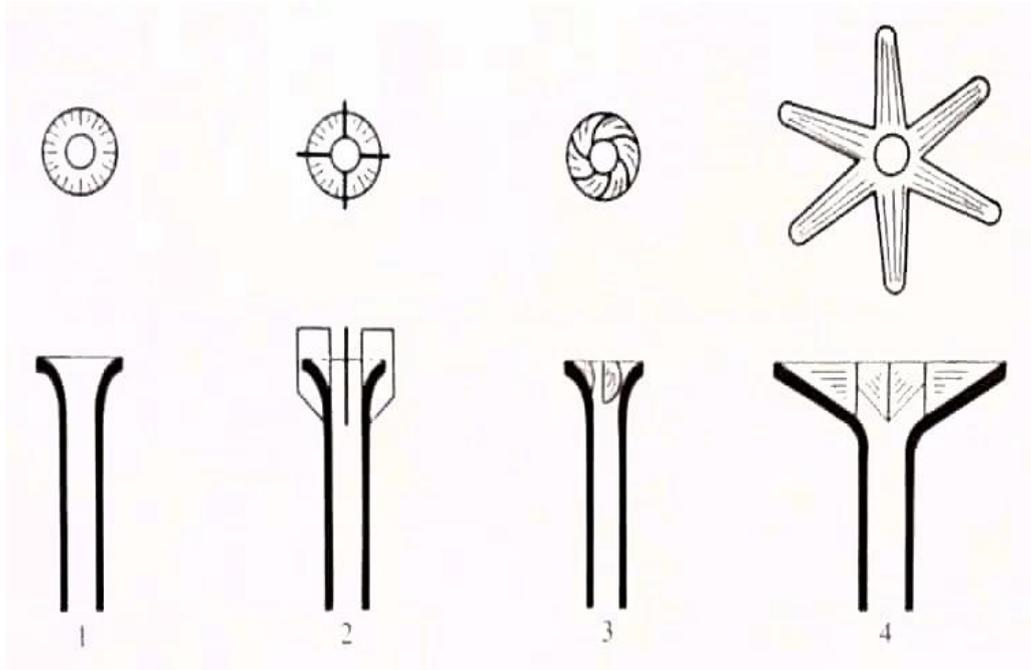


Figure (I.3) : Différentes formes de tulipes ou déversoir à crête non rectiligne. (Hager, 2009)

- Selon le type d'écoulement on distingue :

### I.3.1. Déversoir à écoulement radial

Pour un écoulement qui s'approche radialement du déversoir circulaire, on utilise la forme 1 (figure I.3). Un écoulement radial d'approche est garanti seulement si la charge sur le déversoir circulaire est faible et si la topographie de la retenue ne provoque pas une circulation à proximité de la tulipe (Hager, 2009).

### I.3.2. Déversoir à vortex

Dans le cas d'une circulation à proximité, l'écoulement s'approche de la tulipe tangentiellement comme un vortex, ce qui réduit fortement la capacité du déversoir circulaire (Hager, 2009). Ainsi que ce type de déversoir est la cause de vibration et le transport des bulles d'air. Mais si on sait comment bien l'utiliser (figure I.4), ce type de déversoir peut avoir une grande importance car il permet le transport de très grandes quantités d'eau de haute à basse élévation, et si on a une conduite verticale elle peut être aussi utilisée pour se débarrasser d'un trop-plein d'eau et tout cela sans le moindre effet secondaire (Khatsuria, 2005).

La formation de vortex peut être évitée en aménageant des piliers de guidage sur le déversoir circulaire selon la forme 2 (figure I.3). Les piliers de guidage garantissent un écoulement radial sur le déversoir mais réduisent sa longueur efficace. Dans les puits à vortex, la forme de ces piliers de guidage entraîne un écoulement rotationnel dans le puits cas de la forme 3 (figure I.3).

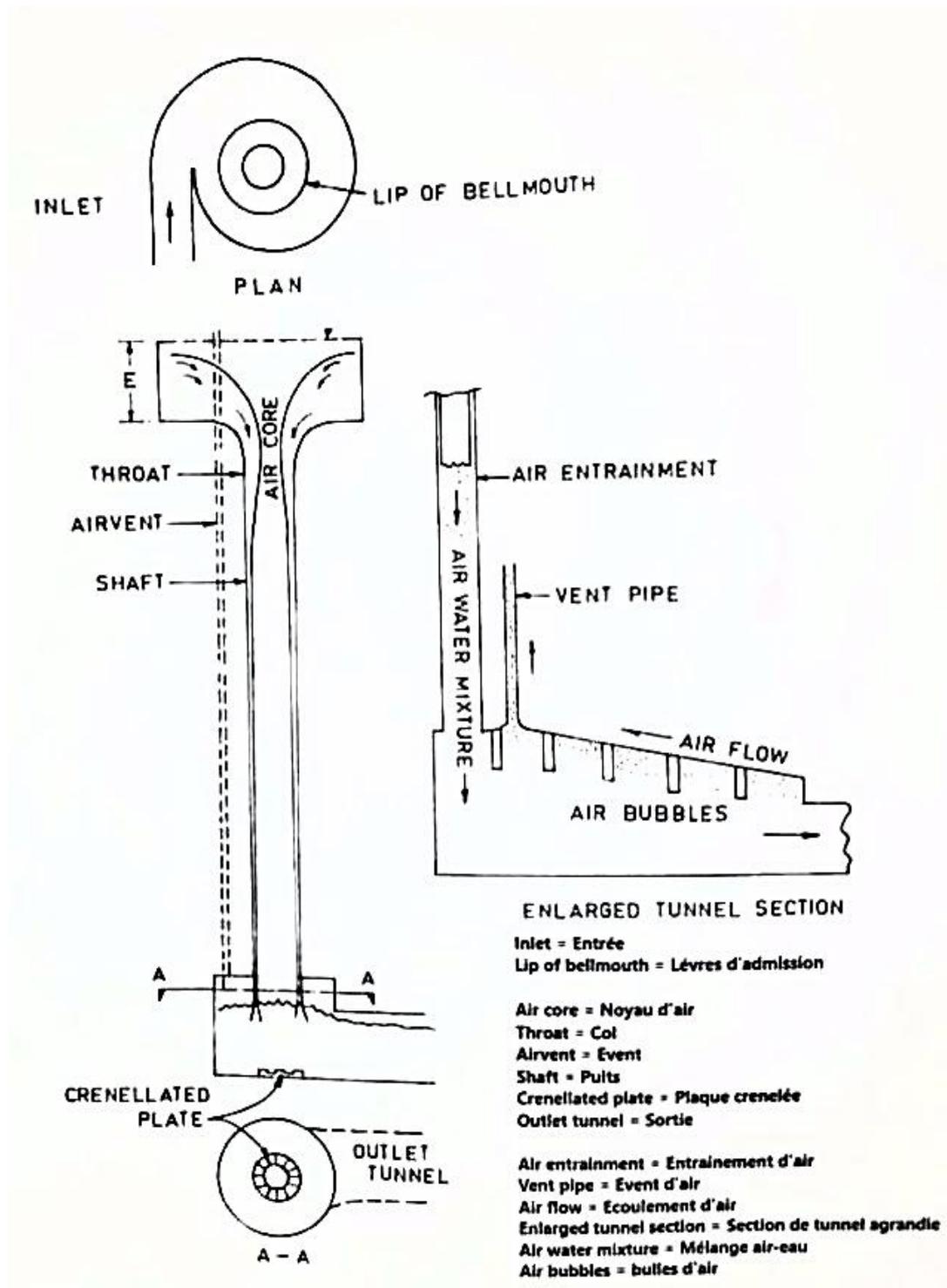


Figure (I.4) : Evacuateur à vortex (Khatsuria, 2005)

Pour augmenter la longueur du déversoir à crête non rectiligne, des évacuateurs en tulipe en forme de « bec de canard » ou « marguerite » ont été développés cas de la forme 4 (figure I.3). Les solutions réalisées dans la pratique montrent de nombreuses formes possibles (figure I.5) (Hager, 2009).

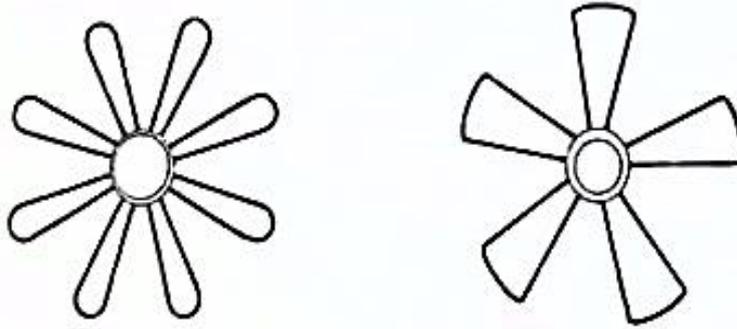


Figure (I.5) : déversoir à crête non rectiligne en forme de « bec de canard » ou « marguerite » utilisés avec les évacuateurs en tulipe (Hager, 2009)

### I.3.3. Déversoir à flux libre

On entend par là que l'eau va circuler librement dans l'évacuateur d'où le nom à flux libre, le déversoir comprendra deux tronçons une conduite et le tunnel, pour un débit faible un contrôleur est inclus dans le déversoir et la circulation se fera librement, par contre si jamais le débit augmente, la conduite pourrait subir une pressurisation alors que le tunnel restera dans un état de circulation libre jusqu'à la fin de l'écoulement. Son profil doit être conçu suivant les différents types de conception ci-dessous :

- Profil de crête
- Transition de la crête à la conduite
- Caractéristiques de décharge
- Entraînement de l'air dans la conduite
- Entraînement d'une partie de l'air dans le tunnel (Khatsuria, 2005)

### I.3.4. Déversoir en charge

Parfois dans le dimensionnement de ces évacuateurs, les tunnels peuvent avoir une forme courbée, et produire un écoulement à surface libre s'avère extrêmement difficile et très onéreux, donc pour éviter cela on basculera sur un écoulement en charge (figure I.6) à cause des nombreux avantages qu'il confère.

- Les conditions d'écoulement sont moins dépendantes des conditions de débitance à la sortie, ce qui n'est pas le cas pour un régime dénoyé ;
- Les conditions d'éboulement seront beaucoup plus tranquilles, et les vitesses sont plus basses en comparaison avec les écoulements à surface libre.

Les obstacles qu'on peut rencontrer avec ce type de déversoir se trouveront généralement dans les niveaux des aérations, et comme c'est un écoulement en charge il faudra prendre en considération la pression de l'écoulement, ce qui compliquerait la tâche de son

dimensionnement, sans oublier que son dissipateur d'énergie sera plus coûteux (Khatsuria, 2005).

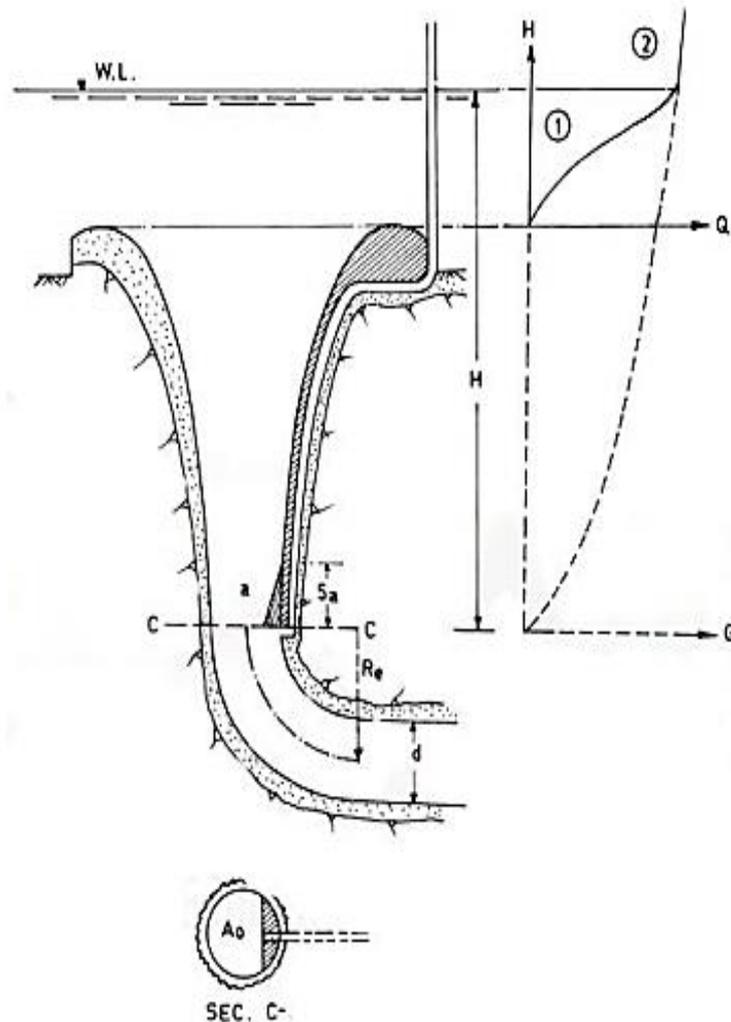


Figure (I.6) : Décharge par tunnel pressurisé (Khatsuria, 2005)

### I.3.5. Evacuateur avec écoulement tourbillonnant dans la galerie de sortie

Quand l'écoulement est axial il y a un risque d'endommagement par cavitation à cause des applications pour de grandes hauteurs ainsi qu'un coût très élevé pour le dimensionnement d'un dissipateur d'énergie et c'est pour ces raisons que les chercheurs ont développé des déversoirs en puits avec une décharge d'eau verticale (figure I.7) (c'est-à-dire, écoulement tournant ou écoulement tourbillonnant) pour résoudre ce type de problème. Le flux dans le tunnel tourne autour de l'axe longitudinal, le long de la périphérie interne du tunnel. En raison de l'action des forces centrifuges et de l'augmentation de la pression sur les parois du tunnel, le phénomène de cavitation est considérablement réduit et une dissipation d'énergie accrue est accomplie en raison du frottement avec la paroi (Khatsuria, 2005).

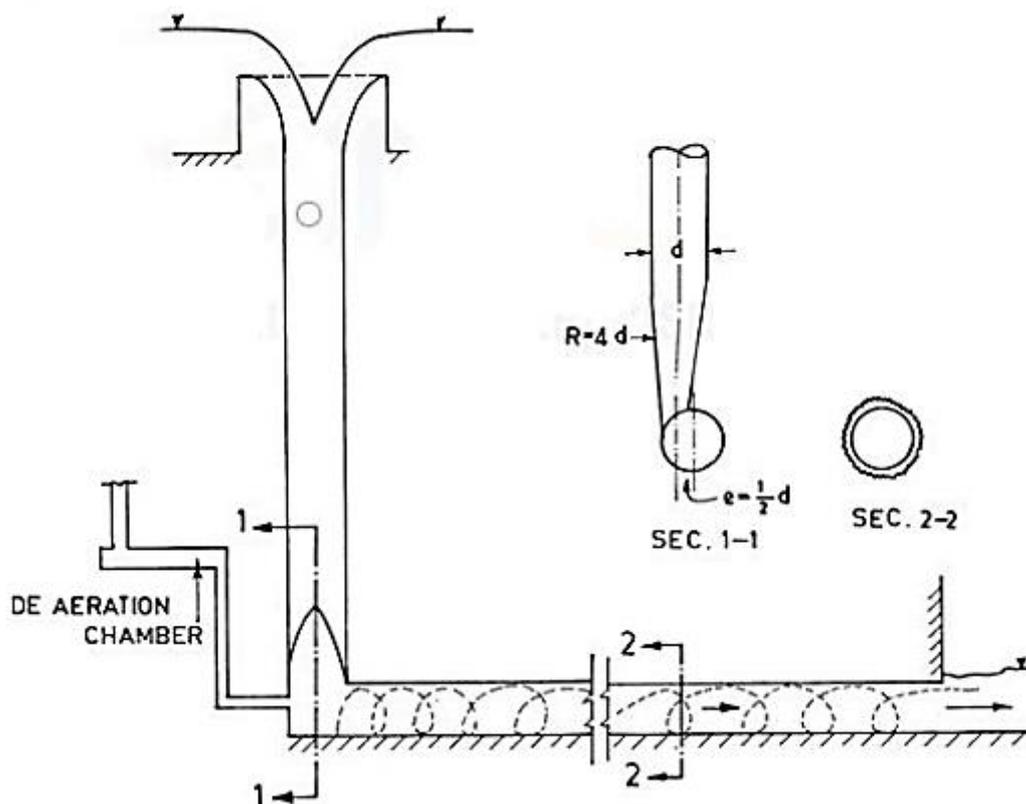


Figure (I.7) : Déversoir avec écoulement tourbillonnant dans la galerie de sortie (Khatsuria, 2005)

#### I.4. Fonctionnement d'un évacuateur de crue en puits

Le déversoir à crête circulaire nécessite une évacuation des eaux bien différentes de celle du déversoir à crête rectiligne. En effet, l'évacuateur en tulipe provoque tout d'abord un écoulement vertical. Pour le débit de dimensionnement, la lame d'eau déversante reste collée à la paroi du puits en laissant le noyau libre pour la circulation de l'air. Ainsi le débit est contrôlé par le déversoir (écoulement dénoyé). Etant donné la vitesse importante de cette lame d'eau, l'écoulement peut entraîner une quantité d'air considérable. L'air entraîné et l'air s'écoulant dans le noyau doivent être dérivés dans la galerie sans perturber l'écoulement de l'eau. Pour garantir un écoulement à surface libre dans l'ensemble de l'évacuateur, des dispositifs d'aération sont placés à l'entrée du coude. A l'aval du coude, situé au pied du puits, l'eau s'écoule à surface libre dans une galerie plus ou moins inclinée. La dissipation de l'énergie s'effectue par frottement dans le puits vertical et dans la galerie ou encore dans un ouvrage de dissipation d'énergie particulier placé à l'aval de la galerie.

L'écoulement par-dessus le déversoir circulaire doit être guidé dans la direction radiale au moyen de piliers placés sur le pourtour du déversoir. Sans ces dispositions particulières un écoulement rotationnel peut s'établir, ce qui provoque une diminution de la capacité, des

instabilités d'écoulements et des vibrations dangereuses de l'ouvrage. On peut considérer que l'écoulement radial présente une symétrie de rotation (Hager, 2009).

Le fonctionnement d'un évacuateur en tulipe est illustré par la figure (I.7)

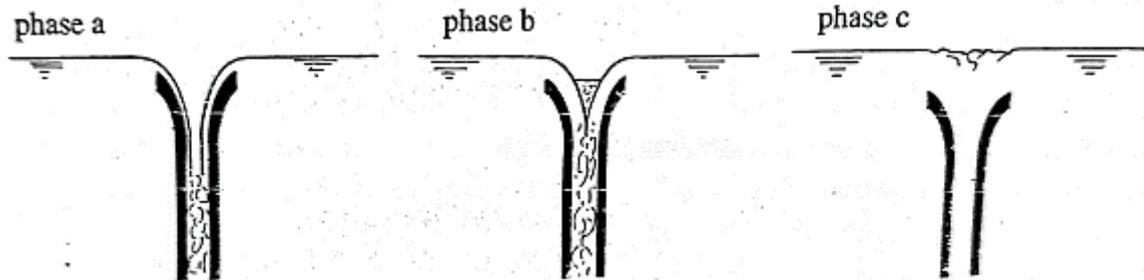


Figure (I.8) : Phases de fonctionnement d'un évacuateur en tulipe (Hager, 2009)

La phase a se caractérise par un écoulement dénoyé du déversoir. Dès que l'écoulement dans le puits se met en route, le déversoir devient partiellement noyé (phase b), et il devient complètement noyé si le débit augmente (phase c). (Hager, 2009).

#### I.4.1. Ecoulement à surface libre (régime dénoyé)

Dans ce type d'écoulement le débit qui sera évacué par l'ouvrage sera entièrement contrôlé par le seuil du déversoir et ce dit débit sera proportionnel à la puissance  $3/2$  de la charge qui se trouvera au-dessus du déversoir. La lame d'eau s'écoulera librement dans le puits, où l'évacuation de l'air s'effectuera dans le noyau central, en arrivant au coude qui est le lieu de violent remous à cause de l'impact des filets liquides avant de se diriger vers la galerie d'évacuation qui est le siège de l'écoulement à surface libre (Ouamane, 1995).

#### I.4.2. Ecoulement en charge (régime noyé)

Quand l'écoulement sera en charge, notre débit évacué sera contrôlé non pas par le seuil mais bien par la géométrie du puits car la charge sera supérieure à la charge de dimensionnement.

Ici l'écoulement recouvrira la totalité de la section du puits et l'eau remontera jusqu'à la surface, de ce fait notre ouvrage sera entièrement noyé par un plan d'eau quasi-horizontale. Le débit qui sera évacué dans ce type d'écoulement sera proportionnel à la moitié de la puissance de la charge ( $1/2$ ), et la galerie sera le siège d'un écoulement en charge en l'absence de déflecteur.

On remarquera que le type d'écoulement est en fonction de la charge. Si elle dépasse la charge de dimensionnement l'écoulement sera en charge et c'est la géométrie du puits qui va contrôler l'évacuation du débit, dans le cas contraire l'écoulement est à surface libre et c'est le seuil qui contrôlera l'évacuation du débit (figure I.9) (Gardel, 1949).

### I.4.3. Représentation graphique des modes d'écoulement

Dans cette partie, on va s'intéresser sur les graphiques qui caractérisent les écoulements décrits précédemment. Gardel a considéré le débit comme fonction de la charge amont, mesuré par rapport à la crête du déversoir, et grâce à ça il a réussi à concevoir des courbes caractéristiques de fonctionnement pour les évacuateurs de crues en puits.

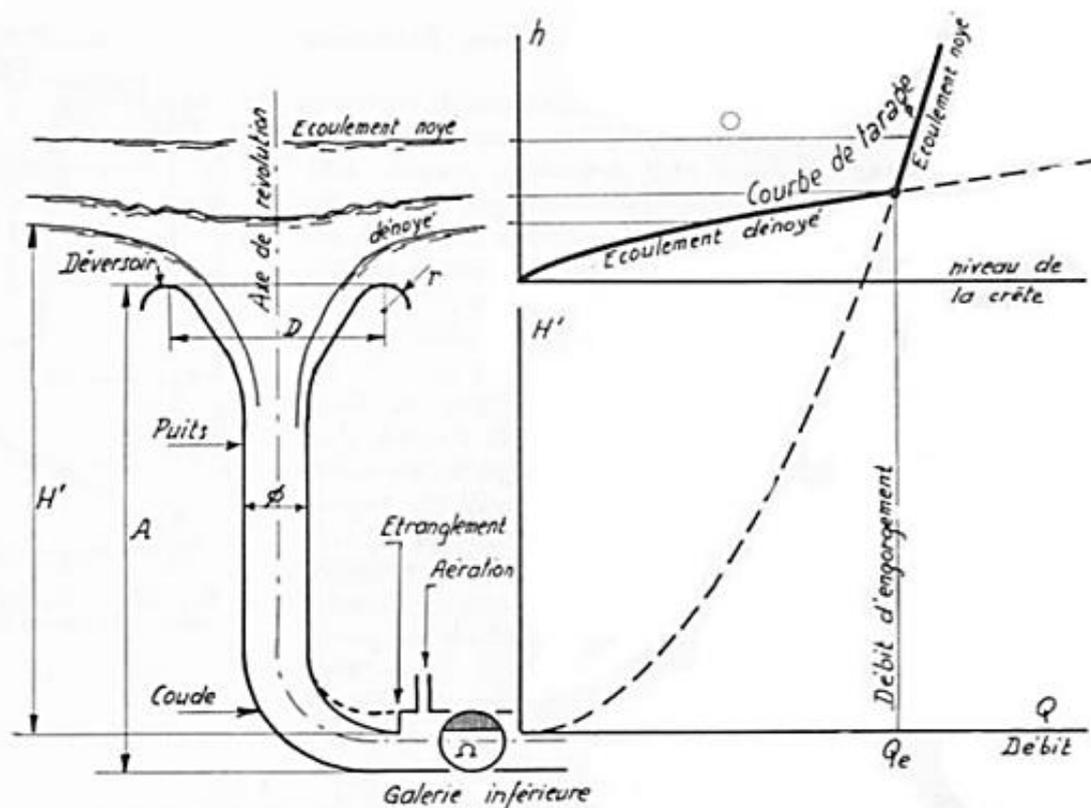


Figure (I.9) : Schéma de fonction et définition de la courbe de tarage (Gardel, 1949)

La figure ci-avant montre, la branche inférieure peu inclinée, correspond au mode d'écoulement dénoyé, cette branche est peu différente de la courbe caractéristique d'un déversoir rectiligne. La branche supérieure, très inclinée, définit les écoulements noyés, elle se confond avec la partie supérieure de la courbe que donnerait un orifice placé au bas de l'ouvrage.

L'intersection des deux branches, définit le point d'engorgement qui est la limite pratique des possibilités d'évacuation de l'ouvrage, une fois ce point est dépassé, l'écoulement passe de surface libre (dénoyé) à un écoulement en charge (noyé), car après ce point il aura un accroissement de la charge qui conduira automatiquement à une augmentation du débit.

Après plusieurs essais expérimentaux, les résultats ont montré que les deux types d'écoulement sont indépendants. Ainsi l'écoulement dénoyé n'est influencé que par des modifications faites au déversoir ou à l'amont de celui-ci (changement de profil de la crête, ou du diamètre du déversoir) (figure I.10), tandis que pour l'écoulement noyé, ne dépendra que

des conditions d'écoulement en charge, de ce fait la modification de la crête de déversoir ne change rien à ce mode d'écoulement (figure I.11) (Gardel, 1949).

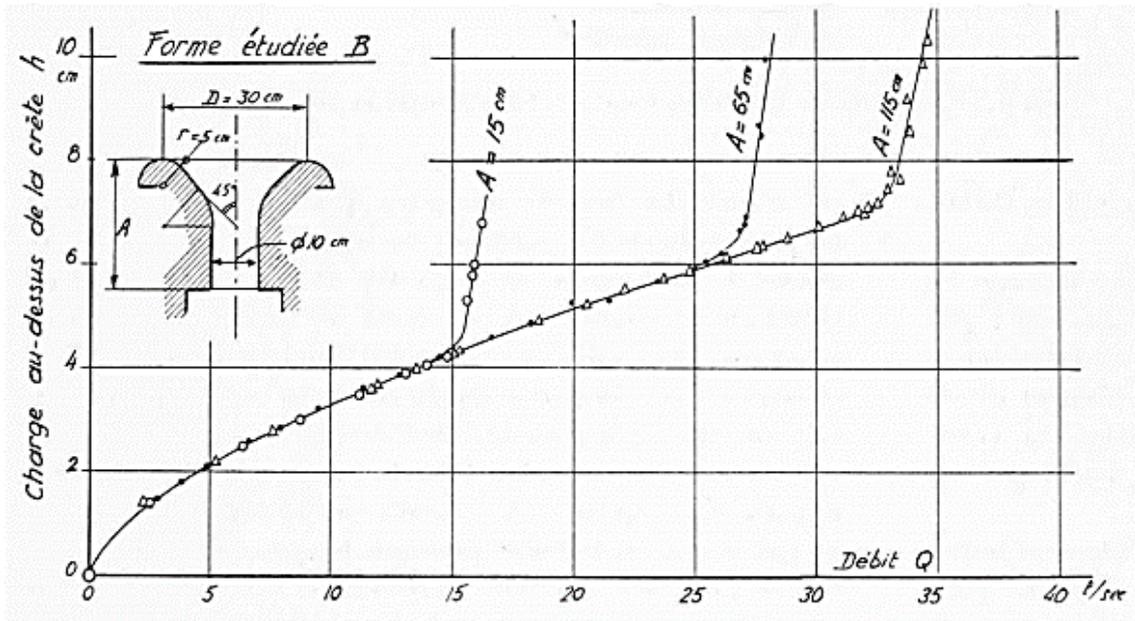


Figure (I.10) : Indépendance de l'écoulement dénoyé quant aux conditions aval (Gardel, 1949).

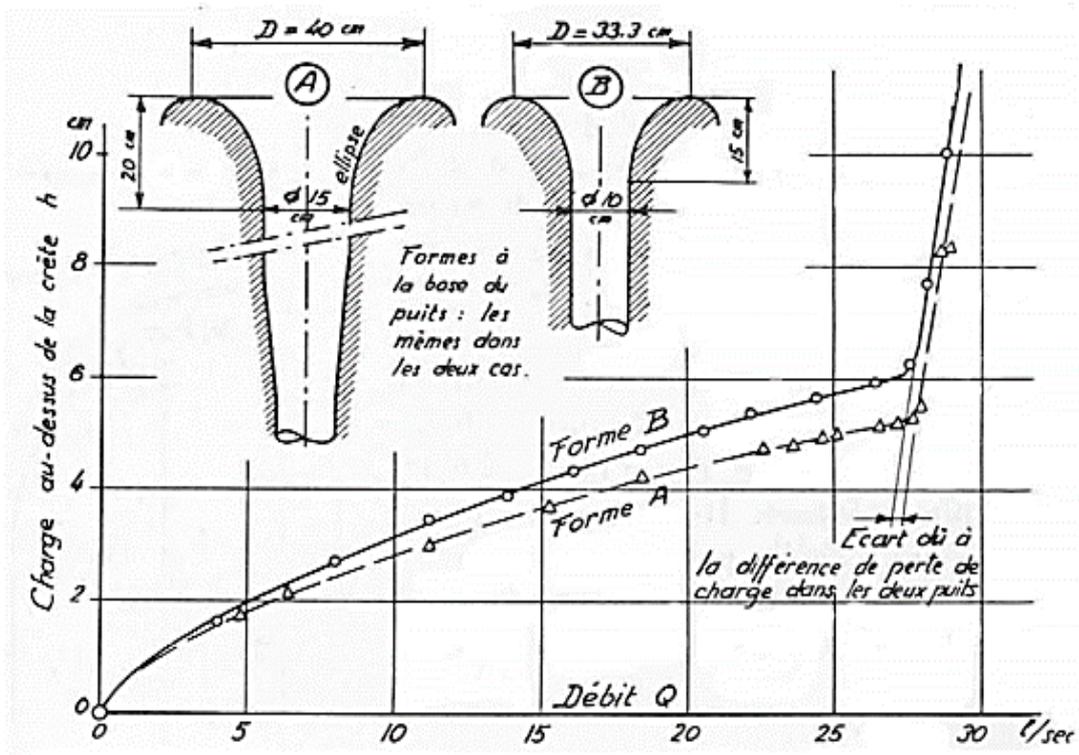


Figure (I.11) : Indépendance de l'écoulement noyé quant aux formes amont (Gardel, 1949).

### 1.5. Géométrie du déversoir circulaire

Lors de la conception d'un déversoir circulaire l'objectif principal est d'éviter l'apparition de dépression sous la nappe du jet ainsi que le passage vers un régime en charge ce qui provoquera un écoulement noyé.

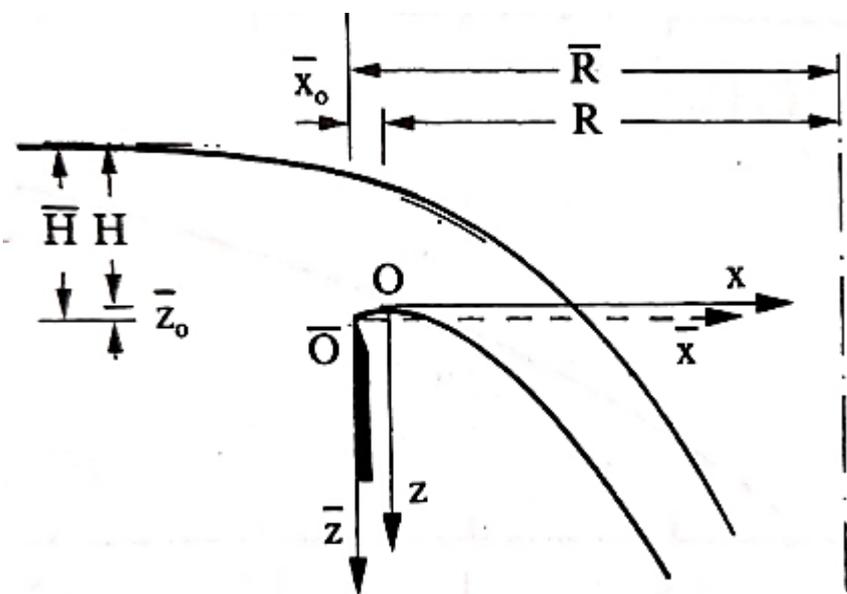
Les déversoirs en mince parois ont été utilisés comme base pour la conception des déversoirs en tulipe. Ce dernier correspond à un tube vertical de rayon  $\bar{R}$  dont l'extrémité amont possède une paroi mince (figure I.12). L'origine  $\bar{O}$  du système des coordonnées  $(\bar{x}, \bar{z})$  est placée à la crête de ce déversoir. Tous les quantités qui se réfèrent à cette origine sont surmontées d'une barre : la charge sur ce déversoir est donc  $\bar{H}$ .

Au coordonnées  $(\bar{x}_0, \bar{z}_0)$ , la nappe inférieure du jet présente un maximum. En plaçant un nouveau système de coordonnées  $(x, z)$  en ce point, et en supprimant les barres pour toutes les quantités qui se réfèrent à ce nouveau système, on obtient  $H = \bar{H} - \bar{z}_0$  pour la charge  $R = \bar{R} - \bar{x}_0$ .

Des essais sur modèle réduit fournissent avec  $\bar{X}_0 = \bar{x}_0/\bar{H}$  et  $\bar{Z}_0 = \bar{z}_0/\bar{H}$  les relations (Lazzari, 1954) :

$$\bar{X}_0 = 0,144 + 0,011/\bar{H}/\bar{R} \quad (I.1)$$

$$\bar{Z}_0 = 0,055 + 0,03/\bar{H}/\bar{R} \quad (I.2)$$



Figure(I.12) : Définition de la géométrie du déversoir circulaire à paroi mince (Hager, 2009).

Un arc de rayon de courbure relative, sera la représentation du tronçon amont de la limite inférieure du jet tel que :

$$\bar{r}/\bar{H} = (1/2)\left(\left(\bar{X}_0^2/\bar{Z}_0^2\right)/\bar{Z}_0\right) \quad (I.3)$$

Avec :  $0 < \bar{X} < \bar{X}_0$

Le tronçon sera déterminé par :

$$Z/\bar{H} = 0,608(x/\bar{H})^{1,80} \quad (I.4)$$

Avec  $\bar{H}$  comme la charge de dimensionnement par rapport à l'origine  $\bar{O}$ .

La relation expérimentale de Lazzari (1954) entre la charge  $\bar{H}$  et la charge de dimensionnement  $H_D$  est la suivante :

$$H_D/\bar{H} = 0,946 - 0,03\bar{H}/\bar{R} \quad (I.5)$$

Une fois  $\bar{H}$  et  $\bar{R}$  déterminés, le profil standard du déversoir circulaire est entièrement définie.

L'approche de Lazzari (1954) a été critiquée à cause de la restriction à un seul secteur du déversoir au lieu du déversoir entier en plan (Hager, 2009).

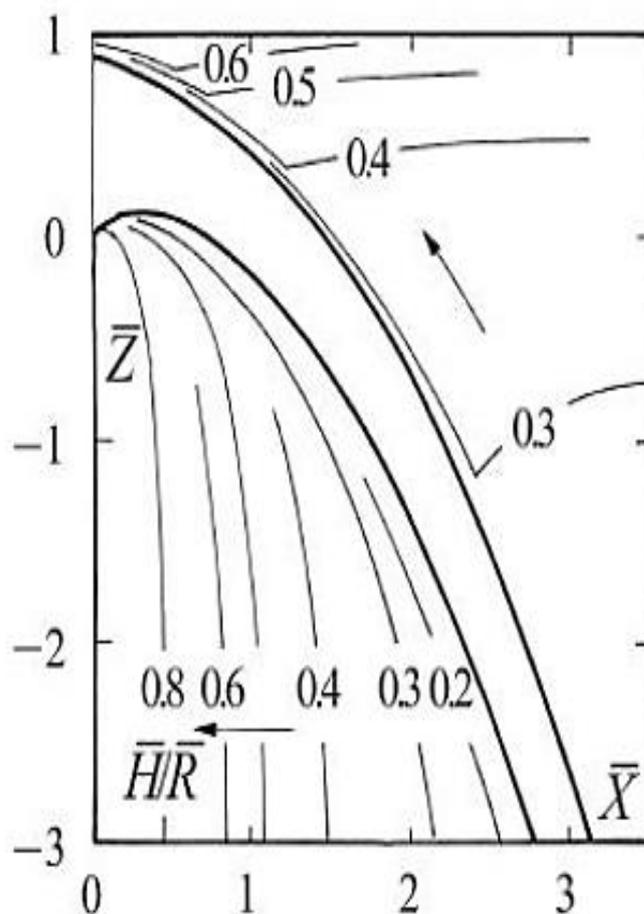
L'un des travaux les plus importants qui ont été réalisés dans ce domaine, fut accompli par Wagner (1956) qui a expérimenté sur un modèle, constitué d'une conduite verticale de 50,8cm de diamètre avec une aération complète, et les deux faces du jet sont soumises à la pression atmosphérique dans le but de déterminer une forme pour le profil du déversoir circulaire pour différentes valeurs de  $H/R$ , avec une reproduction qui se rapprochera le plus possible du profil de la nappe inférieure du jet. Il a réussi à démontrer que les deux profils du jet s'écoulent sur des déversoirs circulaires à crête mince avec des rayons différents en trouvant des similarités pour les valeurs du rapport de  $H_s/R_s$  (Wagner, 1956).

Quand les coordonnées  $(x, y)$  des deux profils de la surface des jets sont transformées en coordonnées adimensionnelles par rapport à la charge  $H_s(x/H_s, y/H_s)$  les courbes obtenues seront valables quel que soit les valeurs du rayon  $R$ , à condition d'avoir les mêmes valeurs pour le rapport  $H_s/R_s$  la figure (I.13) ci-après représente les deux profils.

Quand  $H_s/R_s = 0$ , le profil correspondant est celui d'un déversoir rectiligne.

A partir des expérimentations, Wagner (1956) a pu être établi :

- $H_s/R_s < 0,45$  : l'écoulement dans le déversoir sera libre.
- $H_s/R_s > 0,45$  : le déversoir commencera à se noyer ce qui résultera en une réduction brusque du coefficient du débit.



Figure(I.13) : Surface typique des nappes inférieures et supérieures en coordonnées adimensionnelles (Wagner, 1956).

D'après la figure(I.13), on observe que le profile a tendance à se rabaisser pour une augmentation de la charge (rapport  $H_s/R_s$ ), c'est ce qu'on observe uniquement chez les déversoirs rectilignes.

L'évacuateur fonctionne avec des charges qui sont inférieures à la charge de dimensionnement, en raison de ce qu'on a observé auparavant, ce qui créera des dépressions sous la nappe ce qui peut être assez problématique car aucune dépression ne peut être observée sur les modèles réduits.

« United States Corps of Engineers » (USCE, 1958) à développer une définition légèrement différente de la géométrie du déversoir circulaire pour divers valeurs de  $\bar{w}/\bar{R}$ ,  $\bar{w}$  étant la hauteur du déversoir (Hager, 2009).

L'origine des coordonnées adimensionnelles ( $X = x/H_D, Y = y/H_D$ ), coïncidera avec celle du point maximum du profil de la surface inférieure de la nappe (figure I.13).

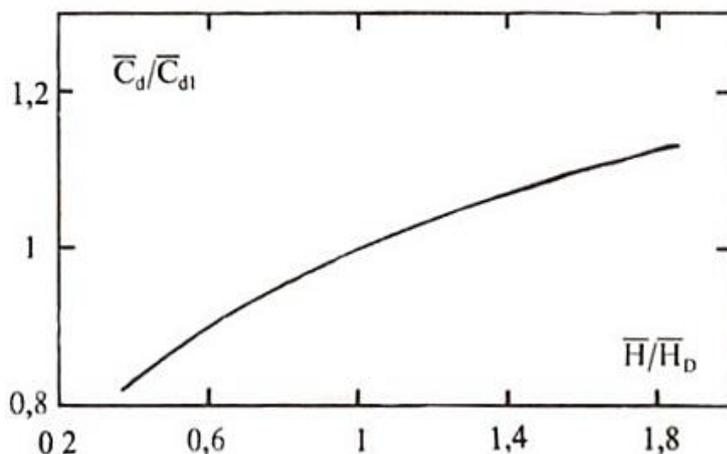


Figure (I.14) : Coefficient du débit  $\bar{C}_d / \bar{C}_{d1}$  en fonction de  $\bar{H} / \bar{H}_D$  (Hager, 2009).

Hager a proposé une autre géométrie pour le jet en généralisant le profil. Cela est possible si seulement si les coordonnées ont subi une deuxième transformation(en s’inspirant de la figure (I.13)). Il a proposé une approximation qui correspond au rapport entre les coordonnées du point max du profil d’un déversoir circulaire  $(\bar{X}_m, \bar{Z}_m)$  pour  $0,1 < H/R < 0,5$  et les coordonnées du point maximum du déversoir rectiligne  $(\bar{X}_{m0}, \bar{Z}_{m0})$  et pour cela des nouvelles variables ont été introduites tel que  $\alpha$  et  $\beta$  (Hager, 1990).

$$\alpha = \bar{X}_m / \bar{X}_{m0} = 1,04 - (0,03 \bar{H} / \bar{R}) \tag{I.6}$$

$$\beta = \bar{Z}_m / \bar{Z}_{m0} = 1,04 - (1,02 \bar{H} / \bar{R}) \tag{I.7}$$

En utilisant les lois (I.6) et (I.7), on procèdera à la deuxième transformation des coordonnées, on aura un profil semblable à celui d’un déversoir rectiligne.

$$X^* = X / \alpha \quad ; \quad Z^* = Z / \beta$$

En consultant la figure ci-après, on pourra représenter pour différentes valeurs du rapport  $H / R$ . Les profils de  $Z(x)$ , donneront :  $0,1 < H/R < 0,4$  ,  $X^* < 1,4$

Est si

$$X^* < 1,1 \text{ ou } X^* < 0,9, \quad H/R = 0,5 \text{ ou } 0,6$$

Pour les systèmes de coordonnées  $z(x)$  une approche analogique est nécessaire pour la représentation de la limite inférieure de jet  $Z^*(X^*)$  comme le montre la figure (I.13), Hager a pu déterminer le profil de la nappe inférieure du jet, par les relations suivantes (Hager, 1990) :

$$Z = -X \cdot \ln X \tag{I.8}$$

Pour  $X > -0,2828$

$$X = 1,3055 \cdot (X + 0,2828) \tag{I.9}$$

$$Z = 2,7050 \cdot (Z + 0,1316) \tag{I.10}$$

Grace à cette transformation des coordonnées linière dans le système  $(x; z)$  pour un déversoir rectiligne une approximation pour les valeurs de  $X < 0,8$  peut être faite tandis que pour un déversoir circulaire qui évolue dans un système  $(X^*, Z^*)$ , la relation (I.16) deviendrait :

$$Z^* = -(1 - Z_{m0})(X \cdot \ln X) / 2,917 \tag{I.11}$$

$$X = 1,305 \cdot X^* / (1 - Z_{m0}) \tag{I.12}$$

Ou  $(X_{m0}, Z_{m0}) = (0,25, 0,112)$  correspond au point maximum pour  $H/R$  tend vers 0.

On remplace  $(X_{m0}, Z_{m0})$  dans les relations (I.11) (I.12) pour obtenir :

$$Z = -0,3044 \cdot \beta \cdot (X \cdot \ln X) \tag{I.13}$$

Avec :  $X > 0$

$$X = 1,470 \cdot (X/\alpha) \tag{I.14}$$

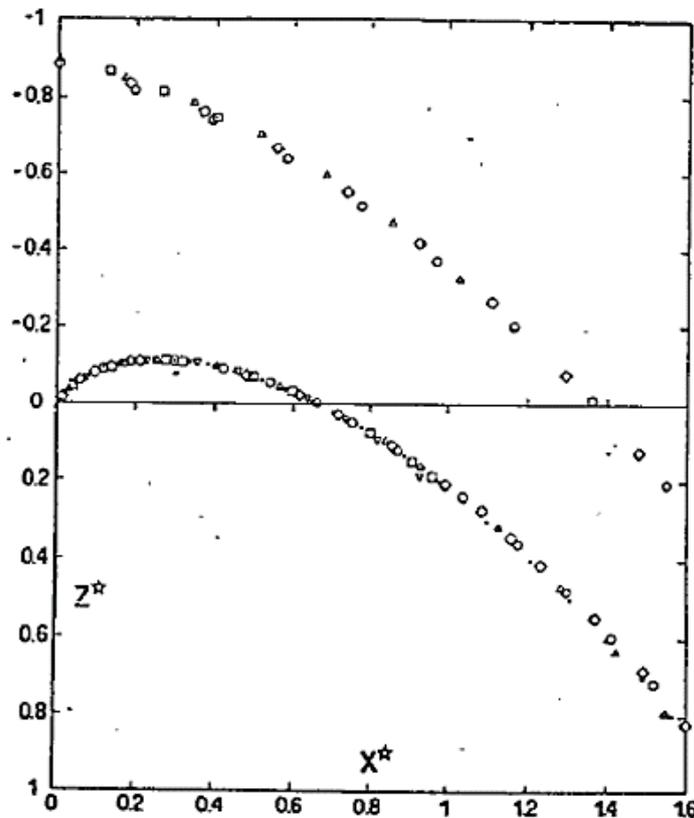


Figure (I.15) : limite du jet transformé  $Z^*(X^*)$  avec les mesure du Wagner pour différentes valeurs de  $H/R$  (Wagner, 1956)

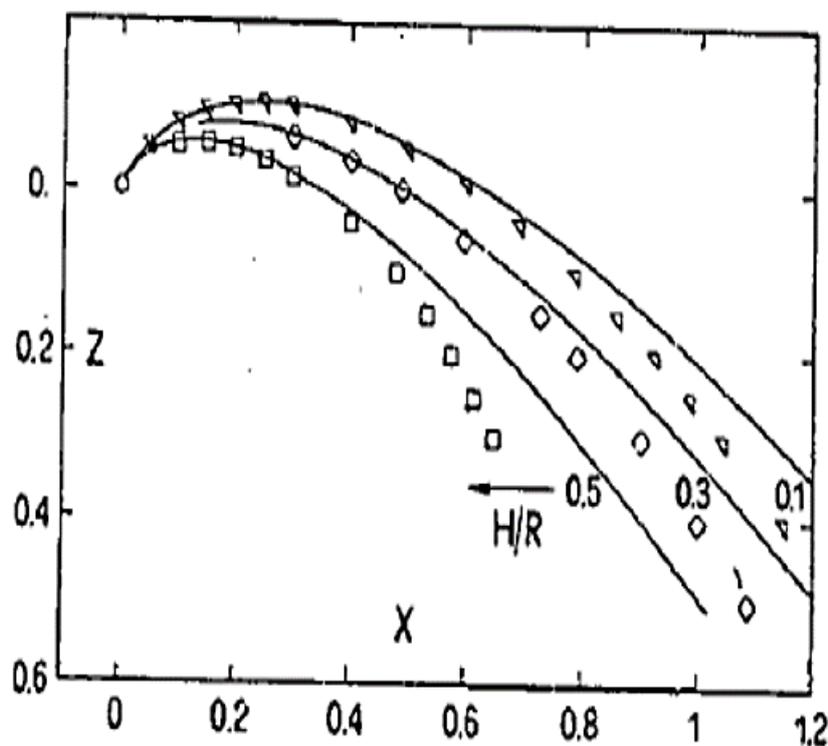


Figure (I.16) : comparaison entre les équations (I.13) et les mesures de Wagner (Wagner, 1956).

D'après l'équation (I.13), on constate qu'il n'y a aucune discontinuité dans le profil du déversoir de l'évacuateur, et toutes les valeurs de  $H/R$  se laissent convertir (figure I.16).

Quand on revient à la documentation soviétique (Ouamane, 1995) on constat que la théorie qui étudie la trajectoire d'une particule liquide qui tombe librement sous l'effet de son propre poids a été utilisée comme source de principale pour la détermination de la géométrie du déversoir circulaire.

On prend en considération une particule avec une vitesse incliné  $V_r$  d'un angle  $\alpha$  avec horizontale, on trouve l'équation de la trajectoire de cette particule comme suite :

$$y = \left( g \cdot x^2 / 2 \cdot V_r^2 \cdot \cos^2 \alpha \right) + tg \alpha \quad (I.15)$$

Si jamais l'angle d'approche est nul l'équation précédente devient :

$$y = g \cdot x^2 / 2 \cdot V_r^2 \quad (I.16)$$

La vitesse radiale peut être trouvée en suivant l'équation (I.15)

$$V_r = Q / 2 \cdot \pi \cdot R \cdot 0,75 \cdot H_0 \quad (I.17)$$

Et on pourra déterminer ainsi le profil du déversoir en suivant la méthode dite du filet centrale comme le montre la figure ci-après, ou l'origine des coordonnées se trouve sur le filet centrale ou  $h = h_0 = 0,75 \cdot H$ , donc  $h_0/2$  ou dessus de la crête.

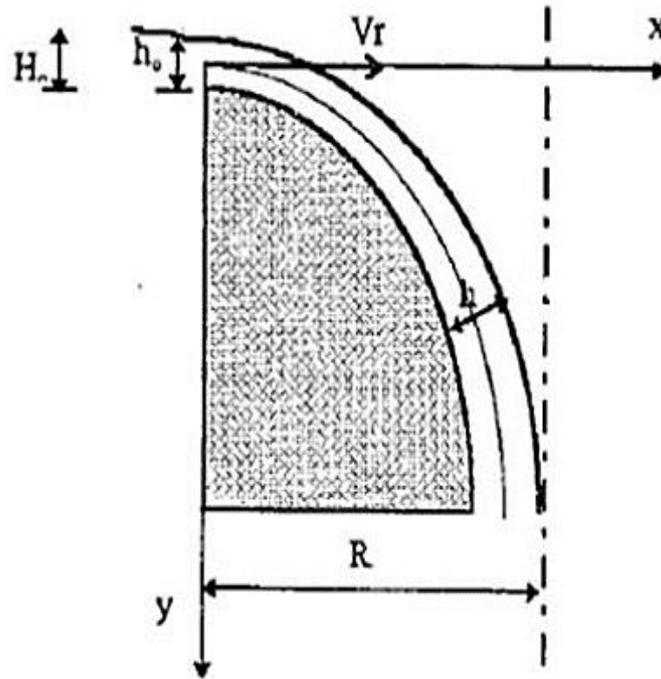


Figure (I.17) : Profil du déversoir circulaire tracé par la méthode du filet centrale (Ouamane, 1995).

## I.6. Evaluation du débit

### I.6.1. Écoulement dénoyé :

De ce qu'on a pu voir jusqu'à présent, on peut remarquer que les déversoirs à paroi mince qui ont servi à la base aux déversoirs à crête arrondie (Hager, 2009).

Quand le type d'écoulement est à surface libre on se retrouvera avec un écoulement dénoyé, et de ce qu'on a vu précédemment, on sait que le débit est sous l'influence du seuil de déversoir et qu'il dépendra de la charge d'eau  $H$  au-dessus de la crête. Poleni a déterminé une équation du débit tel que (Poleni, 1717) :

$$Q = C_D \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2} \quad (\text{I.18})$$

Où :

$C_D$  : Coefficient du débit

$L$  : Longueur de déversement (périmètre du puits)

$H$  : Charge d'eau au-dessus du seuil déversant

D'après l'équation (I.18), le seul inconnu est le coefficient du débit  $C_D$  et pour le déterminer, plusieurs chercheurs ont tenté de trouver une expression générale en fonction de la charge  $H$ .

L'approche de Gardel, se basait sur une comparaison entre un déversoir circulaire et son homologue rectiligne. Il a commencé sa démarche en considérant un déversoir rectiligne du même profil en travers et de largeur égale au développement d'un déversoir circulaire, il justifiera cette égalité que du fait qu'un écoulement en largeur constante est dépourvu de perte de charge, la section critique qui déterminera le débit se situera dans la crête, et c'est ainsi qu'il déterminera un coefficient qu'il nommera 'f' et celui-ci désignera le rapport du débit des deux déversoirs quand ils fonctionneront avec la même charge, (figure I.18) (Gardel, 1949).

Gardel a caractérisé le profil circulaire avec le rapport  $(r/D)$  où :

$r$  : Rayon de courbure de la crête du déversoir.

$D$  : Le diamètre du déversoir.

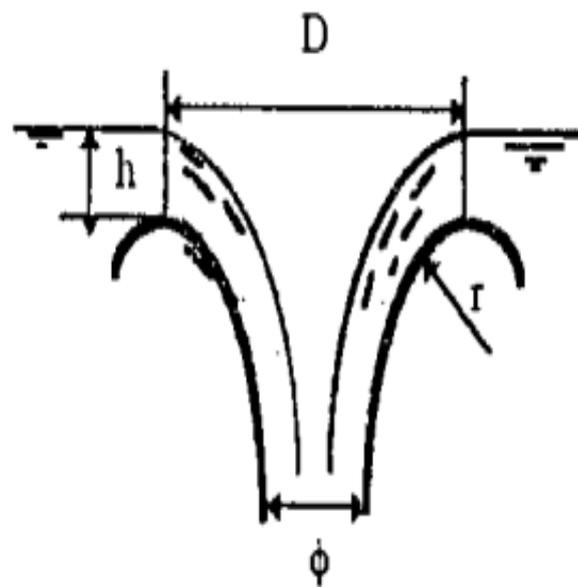


Figure (I.18): Déversoir circulaire (Ouamane, 1995).

On pourra alors formuler la relation suivante :

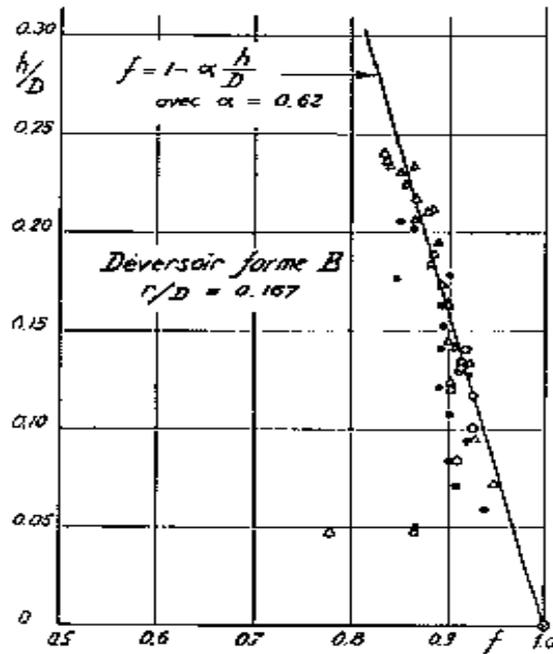
$$Q_{dev-cir} = f \cdot Q_{dev-rec} = m \cdot \pi \sqrt{2g} \cdot H^{3/2} \cdot f(h/D, r/D) \quad (I.19)$$

Où :

$h$  : Charge d'eau sur le déversoir,

$m$  : Coefficient du débit du déversoir rectiligne qui est déterminé par la relation de Fawer (1937)

$$m = 0,385 + 0,085 \cdot h/r - 0,01 \cdot (h/r)^2 \quad (I.20)$$



Figure(I.19) : Diminution Du débit en fonction de la hauteur  $h/D$  de la charge amont (Gardel, 1949).

On remarque que la courbe ci-dessus est assez similaire à une droite, et vu que les études qui en porté sur ces déversoirs ont donné la même forme que celle qui se trouve dans le schéma pour l'allure de la fonction  $f(h/D)$  alors on peut l'exprimer de la manière suivante :

$$f = 1 - \alpha h/D \tag{I.21}$$

Où :

$\alpha$  : Coefficient qui caractérise l'influence du profil en crête

Gardel avait représenté les variations de  $\alpha$  en fonction du rayon relatif ( $r/D$ ) grâce à ces essais expérimentaux (figure I.20) ce qui a donné :

$$\alpha = 0,3 + 2,5(r/D) \tag{I.22}$$

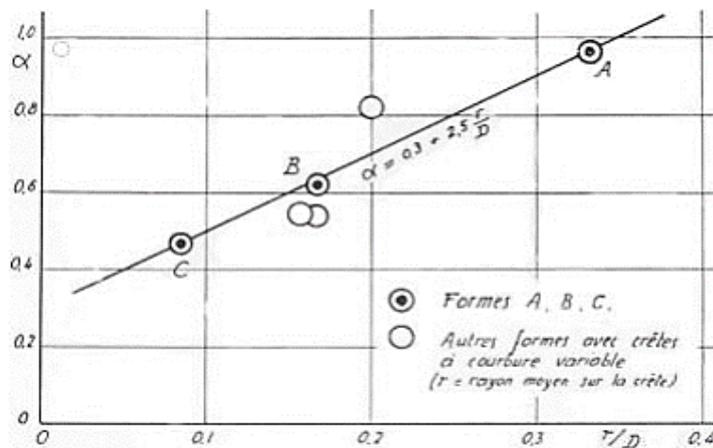


Figure (I.20) : Effet du rayon de courbure de la crête sur le débit (Gardel, 1949).

Pour une charge  $H = H_D$ , il existe une géométrie unique de la crête pour laquelle la pression sur le fond devient égale à la pression atmosphérique (Hager, 2009). Sur le déversoir circulaire à mince paroi,  $\bar{H} = \bar{H}_D = H_D + \bar{z}_0$  qui sert à la base pour les calculs ultérieurs.

Le débit  $Q$  en fonction de la charge  $\bar{H}$  par rapport à la crête du déversoir circulaire à paroi mince (figure I.12), exprimé avec le coefficient du débit  $\bar{C}_d$  par la formule suivante :

$$Q = \bar{C}_{d1} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2} \quad (I.23)$$

Le coefficient dépend de la géométrie du déversoir  $\bar{H}_D/\bar{R}$  et de la charge normalisée  $\bar{H}/\bar{H}_D$ . Pour la valeur  $\bar{H}/\bar{H}_D = 1$ , Lazzari (1954) trouve :

$$\bar{C}_{d1} = 0,371 \cdot (\bar{H}_D/\bar{R})^{-0,05} \quad (I.24)$$

D'après la figure (I.14) dans laquelle le rapport  $\bar{C}_d/\bar{C}_{d1}$  et  $\bar{H}/\bar{H}_D$  est représenté selon les essais de Lazzari, on peut poser  $\bar{C}_d/\bar{C}_{d1} = (\bar{H}/\bar{H}_D)^{1,5}$ , alors :

$$\bar{C}_d = 0,371 [(\bar{R}/\bar{H}_D) \cdot (\bar{H}/\bar{H}_D)^4]^{1/20} \quad (I.25)$$

L'expression précédent est vérifiée sur modèle réduit pour :

$$0,1 \leq \bar{H}_D/\bar{R} \leq 0,4 \quad \text{Et} \quad 0,4 \leq \bar{H}/\bar{H}_D \leq 1,85$$

Les indications ci-dessus se réfèrent à la charge de dimensionnement  $\bar{H}_D$  au lieu de  $H_D$  et sur  $\bar{R}$  au lieu de  $R$ . Afin d'obtenir une relation entre les quantités qui se réfèrent à la crête arrondie, on écrit :

$$Q = C_d \cdot 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2} \quad (I.26)$$

White et Mc Pherson (1956) ont émis à l'encontre de Wagner (1956) certaines critiques en ce qui concerne le coefficient du débit qui dépendra du rapport  $H/R$ , du nombre de Reynolds ( $R_e$ ) ainsi que du nombre de Weber ( $W_e$ ) ce qui donnera :

$$C_d = f_1(H/R, R_e, W_e) \quad (I.27)$$

Avec :

$$R_e = (g \cdot H^3)^{1/2} / \nu \quad \text{Et} \quad W_e = \rho \cdot g \cdot H^2 / \sigma$$

$\nu$  : viscosité cinématique du fluide ( $m^2 \cdot s^{-1}$ ).

$\rho$  : Masse volumique du liquide ( $Kg/m^3$ ).

$\sigma$  : Tension superficielle du liquide ( $N/m$ ).

Quand le liquide est de l'eau, le coefficient du débit  $C_d$  n'est en fonction que du rapport  $H/R$  et de la charge  $H$ , ça donne :

$$C_d = f_2(H/R, H) \quad (I.28)$$

Après plusieurs expériences sur une dizaine de déversoirs en puits avec des diamètres variantes de 6 à 91 cm on trouve qu'en fin de compte le coefficient de débit  $C_d$  n'est en fonction que du rapport  $H/R$ , de ce fait White Mc Pherson à proposer la relation suivante :

$$C_d = 0,384(H/R)^{-0,04} \quad (I.29)$$

La relation précédente n'est valable que pour l'intervalle,  $0,06 < H/R < 0,6$  et  $H < 3m$ .

Wagner (1956) a émis l'hypothèse que le calcul relatif aux déversoirs à paroi mince se fera seulement en tenant compte de la charge  $H_s$  au-dessus du seuil et non pas de la charge  $H_o$  au-dessus de point d'élévation du point maximal de la surface intérieure de la nappe (voire la figure I.21) (Wagner, 1956).

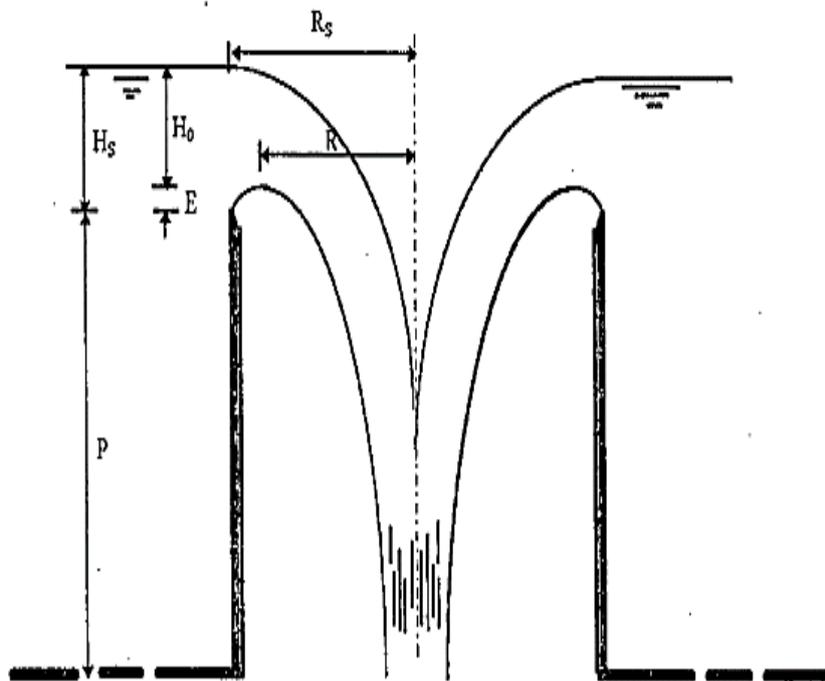


Figure (I.21) : Déversoir circulaire à mince paroi (Ouamane, 1995).

Le terme qui fut trouvé d'après la figure (I.21) est :

$$H_s = H_o + E \quad (I.30)$$

E : élévation maximale de la surface inférieure de la nappe par rapport à la crête.

Wagner a trouvé que l'élévation maximale relative est donnée par le rapport :

$$E/H_s = Y_{mac}/H_s \quad (I.31)$$

Le débit sera donné par la relation :

$$Q = C_d \cdot \sqrt{2g} \cdot L \cdot H^{3/2} \quad (I.32)$$

$C_d$  et  $H_s$  sont des inconnus.

La méthode utilisée pour résoudre l'équation (I.31) est celle des approximations successives, pour pouvoir diminuer le nombre d'inconnus, et pour cela un débit qu'est en fonction de  $H_s / R_s$  a été pris.

$$Q = C_d \cdot 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2} \quad (I.33)$$

Ou bien

$$H_s/R_s = 2 \cdot \pi \cdot (C_d \cdot \sqrt{2g} \cdot H_s^{3/2} / Q) \quad (I.34)$$

Indelkoffer (1977) a proposé une formule explicite pour le coefficient du débit d'un déversoir circulaire à crête arrondie (Hager, 2009) :

$$C_d = \frac{2}{3} \cdot 0,5774 \cdot \left( 1 + a_1 \frac{H}{H_D} + a_2 \left( \frac{H}{H_D} \right)^2 \right) \quad (I.35)$$

Pour  $H/H_D = 1$ , le coefficient de débit  $C_{dD}$  en fonction de la charge relative  $H/R$  devient selon Indelkoffer (2006) :

$$C_{dD} = \frac{2}{3} \left( 0,741 - 0,25 \left( \frac{H}{R} \right)^{2,4} \right) \quad (I.36)$$

La formule (I.36) est valable pour  $0 \leq H/R \leq 0,51$ .

Par analogie avec l'équation (I.18), Hager (1990) a déterminé l'équation (I.23) du débit pour un évacuateur en puits (Hager, 1990).

Le rapport des deux équations cité ci-dessus (figure I.22) va donner

$$\bar{C}_d / \bar{C}_{d1} = (R/\bar{R}) (H/\bar{H})^{3/2} \quad (I.37)$$

Pour réussir à développer théoriquement l'équation (I.37) les paramètres  $R/\bar{R}$ ,  $H/\bar{H}$ ,  $X_m$ ,  $Z_m$  ont été utilisée comme suit :

$$X_m = x_m/H \text{ et } Z_m = z_m/H$$

avec : 
$$\bar{H}/H = 1 - Z_m \tag{I.38}$$

$$\bar{R}/R = 1 - X_m(H/R) \tag{I.39}$$

$$\bar{H}/\bar{R} = (1 - Z_m) / ((H/R)^{-1} - X_m) \tag{I.40}$$

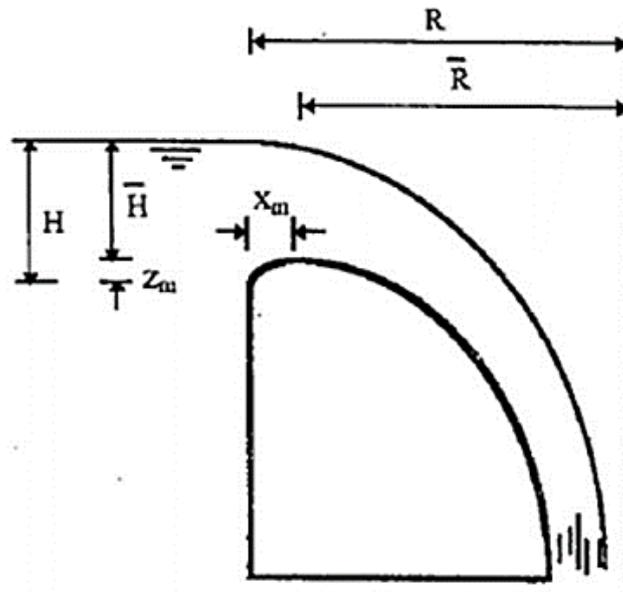


Figure (I.22) : Caractéristiques géométriques du déversoir circulaire (Ouamane, 1995).

L'équation (I.40) ne dépend que de  $H/R$  et de ce fait on peut l'écrire sous la forme :

$$\bar{H}/\bar{R} = 1,06 \cdot (H/R)^{1,01} \tag{I.41}$$

En remplaçant l'équation (I.29) dans (I.40) on obtiendra un coefficient de débit tel que :

$$\bar{C}_d = 0,384 \cdot (H/R)^{-0,04} \cdot (R/\bar{R}) (H/\bar{H})^{3/2} \tag{I.42}$$

Pour obtenir le coefficient du débit, on utilisera maintenant les approximations de HAGER (1990) qui dépendent du rapport  $\bar{H}/\bar{R}$  :

$$\bar{C}_d = 0,515 \cdot (1 - 0,2 \cdot (\bar{H}/\bar{R})) \tag{I.43}$$

Pour  $0,2 < \bar{H}/\bar{R} < 0,6$

Le graphique ci-dessous (figure I.23) a été réalisé dans le but de comparer les résultats des équations (I.42), (I.43) et les mesures d'Indelkoffer(1977).

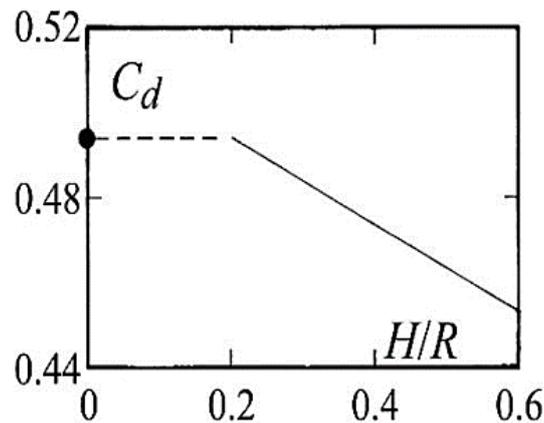


Figure (I.23) : Comparaison des résultats des équations (I.45) (I.46) et les mesures de Indelkoffer(1977).

Grâce à la documentation soviétique (Ouamane, 1995) l'écoulement dans l'évacuateur de crue en puits sera dénoyé pour  $H_o \leq 1$ , donc le débit nous sera présenté par la relation :

$$Q = \varepsilon \cdot C_d \cdot L \cdot (2g)^{3/2} \quad (I.44)$$

$$L = 2 \cdot \pi \cdot R - n_o \cdot S$$

$n_o$  : Nombre de piliers ;

$S$  : Epaisseur d'un pilier ;

$\varepsilon$  : Coefficient de contraction ;

Dans ce cas pour la détermination du coefficient du débit on utilisera la formule de Romanienko:

$$C_d = 0,49 - \left(0,068 \left(H_o' / R\right)^{1/2}\right) - 0,03 \left((P/R)^{3/2}\right) \quad (I.45)$$

$H_o'$  : Charge de dimensionnement (ici  $H_o'$  est une charge quelconque sur le déversoir)

$P$  : Hauteur de l'évacuateur (hauteur de pelle).

L'équation (I.45) est valable dans la gamme :  $0,2 \leq H_o' / R \leq 0,38$  et  $0 \leq P/R \leq 1$ .

## I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, on a essayé de donner une description générale sur un évacuateur de crue en puits ainsi que ces différents types existants et aussi son mode de fonctionnement tout en intégrant les différentes recherches et aboutissement qu'ont été faite pour le dimensionnement idéal de l'ouvrage.



## CHAPITRE II

## Etude théorique du profilage de la tulipe

### II.1. Introduction

Ce chapitre focalisera sur les méthodes théoriques du profilage de la tulipe d'un évacuateur de crue en puits en régime dénoyé.

Dans un premier temps nous discuterons sur la méthode théorique des potentiels des vitesses, ensuite nous traiterons la théorie balistique pour les deux cas d'écoulement (sans frottement et avec frottement fluide laminaire), qui servira à l'étude de la méthode théorique simplifiée (trajectoire du filet central).

### II.2. Méthode théorique du potentiel des vitesses

On considère l'écoulement plan d'un fluide idéal incompressible dans un déversoir à puits axisymétrique, chaque particule liquide est affectée par la force de gravité et la force de trainée (figure II.1.a).

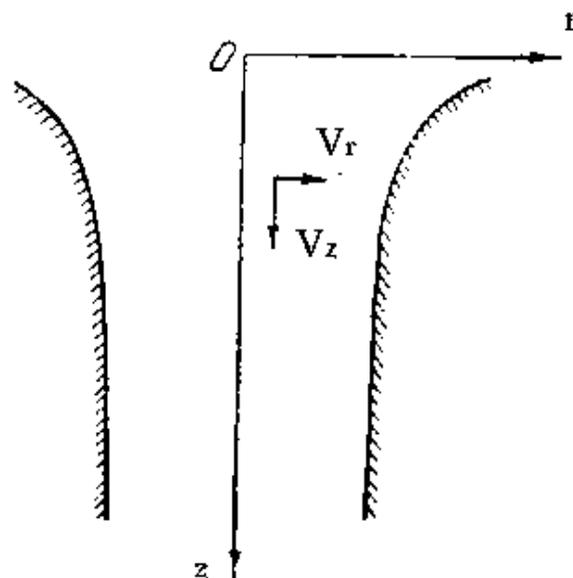


Figure (II.1.a) : schéma représentatif d'un déversoir plan axisymétrique (Sanoyan et Khublaryan, 1960).

Après application de deuxième principe de Newton pour une particule située sur l'axe de puits, on obtient l'équation suivante :

$$\frac{d^2 z}{d t^2} = g - kv^2 \quad (\text{II.1})$$

Ou bien 
$$v \frac{dv}{dz} = g - kv^2 \tag{II.2}$$

La solution de ces équations différentielles sous les conditions aux limites ( $z = 0, v = 0$ ) et ( $z = \infty, v = v_0$ ) est :

$$v = v_0 \sqrt{1 - e^{-\frac{2g}{v_0} \cdot z}} \tag{II.3}$$

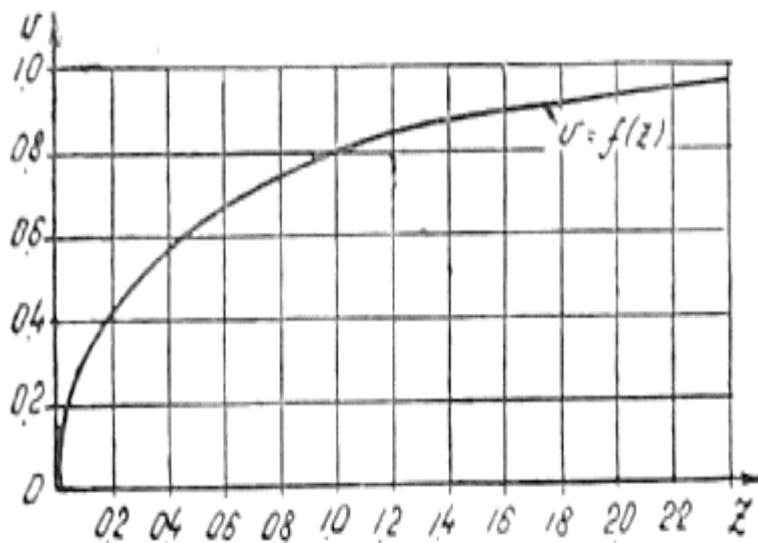


Figure (II.1.b) : Distribution des vitesses le long de l'axe de déversoir (Sanoyan et Khublaryan, 1960)

L'équation de Laplace du potentiel des vitesses sans l'écoulement vortex de fluide est la suivante :

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( r \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = 0 \tag{II.4}$$

Où : r et z : sont les coordonnées cylindriques.

$\varphi$  : le potentiel des vitesses est exprimé par la formule suivante :

$$\varphi = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \varphi_0 (z + i \cdot r \cdot \cos \omega) \cdot d\omega \tag{II.5}$$

$\omega$  : L'angle azimutal.

$\varphi_0$  : Le potentiel des vitesses pour r = 0.

Les composantes longitudinale et radiale de la vitesse seront :

$$V_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \varphi_0' (z + i \cdot r \cdot \cos \omega) \cdot d\omega \tag{II.6}$$

$$V_r = \frac{\partial \varphi}{\partial r} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \varphi_0'(z + i \cdot r \cdot \cos \omega) \cdot \cos \omega \cdot d\omega \quad (II.7)$$

Avec les composantes des vitesses, il est facile de déterminer la fonction de courant  $\psi$  qui admit une solution analytique tel que :

$$\psi = \frac{r^2}{2} - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n-1)}{((n+1)(n+1)) \cdot 2^{n+1}} \cdot e^{-(n+1)z} \cdot r \cdot J_1[(n+1) \cdot r] \quad (II.8)$$

$J_1$ : La fonction de Bessel de premier ordre.

La figure (II.2) montre la dépendance de la fonction de courant  $\Psi$  sur  $r$  pour divers  $z$ .

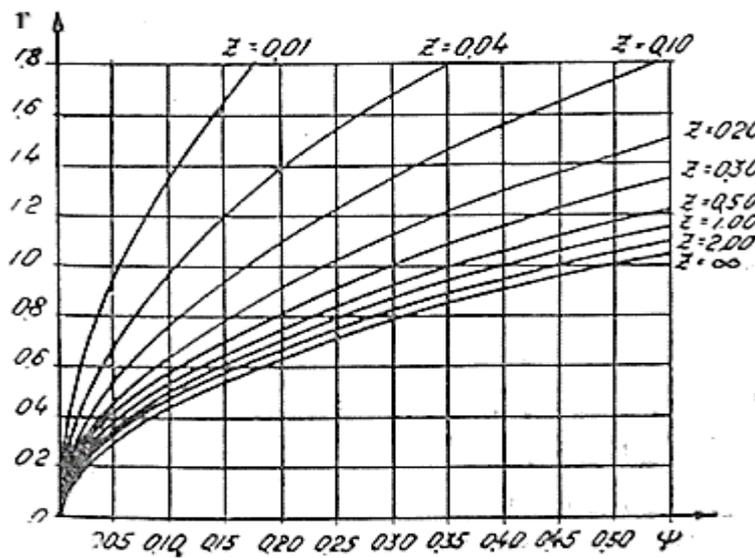


Figure (II.2) : le graphe de la fonction de courant  $\Psi$  sur  $r$  pour divers  $z$  (Sanoyan et Khublaryan, 1960).

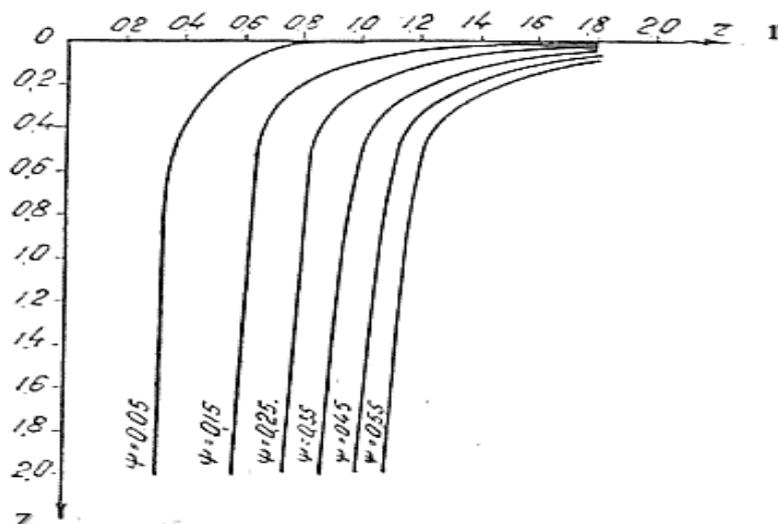


Figure (II.3) : Les contours théoriques des profils de déversoir (Sanoyan et Khublaryan, 1960).

La figure (II.3) montre que le profil de déversoir est exprimé pour  $\psi = \text{constante}$ .

Plusieurs chercheurs ont tenté de trouver le profil d'un déversoir en puits, en faisant des études expérimentales ou bien théoriques comme montre la figure (II.4).

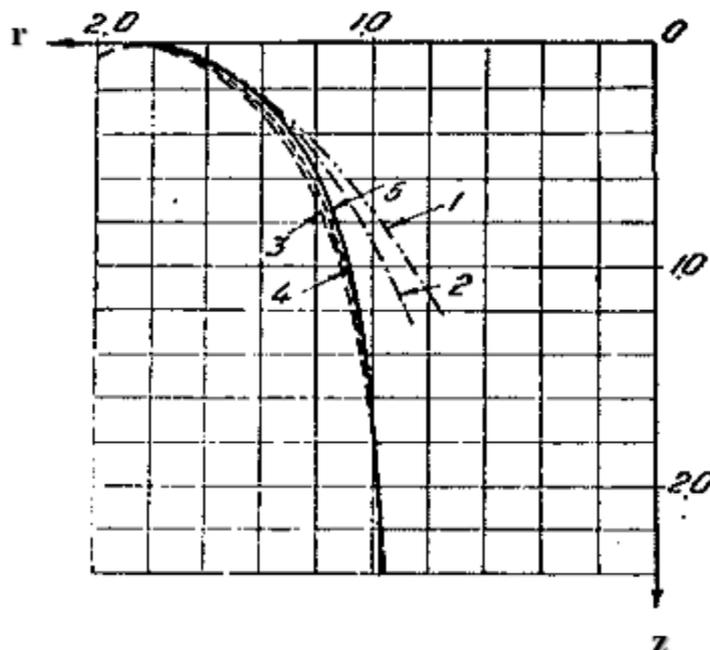


Figure (II.4) : les courbes caractéristiques des profils théoriques et expérimentaux (Sanoyan et Khublaryan, 1960)

Avec :

- 1 : Profil de Creager théorique.
- 2 : Profil de Bazin théorique.
- 3 : Profil de Wagner expérimental.
- 4 : Profil de V.G.Skriga expérimental.
- 5 : Profil théorique selon la méthode hydrodynamique du potentiel des vitesses.

D'après la figure (II.4), on remarque qu'il y a un accord entre le profil trouvé par Sanoyan et Khublaryan (théorie des potentiels des vitesses) et ceux trouvés par d'autres chercheurs.

La méthode théorique simplifiée besoin de déterminer l'équation de la trajectoire du filet central, et pour cela on fait appel à l'étude de la théorie balistique qui va permettre de déterminer l'équation du mouvement d'un projectile pour les deux cas (sans frottement et avec frottement fluide laminaire).

## II.3. Théorie balistique

### II.3.1. Définition

Le mouvement de projectile, ou mouvement de balistique, est le mouvement d'un objet lancé avec une vitesse possédant une composante horizontale.

Les projectiles sont des objets lancés qui subissent l'effet de la gravité, ce qui signifie que l'objet se déplace simultanément à l'horizontale et à la verticale.

### II.3.2. Les branches de balistique

Balistique est divisée en deux branches :

#### II.3.2.1. Balistique intérieure

La balistique intérieure étudie le comportement d'un projectile quand il est encore dans le canon (le tube gun), soumis aux forces générées à partir de la puissance de la charge propulsive.

#### II.3.2.2. Balistique extérieure

La balistique extérieure étudie le mouvement d'un projectile après avoir été tiré ou Lancé (après le canon), sans propulsion interne. Ceci est le Balistique vrai selon sa définition.

Il existe deux types de mouvements dans cette branche :

##### ➤ *Mouvement des projectiles lancés obliquement :*

Un projectile lancé obliquement possède une vitesse initiale horizontale et une vitesse initiale verticale. Lorsque le projectile est lancé obliquement, il faut tout d'abord décomposer la vitesse avec laquelle le projectile est lancé, pour déterminer la vitesse initiale horizontale et la vitesse initiale verticale. Par la suite, la résolution du problème se fait selon les deux mouvements distincts, soit le mouvement horizontal (mouvement rectiligne uniforme MRU) et le mouvement vertical (chute libre).

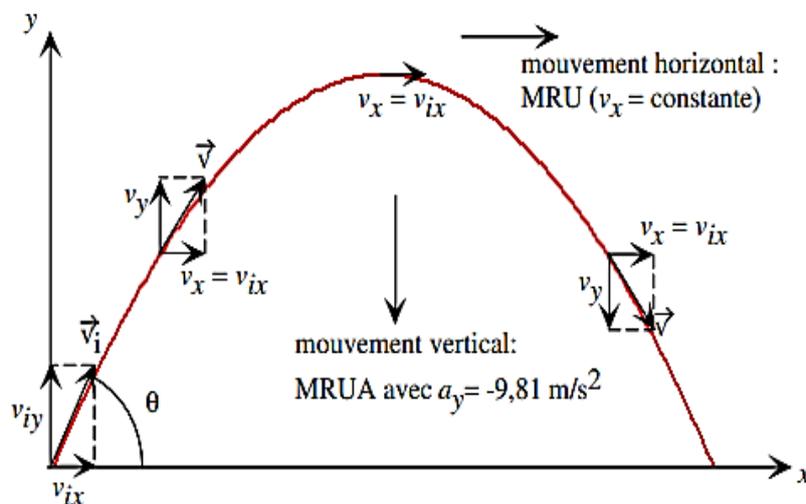


Figure (II.5) : mouvement d'un projectile lancé obliquement (PHY-144, 2011)

##### ➤ *Mouvement des projectiles lancés horizontalement :*

Un projectile lancé horizontalement possède une vitesse initiale horizontale, mais ne possède pas aucune vitesse initiale verticale.

Dans le cas d'un projectile lancé horizontalement, l'objet débute au point le plus haut de son mouvement, puis entreprend son mouvement parabolique. D'un point de vue graphique, ce mouvement est semblable à une demi-parabole.

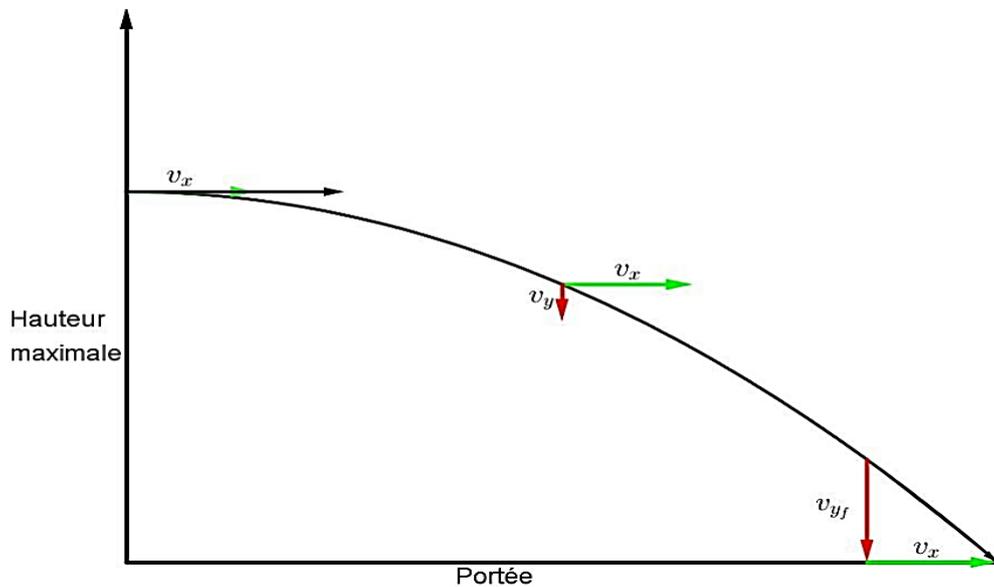


Figure (II.6) : mouvement d'un projectile lancé horizontalement

### II.3.3. Analyse du mouvement balistique

Pour analyser le mouvement balistique, il est utile d'analyser séparément les composantes verticale (y) et horizontale (x) de la vitesse et du déplacement.

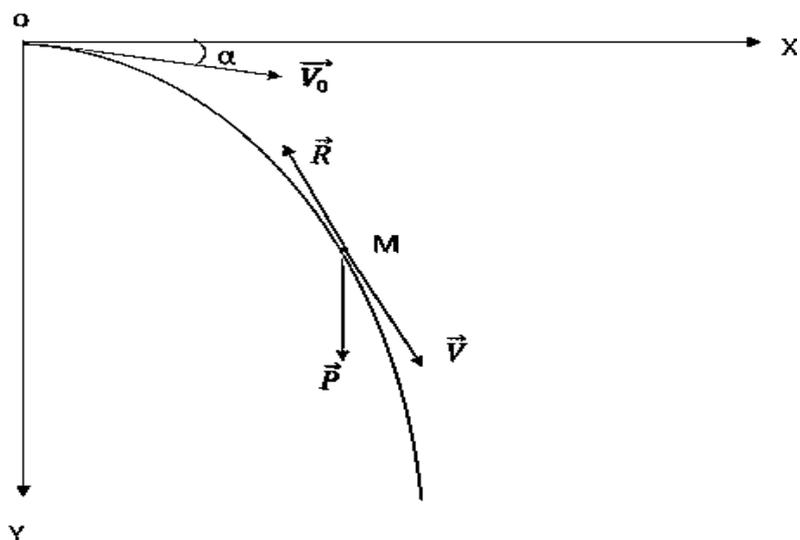


Figure (II.7) : schéma du mouvement

$\vec{R}$  : La force de frottement.

$\vec{P}$  : La force de gravité.

**II.3.3.1. Résolution du problème dans le vide (sans frottement)**• **Horizontalement**

$$F_x \cdot \vec{i} = m \cdot a_x \cdot \vec{i} = m \cdot \frac{dv_x}{dt} \cdot \vec{i} = m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = \vec{0}.$$

Avec  $m \neq 0$ .

Ce qui permet d'écrire :

$$\frac{dv_x}{dt} = 0 \quad (\text{II.9})$$

Par intégration :

$$v_x = K_{1x}. \quad (\text{II.10})$$

Pour déterminer  $K_{1x}$ , on doit utiliser les conditions initiales :

A  $t = 0$   $v(0) = v_{ox} = v_o \cdot \cos \alpha.$  (II.11)

Donc :

$$v_x = v_o \cdot \cos \alpha. \quad (\text{II.12})$$

Par intégration :

$$x = v_o \cdot \cos \alpha \cdot t + K_{2y}. \quad (\text{II.13})$$

A partir des conditions initiales :  $K_{2y} = 0$ .

D'où :

$$x(t) = v_o \cdot \cos \alpha \cdot t. \quad (\text{II.14})$$

• **Verticalement**

$$F_y \cdot \vec{j} = m \cdot a_y \cdot \vec{j} = m \cdot \frac{dv_y}{dt} \cdot \vec{j} = m \cdot g \cdot \vec{j}$$

Avec  $m \neq 0$

D'où :

$$m \cdot \frac{dv_y}{dt} = m \cdot g. \quad (\text{II.15})$$

Ce qui permet d'écrire :

$$\frac{dv_y}{dt} = g. \quad (\text{II.16})$$

Par intégration :

$$v_y = g \cdot t + K_{1y} \quad (\text{II.17})$$

A  $t = 0$ ,

$$v(0) = v_{oy} = v_o \cdot \sin \alpha = K_{1y}. \quad (\text{II.18})$$

Donc :

$$v_y(t) = g \cdot t + v_o \cdot \sin \alpha. \quad (\text{II.19})$$

Alors :

$$\frac{dy}{dt} = g \cdot t + v_o \cdot \sin \alpha. \quad (\text{II.20})$$

Par intégration ;

$$y(t) = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + v_o \cdot \sin \alpha \cdot t + K_{2y} \quad (\text{II.21})$$

A partir des conditions initiales :

$$K_{2y} = 0 \quad (\text{II.22})$$

Donc

$$: y(t) = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + v_o \cdot \sin \alpha \cdot t \quad (\text{II.23})$$

- **Equation du mouvement :**

A partir de l'équation (II.14) :

$$t = \frac{x}{v_o \cdot \cos \alpha} \quad (\text{II.24})$$

On remplace la formule de t dans (II.23), on aura :

$$y(x) = x \cdot \tan \alpha + \frac{1}{2} \cdot g \cdot \frac{x^2}{v_o^2 \cdot \cos^2 \alpha} \quad (\text{II.25})$$

### II.3.3.2. Résolution du problème dans le cas de frottement fluide laminaire (force proportionnelle à la vitesse)

- **Horizontalement**

$$F_x \cdot \vec{i} = m \cdot a_x \cdot \vec{i} = m \cdot \frac{dv_x}{dt} \cdot \vec{i} = m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = -R_x \cdot \vec{i} = -k \cdot v_x \cdot \vec{i}.$$

Avec  $m \neq 0$

Ce qui permet d'écrire :

$$m \frac{dv_x}{dt} = -k \cdot v_x \cdot \quad (\text{II.26})$$

$$\frac{dv_x}{dt} = -\frac{k}{m} \cdot dt \quad (\text{II.27})$$

Equation différentielle aux variables séparées.

Par intégration :

$$\ln v_x = -\frac{k}{m} \cdot t + K_{1x}. \quad (\text{II.28})$$

A  $t = 0$ ,

$$K_{1x} = \ln v_{ox}. \quad (\text{II.29})$$

$$\ln v_x = -\frac{k}{m} \cdot t + \ln v_{ox}. \quad (\text{II.30})$$

Donc :

$$v_x = v_o \cdot \cos \alpha \cdot e^{-\frac{k}{m}t} \quad (\text{II.31})$$

Alors :

$$\frac{dx}{dt} = v_o \cdot \cos \alpha \cdot e^{-\frac{k}{m}t} \quad (\text{II.32})$$

Par intégration :

$$x = -\frac{m}{k} \cdot (v_o \cdot \cos \alpha) \cdot e^{-\frac{k}{m}t} + K_{2x} \quad (\text{II.33})$$

A  $t=0$ ,

$$K_{2x} = \frac{m}{k} (v_o \cdot \cos \alpha) \quad (\text{II.34})$$

Donc :

$$x(t) = \frac{m}{k} \cdot (v_o \cdot \cos \alpha) \cdot \left(1 - e^{-\frac{k}{m}t}\right) \quad (\text{II.35})$$

• **Verticalement**

$$F_y \cdot \vec{j} = m \cdot a_y \cdot \vec{j} = m \cdot \frac{dv_y}{dt} \cdot \vec{j} = m \cdot \frac{d^2y}{dt^2} \cdot \vec{j} = (-k \cdot v_y + m \cdot g) \vec{j}$$

Avec  $m \neq 0$

Ce qui permet d'écrire :

$$m \cdot \frac{dv_y}{dt} = -k \cdot v_y + m \cdot g \quad (\text{II.36})$$

$$\frac{dv_y}{\left(v_y - \frac{m \cdot g}{k}\right)} = -\frac{k}{m} \cdot dt \quad (\text{II.37})$$

Equation différentielle aux variables séparées :

Par intégration :

$$\ln\left(v_y - \frac{m \cdot g}{k}\right) = -\frac{k}{m} \cdot t + K_{1y} \quad (\text{II.38})$$

A  $t=0$ ,

$$K_{1y} = \ln\left(v_{oy} - \frac{m \cdot g}{k}\right) \quad (\text{II.39})$$

Donc :

$$\ln\left(v_y - \frac{m \cdot g}{k}\right) = -\frac{k}{m} \cdot t + \ln\left(v_{oy} - \frac{m \cdot g}{k}\right) \quad (\text{II.40})$$

Après simplification :

$$v_y = \left(v_o \cdot \sin \alpha - \frac{m \cdot g}{k}\right) \cdot e^{-\frac{k}{m}t} + \frac{m \cdot g}{k} \quad (\text{II.41})$$

Par intégration :

$$y(t) = -\frac{m}{k} \cdot \left( v_o \cdot \sin \alpha - \frac{m \cdot g}{k} \right) \cdot e^{-\frac{k}{m}t} + \frac{m \cdot g}{k} \cdot t + K_{2y}. \quad (\text{II.42})$$

A  $t=0$ ,  $y=0$

$$\text{D'où :} \quad K_{2y} = \frac{m}{k} \cdot \left( v_o \cdot \sin \alpha - \frac{m \cdot g}{k} \right). \quad (\text{II.43})$$

Donc :

$$y(t) = \frac{m}{k} \left( v_o \cdot \sin \alpha - \frac{m \cdot g}{k} \right) \left( 1 - e^{-\frac{k}{m}t} \right) + \frac{m \cdot g}{k} \cdot t \quad (\text{II.44})$$

- **Equation du mouvement :**

D'après l'équation (II.35), on peut écrire :

$$t = -\frac{m}{k} \cdot \ln \left( 1 - \frac{x}{\frac{m}{k} \cdot v_o \cos \alpha} \right). \quad (\text{II.45})$$

On remplace dans (II.44) :

$$y(x) = \left( tg \alpha - \frac{m \cdot g}{k \cdot v_o \cdot \cos \alpha} \right) \cdot x - \left( \frac{m}{k} \right)^2 \cdot g \cdot \ln \left( 1 - \frac{k}{m} \cdot \frac{x}{v_o \cdot \cos \alpha} \right) \quad (\text{II.46})$$

#### II.4. Méthode théorique simplifiée (trajectoire du filet central)

L'écoulement à travers l'entonnoir d'un évacuateur en puits se fait comme le cas d'un mouvement des projectiles lancés horizontalement. Ainsi dans le cas d'un projectile solide, la forme de ce projectile lancé horizontalement, reste constante le long de son mouvement et sa trajectoire donc est une ligne courbe (demi-parabole). Par contre dans le cas d'un projectile liquide, comme le cas de notre étude, la forme de ce projectile déversé, n'est pas constante le long du jet de déversement, En suite la lame d'eau déversant et la vitesse d'écoulement vont s'augmenter le long du jet de déversement à partir de la crête du déversoir, parce que la section de l'entonnoir se diminue. Donc la trajectoire du jet est un ensemble des filets courbés et superposés et qui sont parallèles à l'axe du jet. Et pour faciliter l'étude on prend la solution de l'étude de la trajectoire du filet central.

La procédure de calcul suivant la méthode du filet central consiste à déterminer l'épaisseur du jet ( $h$ ) au niveau de chaque point d'écoulement le long du jet de déversement en régime dénoyé, puis en reportant le long de la normale à l'axe du jet (filet central courbé) dans

les deux sens de  $0,5 \cdot h$  vers le haut et vers le bas pour déduire les positions des nappes supérieure et inférieure respectivement. En menant ce calcul de proche en proche à partir de la crête de déversoir jusqu'au niveau où les deux nappes supérieures se rejoignent afin d'assurer l'écoulement dénoyé dans l'entonnoir de déversoir, on obtient le contour des deux nappes, ainsi la nappe inférieure sera reprise comme profil de la tulipe de l'évacuateur en puits. Le point d'intersection des deux nappes supérieures se situe à la coordonnée  $y_{\max}$  où on place le puits, et à partir de ce point d'intersection jusqu'à les frontières de l'entonnoir, on détermine le rayon de la tulipe. L'entonnoir de déversoir peut être à section conique ou sans section conique (Saptsin.V.P ,2005)

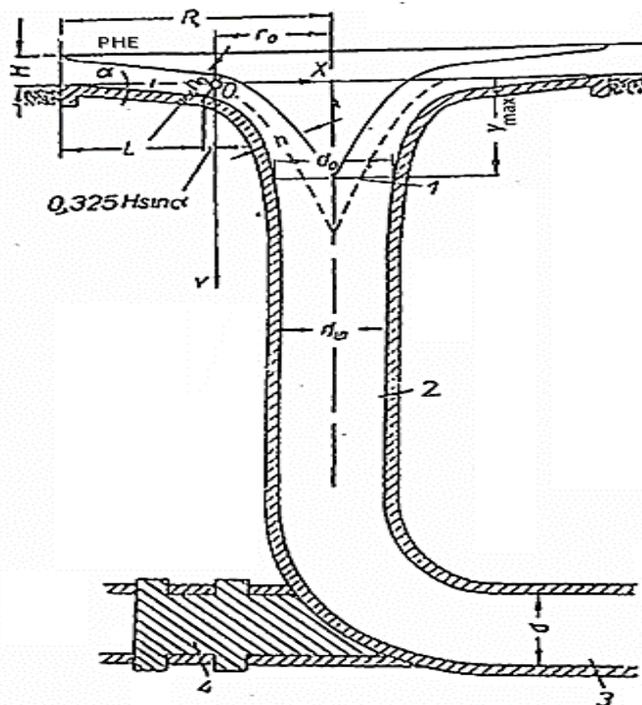
#### II.4.1. Entonnoir avec section conique

Un entonnoir avec section conique commence dans la partie supérieure du plan horizontal, et qui passe dans la surface conique (il contient du bassin de réception d'eau) (figure II.8), le sommet de l'entonnoir du déversoir se situe au niveau de la retenue normal (NNR) puis nous avons un évacuateur automatique, et l'évacuation du débit de crue se fait à un niveau élevé par rapport au niveau de la retenue normal (NNR). Une partie du tunnel est fermée par un bouchon en béton.

Habituellement, le rayon de l'entonnoir du déversoir est pris au moins  $6 H$ .

La pente de la surface de la section conique est prise :

$I = 0.10$  à  $0.15$  où  $\alpha = 6$  à  $9^\circ$



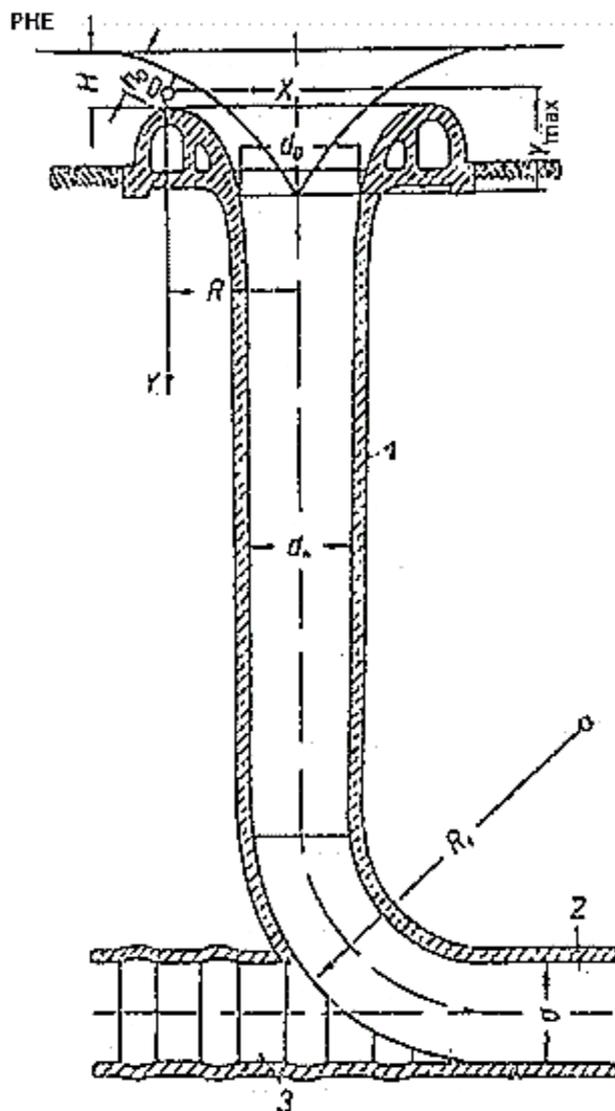
1 : axe du jet ; 2 : puits vertical ; 3 : tunnel de sortie ; 4 : bouchon en béton

Figure (II.8) : évacuateur de crue en puits avec une section conique (Saptsin.V.P ,2005).

### II.4.2. Entonnoir sans section conique

Un entonnoir sans section conique commence à partir du niveau de la retenue normale (NNR) et qui passe directement sans l'existence du bassin de réception d'eau dans la partie supérieure de l'entonnoir (figure II.9) où  $\alpha = 0$

Le rayon de l'entonnoir du déversoir pour ce cas est supposé être  $2H < R < 5H$ .



1 : puits vertical ; 2 : tunnel d'évacuation ; 3 : bouchon en béton

Figure (II.9) : Evacuateur de crue en puits sans section conique (Saptsin.V.P ,2005).

Dans le cas du jet central libre (sans frottement), les coordonnées des points le long de l'axe du jet sont déterminées selon l'équation de la parabole citée avant :

$$y(x) = x \cdot \operatorname{tg} \alpha + \frac{1}{2} \cdot g \cdot \frac{x^2}{v_0^2 \cdot \cos \alpha} \quad (\text{II.25})$$

Dans le cas d'écoulement avec frottement fluide laminaire, les coordonnées des points le long de l'axe du jet sont déterminées par la formule citée avant :

$$y(x) = \left( tg\alpha - \frac{m \cdot g}{k \cdot v_o \cdot \cos\alpha} \right) \cdot x - \left( \frac{m}{k} \right)^2 \cdot g \cdot \ln \left( 1 - \frac{k}{m} \cdot \frac{x}{v_o \cdot \cos\alpha} \right) \quad (II.46)$$

Où :  $h = \frac{k}{m}$

k : coefficient de frottement qui dépend de viscosité du fluide et la rugosité des parois.

x et y : sont des variables d'abscisse et d'ordonnée pour construire la parabole en (m).

$v_o$  : La vitesse moyenne à l'extrémité de la partie conique en (m/s).

L'origine des coordonnées est prise au centre de gravité de la section du jet à l'extrémité de la crête (le point o sur les figures (II.8) et (II.9)).

Dans le cas d'un entonnoir à section conique, la valeur de x est prise dans la plage de o à  $r_o$ . La valeur de  $r_o$  est déterminée par la formule (II.68).

La vitesse moyenne à l'extrémité de la crête est déterminée par la formule suivante :

$$v_o = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r_o \cdot h_o} \quad (II.47)$$

Où :

Q : Le débit de conception (d'évacuateur) en ( $m^3 / s$ ).

$r_o$  : Le rayon à l'extrémité de la partie conique, rapporté au centre de gravité de la section du jet à l'extrémité de la crête en (m).

$h_o$  : La profondeur d'eau à l'extrémité de la partie conique en (m).

La profondeur d'eau à l'extrémité de la crête est prise :

$$h_o = \frac{2}{3} H \quad (II.48)$$

Où :

H : est la charge d'eau sur la crête de l'entonnoir en (m).

La longueur de la partie conique est prise comme suit :

$$L = (0,4 \div 0,5) R \quad (II.49)$$

Le rayon à l'extrémité de la partie conique est déterminé par la formule :

$$r_o = R - L - 0,325 \cdot H \cdot \sin \alpha \quad (II.50)$$

Où :

R : le rayon de l'entonnoir en (m).

$\alpha$  : L'angle entre la génératrice de la surface conique de l'entonnoir et l'horizontale.

La vitesse moyenne pour les points le long de l'axe du jet à la confluence du jet est :

$$v = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot y + v_0^2} \quad (\text{II.51})$$

Où :

y : L'ordonnée de variable en (m).

$\varphi$  : Le coefficient de vitesse pris la valeur 0,97.

$v_0$  : La vitesse moyenne à l'extrémité de la partie conique.

L'épaisseur du jet dans la section parabolique sera :

$$h = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot (r_0 - x) \cdot v} \quad (\text{II.52})$$

Après avoir construit l'axe du jet à l'aide des équations (II.25) ou (II.46), nous déterminons les valeurs de  $v$  et  $h$  en utilisant les formules (II.51) et (II.52) respectivement, pour différentes valeurs de  $y$  (Saptsin.V.P ,2005).

Le rayon de l'entonnoir du déversoir est déterminé par la formule suivante :

$$R = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot m \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2}} \quad (\text{II.53})$$

Avec ;

H : La charge sur le seuil de déversoir.

m : Le coefficient de débit, supposé est égale à 0,36.

Si les guides découlement (piliers de guidage) sont installées sur la crête de l'entonnoir, le rayon de l'entonnoir prend la formule ci-après :

$$R = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{Q}{\varepsilon \cdot m \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2}} + n \cdot B \right) \quad (\text{II.54})$$

Où :

$\varepsilon$  : Coefficient de contraction latéral, pris en moyenne 0,9.

n : Le nombre des piles.

B : épaisseur d'une pile en (m).

A l'intersection dans l'entonnoir des surfaces découlement, il aura un point de fuite des jets. Ce point est situé sur l'axe de l'entonnoir à la coordonnée  $y_{\max}$ .

Le diamètre de l'entonnoir à  $y_{\max}$  est déterminé par la formule :

$$d_0 = \sqrt{\frac{4Q}{\pi \cdot v_y}} \quad (\text{II.55})$$

Et la vitesse sera 
$$v_y = \varphi \sqrt{2 \cdot g \cdot y_{\max}} \quad (\text{II.56})$$

Où :  $\varphi = 0,97$

$y_{\max}$  : La coordonnée à l'endroit où les jets convergent dans l'entonnoir en (m).

Si  $d_0 \leq d$ , où  $d$  est le diamètre de tunnel, alors, à partir de l'entonnoir de déversoir jusqu'au fond, le puits est cylindrique avec un diamètre  $d_m = d_0$ .

Si  $d_0 > d$ , alors une section lisse transitionnelle de variable est disposée.

Le diamètre de la section de transition dans toute la section est déterminé par la formule :

$$d_t = \sqrt{\frac{4Q}{\pi \cdot v_t}} \quad (\text{II.57})$$

Et par conséquent, la vitesse est :

$$v_t = 0,98 \sqrt{2 \cdot g \cdot y_t} \quad (\text{II.58})$$

$y_t$  : La coordonnée d'un point dans n'importe quelle section de transition en (m).

A l'endroit  $d_t = d$ , la section de transition se termine et un puits cylindrique de diamètre constant  $d$  est disposé. Dans un certain cas, la section de transition est directement reliée au tunnel (Saptsin.V.P, 2005)..

La conjugaison avec le tunnel de sortie est réalisée à l'aide d'un coude curviligne, décrit par un rayon  $R_1 \geq (2,5 - 4) \cdot d$ .

$d$  : Diamètre du tunnel.

Le diamètre du tunnel est déterminé à partir de la condition du débit calculé et vérifié pour évacuer le débit maximum, à laquelle il aura la plus grand l'inondation admissible.

Le débit maximum peut lier aux non-conditions du calcul de réussite, le débit est déterminé par la formule :

$$Q_{\max} = Q_p \sqrt{\frac{H_B}{\sum h_w}} \quad (\text{II.59})$$

$Q_p$  : Débit de conception, en  $(m^3/s)$ .

$H_B$  : Hauteur totale du déversoir, en (m).

$\sum h_w$  : Perte de charge totale lors de la descente du débit calculé à l'aide des formules hydrauliques, en (m) (Saptsin.V.P ,2005).

## II.5. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les deux méthodes analytiques qui peuvent être utilisées pour le profilage de la tulipe d'un évacuateur en puits (des potentiels des vitesses et simplifiée), tel qu'on a concentré sur la méthode théorique simplifiée, qui sera l'objectif des chapitres suivants.



**CHAPITRE III**

# Application de la Théorie au cas du seuil rectiligne en saut de ski

## III.1. Introduction

Ce chapitre se focalisera sur l'application de la méthode théorique simplifiée sur un cas de seuil rectiligne en saut de ski, et pour cela, on utilise les résultats expérimentaux des deux étudiants Nait Cherifi.K, Brahim.M, qui ont effectués des essais sur un modèle expérimental au niveau de laboratoire d'hydraulique de l'université de Bejaia, afin de les comparer avec les résultats analytiques.

Dans ce chapitre, l'étude théorique se faite pour les deux cas d'écoulement : cas sans frottement et avec frottement fluide laminaire.

## III.2. Rappel du protocole expérimental

### III.2.1. Dispositif expérimental

L'étude expérimentale de Nait Cherifi.K, Brahim.M, consiste à reproduire le phénomène au laboratoire, et l'étude de l'évolution de la ligne d'eau à travers l'évacuateur Creager et le jet à travers le saut de ski jusqu'à la retombée au fond du canal.

### III.2.2. Objectif de l'expérience

L'objectif de leur travail repose sur la détermination de la variation de la ligne d'eau le long du canal, et de déterminer l'équation de la trajectoire du jet après l'auge.

### III.2.3. Description de banc d'essai H12 MH2

Le canal hydraulique pédagogique H12 MH2 à surface libre est à pente variable de 5 mètres de longueur, permet d'étudier les principes sur les écoulements uniformes dans un canal à surface libre et d'étudier les ressauts hydrauliques et les écoulements au-dessus d'un déversoir à seuil épais (figure III.1).

Le canal est de dimensions suivantes :

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



*Figure (III.1): le banc d'essai H12 MH2.*

#### III.2.4. Déversoir de Creager

Le déversoir du type de Creager est immergé à l'intérieur du canal et fixé sur ses parois comme le montre la figure (III.2) ci-après.



*Figure (III.2) : Dispositif expérimental*

Ses dimensions sont les suivantes :

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

### III.2.4.1. 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.

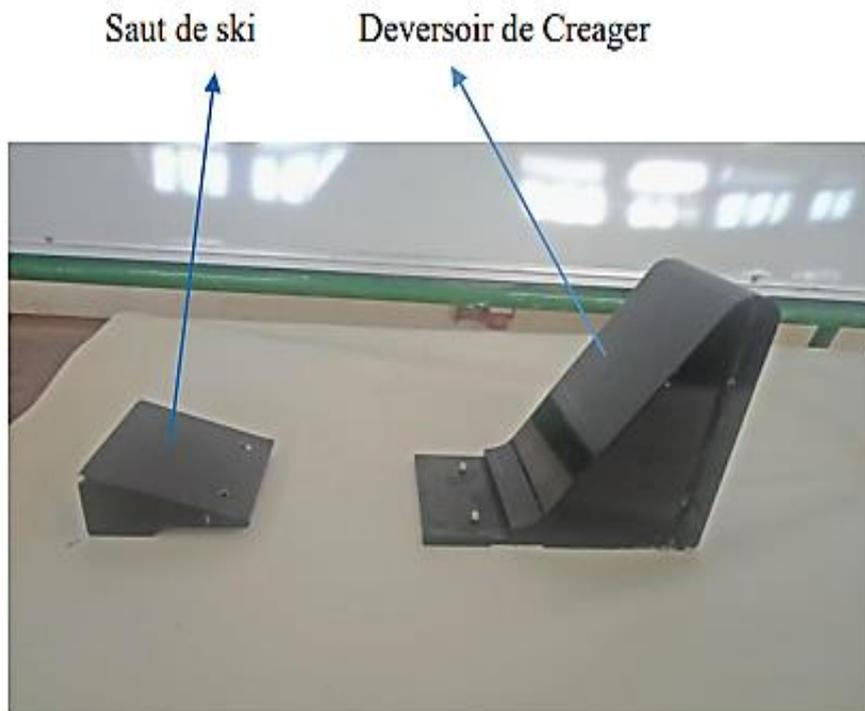


Figure (III.3): composants de déversoir

### III.2.5. Protocole expérimental

Afin de peser le débit dans le banc hydraulique, ils ont mesuré le temps de remplissage du réservoir, et pour effectuer la mesure, ils ont pris une masse supérieure à celle du réservoir vide pour assurer l'équilibre, en suite ils ont rajouté une série de masse de 5 kg, puis ils ont déclenché le chronomètre, le temps enregistré correspond à celui d'une certaine masse d'eau (figure III.4). Le chronomètre doit être arrêté lorsque le fléau remonte à haute position. Il est remarqué que, plus les débits sont plus importants, plus la remontée de fléau se fait relativement vite.

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.

L'expérience permet de mesurer le temps et le débit massique qui sera transformé en débit volumique par la formule (III.7 )

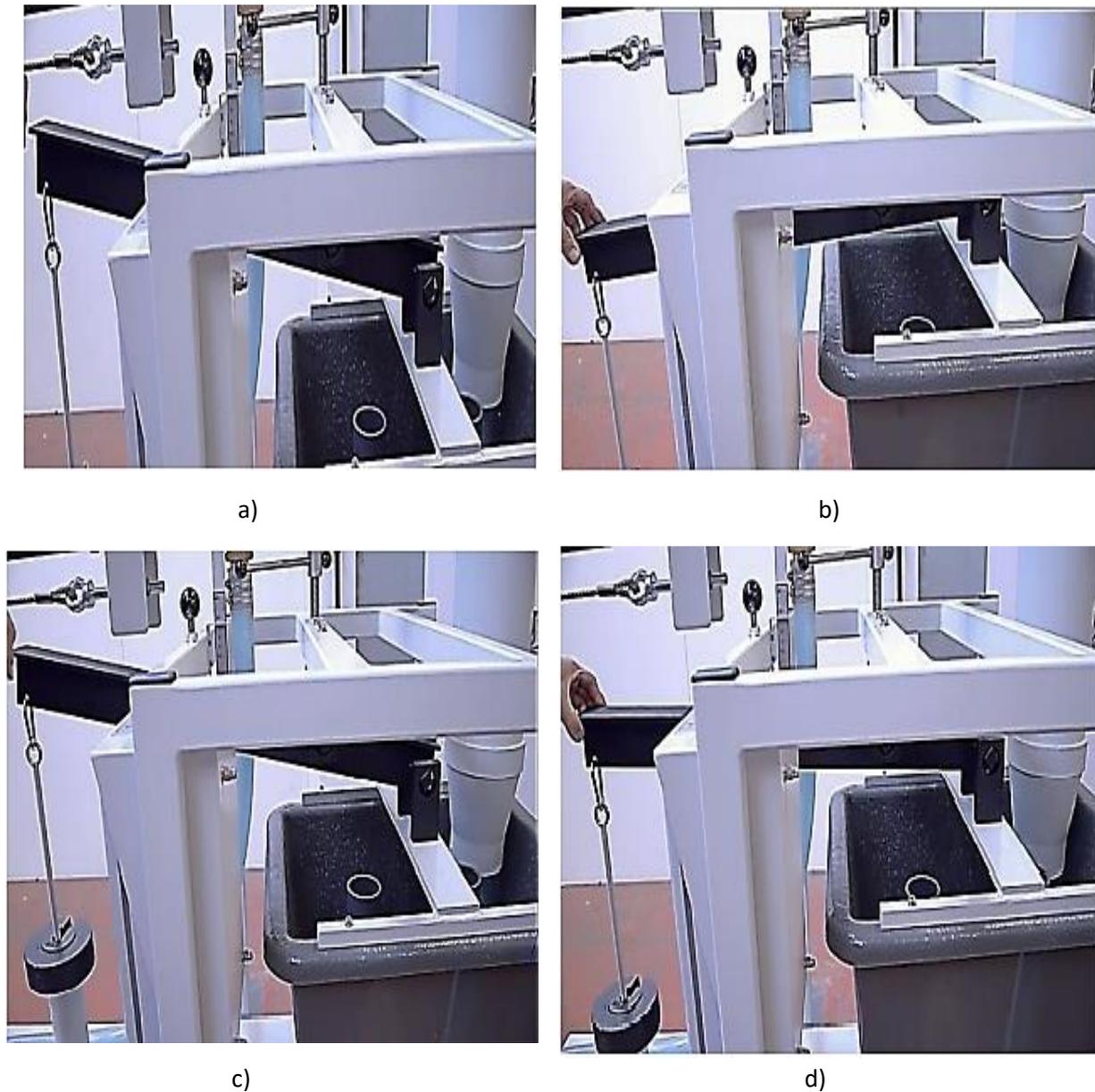


Figure (III.4): phases de mesure : a) position d'attente sans poids ; b) début de chronométrage ; c) fin de chronométrage ; d) position finale avec poids

On a la formule générale du débit :

$$Q = v.s \quad (\text{III.1})$$

La formule du débit massique est comme suit :

$$Q_m = \frac{m}{t} \quad (\text{III.2})$$

La formule de débit volumique est comme suit :

$$Q_v = \frac{V}{t} \quad (\text{III.3})$$

La relation entre le débit massique et le débit volumique :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{III.4})$$

$$m = \rho \cdot v \quad (\text{III.5})$$

$$Q_m = \frac{\rho \cdot v}{t} \quad (\text{III.6})$$

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho} \quad (\text{III.7})$$

Ou :  $Q_m$  : le débit massique en ( kg/s)

$Q_v$  : le débit volumique en ( $m^3/s$ )

$m$  : la masse en (kg)

$t$  : le temps en (s)

$\rho$  : la masse volumique en ( $kg/ m^3$ )

La masse qui était prise durant toute l'expérience est 5 kg (  $m= 15$  kg), le temps de remplissage du réservoir représente la variabilité de la masse.

### III.2.6. Mesure du temps

La mesure du temps a été faite à l'aide d'un appareil électronique appelé chronomètre qui est représenté sur la figure (III.5)



Figure (III.5) : chronomètre

### III.2.7. Mesure de la hauteur

Dans leur expérience, la mesure de la hauteur a été 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.

### III.2.8. les résultats expérimentaux

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau (III.1): les résultats expérimentaux de Nait Cherifi.K ,Brahimi.M.

Essais	T moyen (s)	$Q_v$ ( $m^3/s$ )	V ( $cm/s$ )	$h_0$ (cm)
1	221	$7,11 \cdot 10^{-5}$	55,76	0,17
2	67	$22,5 \cdot 10^{-5}$	93,75	0,32
3	44,5	$34 \cdot 10^{-5}$	105,42	0,43
4	27	$56 \cdot 10^{-5}$	108,21	0,69
5	13,5	$111,1 \cdot 10^{-5}$	134,6	0,95

Les hauteurs expérimentales correspondantes à chaque débit et qui sont regroupées dans le tableau (III.1) ont été obtenus par la photométrie.

## III.3. Application et verification de la méthode théorique simplifiée

### III.3.1. Cas de mouvement sans frottement

La trajectoire des jets quittant un saut de ski sont de forme parabolique, qui peut être déterminée par la formule suivante :

$$y = x \cdot \tan \alpha - \frac{g}{2} \left( \frac{x}{v_0 \cdot \cos \alpha} \right)^2 + y_0 + z \quad (\text{III.8})$$

Où :  $\alpha$  : l'angle de départ :  $17^\circ$ .

$v_0$  : la vitesse d'écoulement d'approche.

$z$  : la hauteur du seuil

$$y_0 = \frac{h_0}{2}$$

- Pour Q1:

$$h_0 = 0,77\text{cm}$$

$$v_0 = 55,76 \text{ (cm/s)}$$

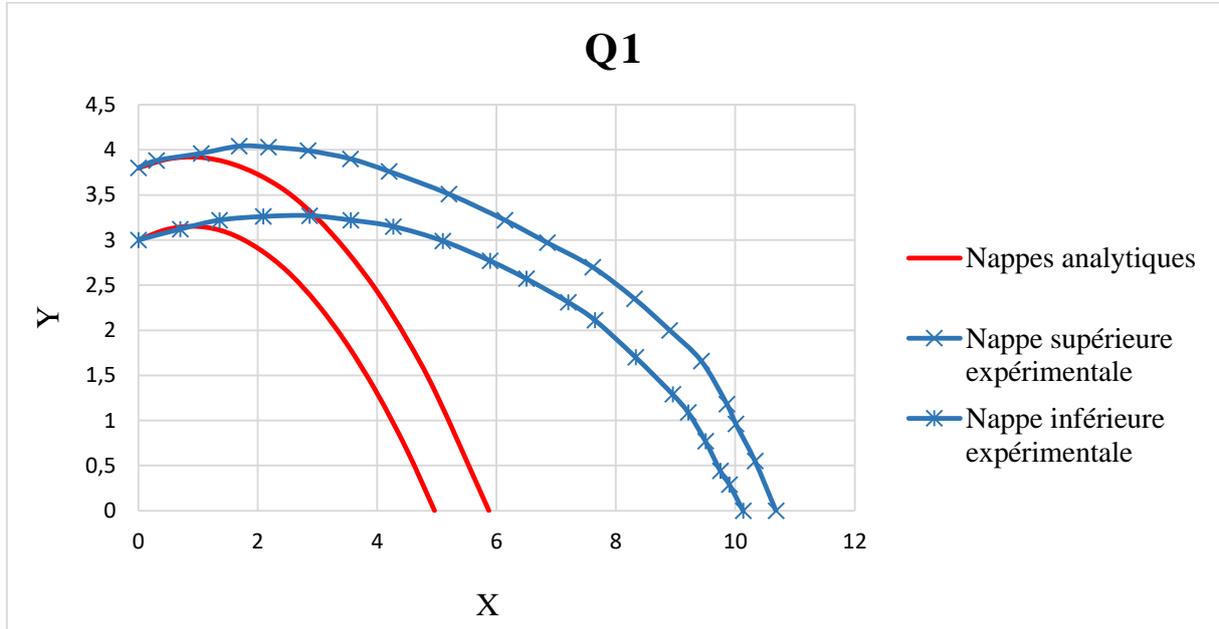


Figure (III.6): Comparaison des trajectoires des nappes expérimentales et analytiques pour Q1 cas sans frottement.

- Pour Q2:

$$h_0 = 0,32 \text{ cm}$$

$$v_0 = 93,75 \text{ (cm/s)}$$

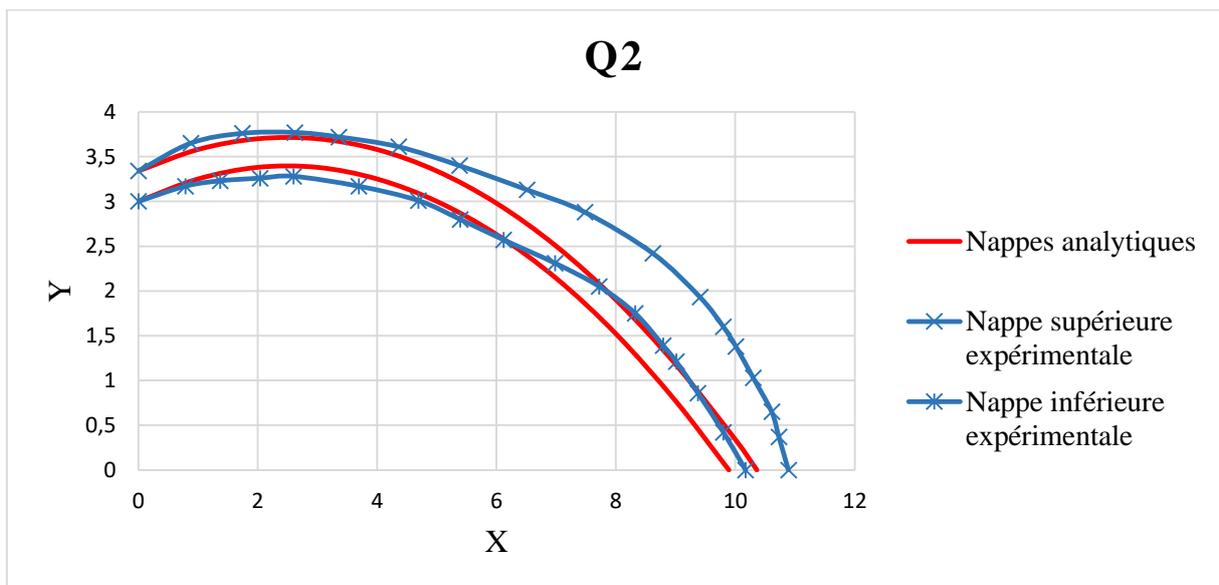


Figure ( III.7): Comparaison des trajectoires des nappes expérimentales et analytiques pour Q2 cas sans frottement.

- Pour Q3:

$$h_o = 0,43 \text{ cm}$$

$$v_o = 105,42 \text{ (cm/s)}$$

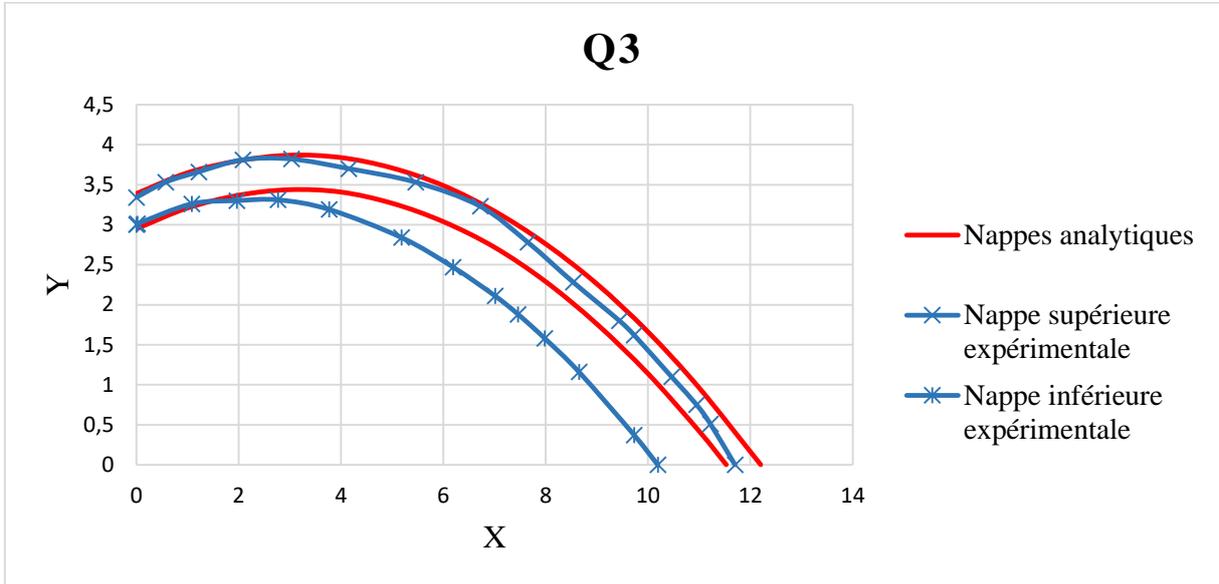


Figure (III.8): Comparaison des trajectoires des nappes expérimentales et analytiques pour Q3 cas sans frottement.

- Pour Q4:

$$h_o = 0,69 \text{ cm}$$

$$v_o = 108,21 \text{ (cm/s)}$$

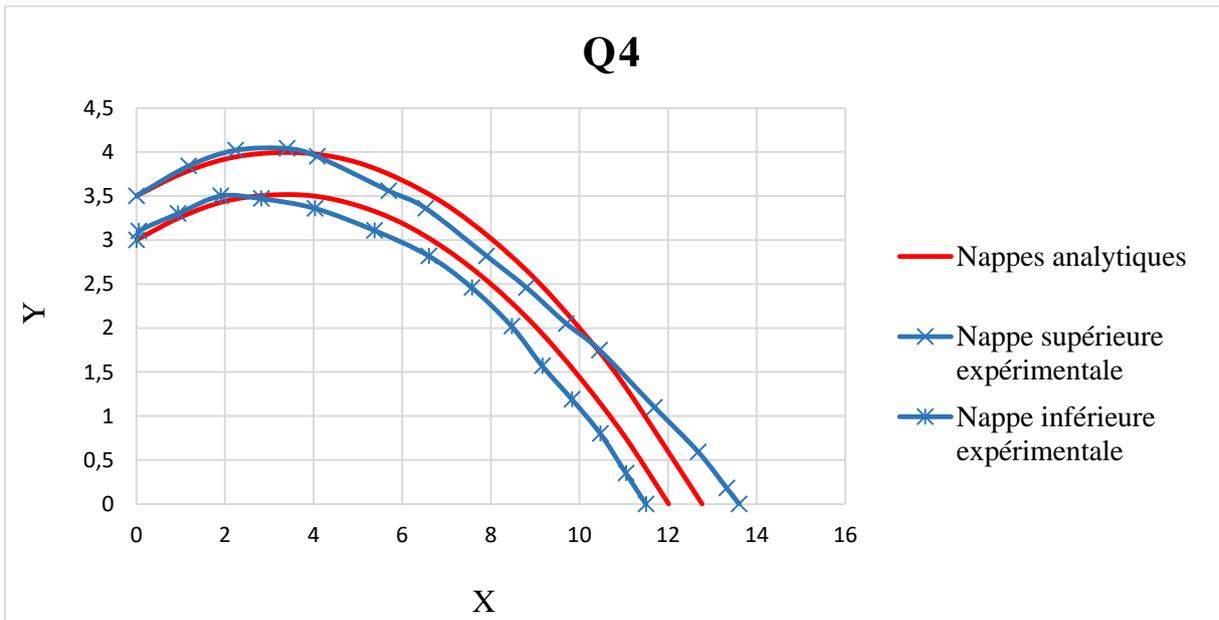


Figure (III.9): Comparaison des trajectoires des nappes expérimentales et analytiques pour Q4 cas sans frottement.

- Pour Q5:

$$h_o = 0,95 \text{ cm}$$

$$v_o = 134,6 \text{ (cm/s)}$$

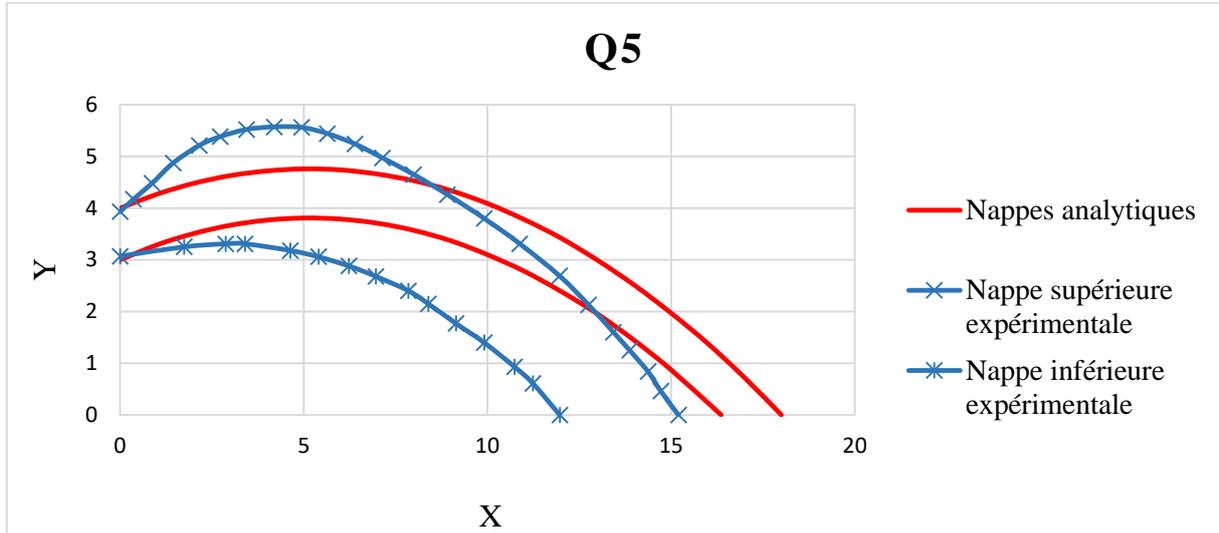


Figure (III.10): Comparaison des trajectoires des nappes expérimentales et analytiques pour Q5 cas sans frottement.

**III.3.2. Cas de mouvement avec frottement fluide laminaire**

L'équation qui permet de déterminer la trajectoire du filet central est :

$$y = \left( \frac{g \cdot m}{k \cdot v_o \cdot \cos \alpha} + \tan \alpha \right) \cdot x + \left( \frac{g \cdot m^2}{k^2} \right) \cdot \ln \left( 1 - \left( \frac{k}{m \cdot v_o \cdot \cos \alpha} \cdot x \right) \right) + y_o + z. \quad \text{(III.9)}$$

Où : k : coefficient de frottement.

- Pour Q1

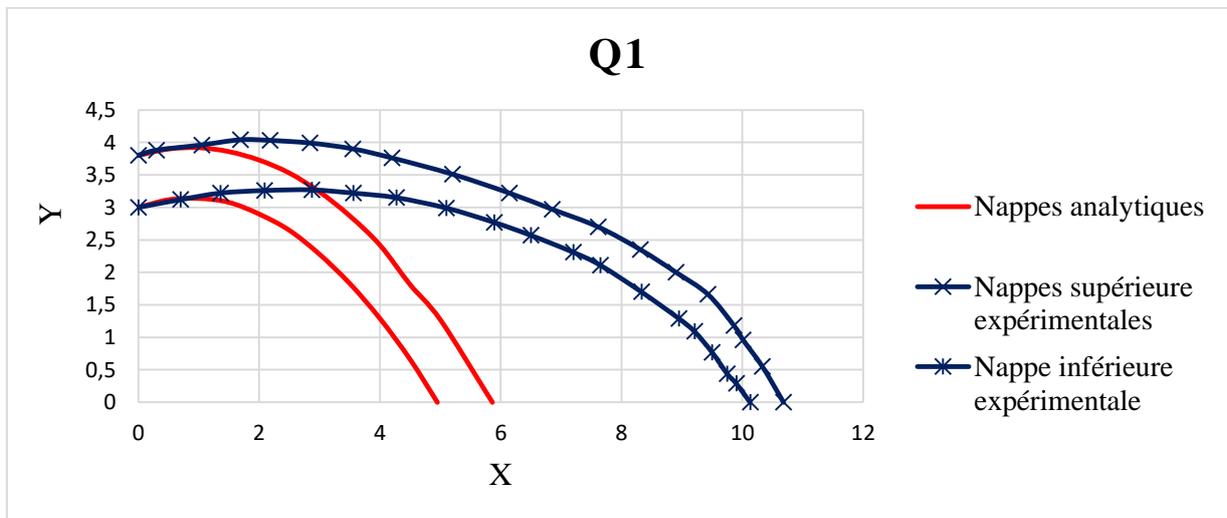


Figure (III.11): Comparaison des trajectoires des nappes expérimentales et analytiques pour Q1 cas avec frottement fluide laminaire.

• Pour Q2

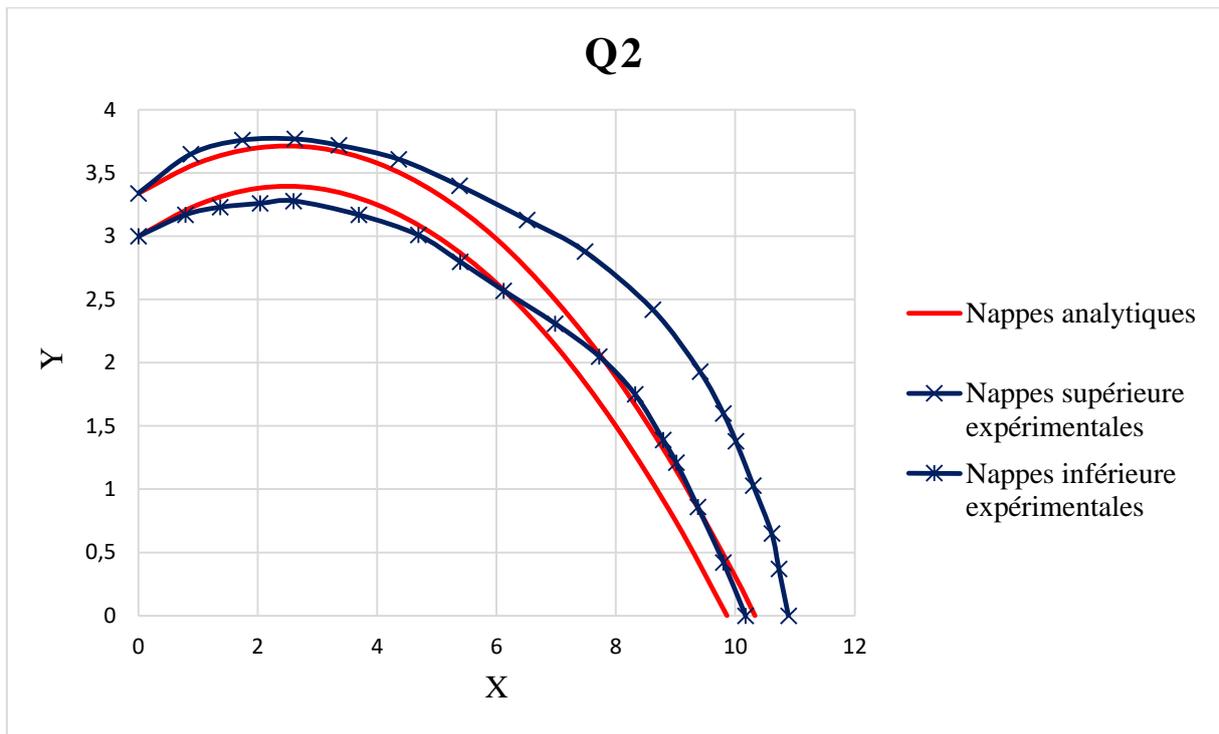


Figure (III.12): Comparaison des trajectoires des nappes expérimentales et analytiques pour Q2 cas avec frottement fluide laminaire.

• Pour Q3

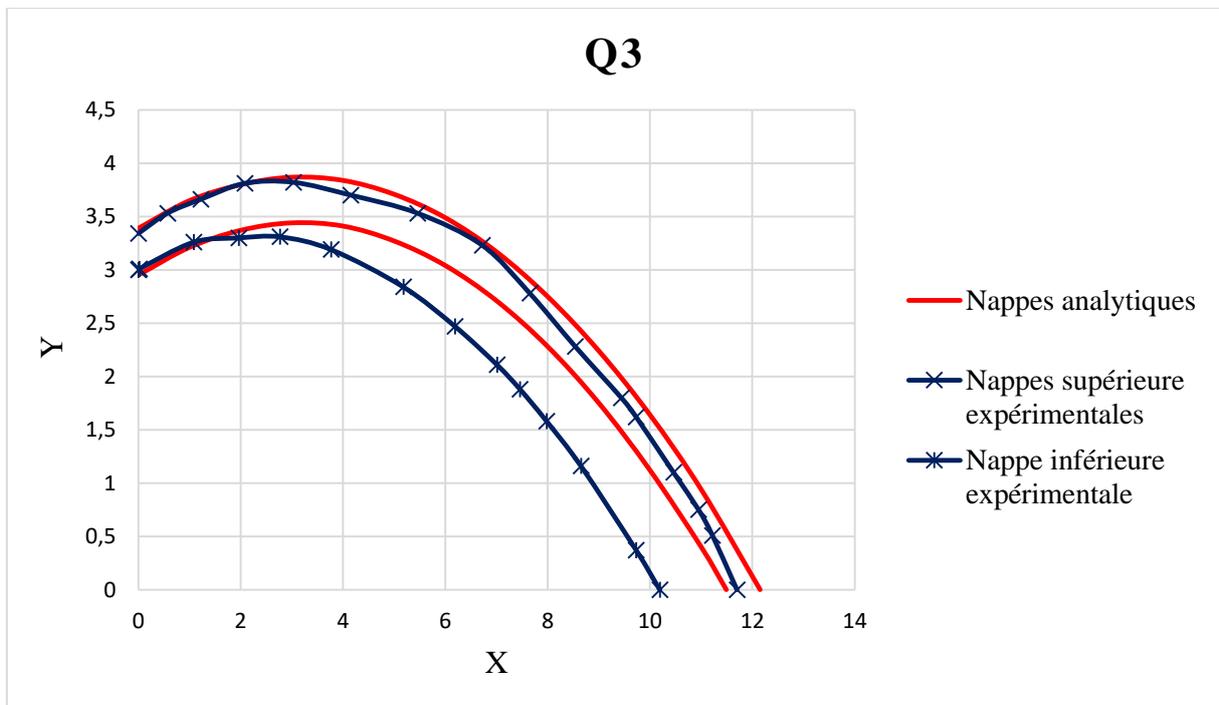


Figure (III.13) : Comparaison des trajectoires des nappes expérimentales et analytiques pour Q3 cas avec frottement fluide laminaire.

- Pour Q4

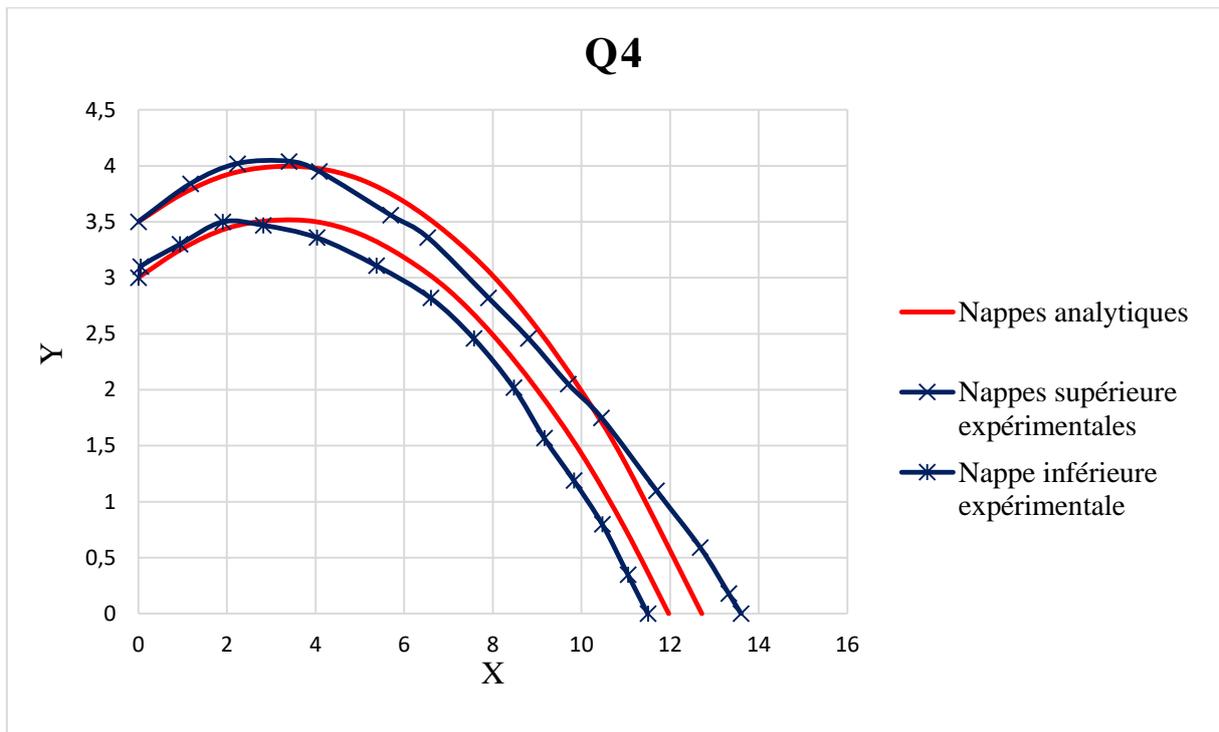


Figure (III.14) : Comparaison des trajectoires des nappes expérimentales et analytiques pour Q4 cas avec frottement fluide laminaire.

- Pour Q5

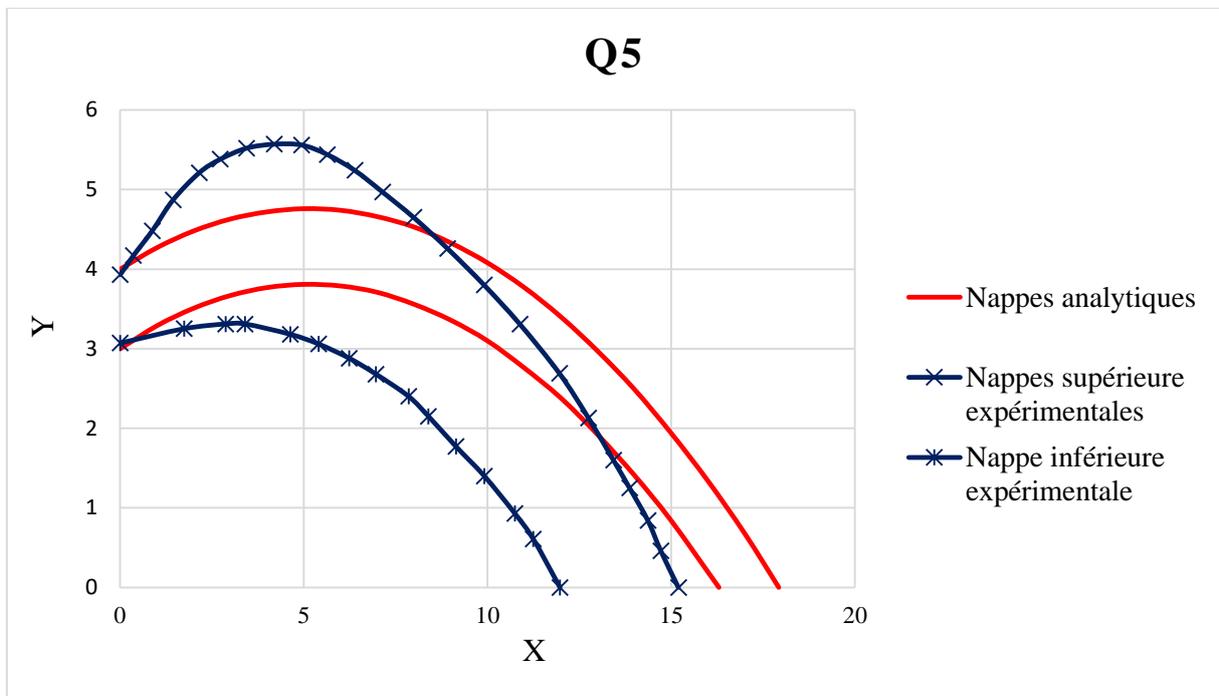


Figure (III.15) : Comparaison des trajectoires des nappes expérimentales et analytiques pour Q5 cas avec frottement fluide laminaire.

### III.4. Interprétation des résultats

Les trajectoires des nappes expérimentales sont obtenues par voie photométrique, les erreurs d'incertitude doivent être prises en considération.

#### III.4.1. Cas d'écoulement sans frottement

La figure (III.6) représente la comparaison entre les trajectoires des nappes inférieures et supérieures expérimentales et analytiques, et qui montre que la trajectoire et l'épaisseur du jet sont altérés par l'effet de la tension superficielle. Cette dernière traduit l'augmentation de l'énergie lors de l'accroissement de la surface du fluide. C'est un phénomène physico-chimique lié aux interactions moléculaires à la surface du liquide. Le débit utilisé dans l'expérience est d'une valeur de  $7.11 \cdot 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s)}$ , qui a une force insuffisante pour pousser le jet.

Concernant les figures (III.7) et (III.8), portant des valeurs de débit de  $22,5 \cdot 10^{-5}$  et  $34 \cdot 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s)}$  respectivement, qui sont augmentées par rapport au premier essai, ce qui a permis d'avoir une allure suffisante afin d'obtenir une forme parabolique des trajectoires des nappes expérimentales et analytiques, ceux qui ont en tendance à correspondre.

En outre, pour la figure (III.9), le débit est encore augmenté jusque à la valeur de  $56 \cdot 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s)}$ . Les trajectoires des nappes expérimentales et analytiques sont presque confondues. Les résultats souhaités ont été enregistrés dans ce cas.

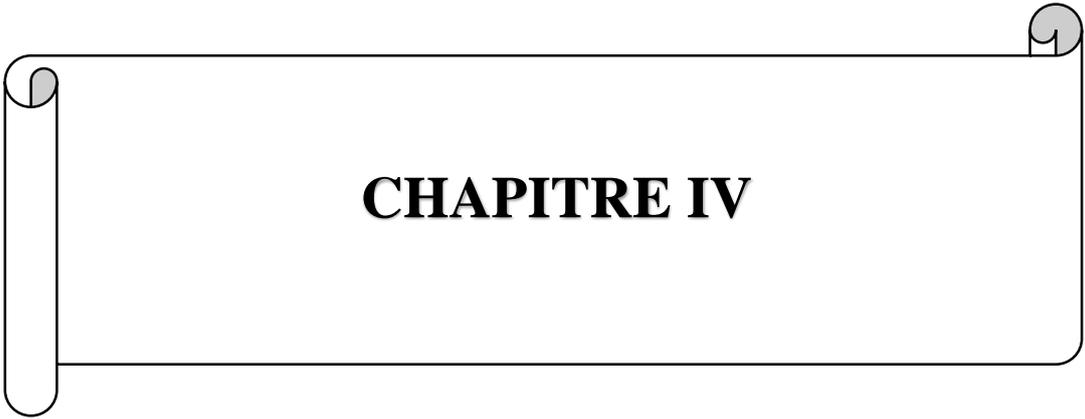
Pour le dernier essai, qui est représenté sur la figure (III.10), on remarque que les trajectoires des nappes prennent une allure plus élevée à cause d'un fort débit qui est de valeur de  $111,1 \text{ (m}^3/\text{s)}$ . Ainsi que la vitesse d'écoulement est importante, ce qui provoque la formation des ondes de choc, et c'est pourquoi on obtient l'allure des nappes analytiques dépasse celle des nappes expérimentales.

#### III.4.2. Cas d'écoulement avec frottement fluide laminaire

On remarque que les résultats obtenus dans ce cas sont presque confondus à ceux du cas d'écoulement sans frottement pour les trois premiers débits ( $Q_1, Q_2, Q_3$ ), pour ce qui concerne les derniers débits ( $Q_4$  et  $Q_5$ ), on remarque une variation très légère des nappes analytiques à l'extrémité du jet par rapport au cas sans frottement, On peut dire dans ce cas que les effets du frottement laminaire sont négligeables. L'expérience a nous permet de déterminer le coefficient de frottement, tel que  $k = 0,9$ .

### III.5. Conclusion

Dans ce chapitre on a appliqué la théorie simplifiée sur un cas de seuil rectiligne en saut de ski, ainsi on a vérifié sa validité et donc pouvoir aussi l'appliquer pour un cas de déversoir circulaire, qui sera l'intitulé du chapitre suivant.



**CHAPITRE IV**

## Profilage de la tulipe de l'évacuateur en puits

### IV.1. Introduction

Le chapitre ci-présent va se centrer sur l'application de la théorie simplifiée pour un cas du déversoir circulaire (évacuateur en puits).

Dans ce chapitre, la théorie simplifiée sera appliquée, sur l'exemple de calcul qui était établi par Himeric Yu.A, 1957, pour un cas d'écoulement dans le vide (sans frottement), ensuite sur un cas pratique du barrage Sidi Yacoub de la wilaya de Chlef-Algérie, et comparer les résultats obtenus avec le profil empirique de Wagner et le profil expérimental obtenu par le bureau des études (Entreprise HIDROELECTRA-Zagreb-Yougoslavie).

### IV.2. Test préliminaire

Pour appliquer la théorie simplifiée, on prend l'exemple de calcul de Himeric Yu.A, 1957, afin d'avoir le profilage de la tulipe d'un évacuateur en puits avec section conique.

Les données sont :

- Le débit :  $Q = 80m^3 / s$
- L'angle d'inclinaison de la surface conique à l'horizon :  $\alpha = 8^\circ$
- La profondeur d'eau au seuil de déversoir :  $H = 1,0m$
- Le coefficient de débit :  $m = 0,36$

On détermine d'abord le rayon de l'entonnoir par la formule précédente (II.53) :

$$R = 7,99 \approx 8,0m$$

Puis, on détermine la profondeur d'eau à l'extrémité de la partie conique par la formule (II.48) :

$$h_0 = 0,65m$$

Alors, on détermine la longueur de la partie conique par la formule (II.49) :

$$L = 0,4 * R$$

$$L = 3,2m$$

Ensuite, on détermine le rayon à l'extrémité de la partie conique par la formule (II.50) :

$$r_0 = 4,755m$$

Donc, on détermine la vitesse moyenne à l'extrémité de la partie conique (la vitesse d'approche) par la formule (II.47)

$$v_0 = 4,2m / s$$

Selon l'équation (II.25), nous déterminons les coordonnées des points le long de l'axe du jet (la trajectoire du filet central), selon la formule (II.51) on détermine les vitesses moyennes pour les points le long de l'axe du jet, et selon la formule (II.52) on détermine l'épaisseur du jet aux points.

Les résultats de calcul sont regroupés dans le tableau suivant :

*Tableau (IV.1) : les coordonnées des points le long de l'axe du jet, les vitesses moyennes et l'épaisseur du jet des points.*

X (m)	Y (m)	V (m/s)	h (m)
0	0	4,2	0,65
1	0,42	4,93	0,69
2	1,42	6,54	0,72
3	3,0	8,45	0,88
4	5,10	10,52	1,72

On prend l'origine des coordonnées au point 0, à la moitié de la hauteur d'eau à l'extrémité de la partie conique ( $h_0$ ), puis suivant nos coordonnées x et y du tableau (IV.1), on trace l'axe du jet. Aux points des coordonnées connues, on trace des normales à l'axe du jet, sur lesquelles on trace  $0,5h$  (on prend les valeurs du tableau (IV.1)), en reliant les points de la chaque courbes, on obtient les limites extérieures et intérieures du jet (les nappes supérieures et inférieures), tel que la nappe inférieure est le contour de la section parabolique de la tulipe de l'évacuateur en puits (figure IV.1).

Le point d'intersection des deux nappes supérieures se situe à l'ordonnée  $y_{\max} = 4,75m$  (figure IV.1).

On détermine la vitesse à  $y_{\max}$  par la formule (II.56) :

$$v_y = 9,36m/s$$

On détermine le diamètre du puits à  $y_{\max}$  selon la formule (II.55) :

$$d_0 = 3,29m$$

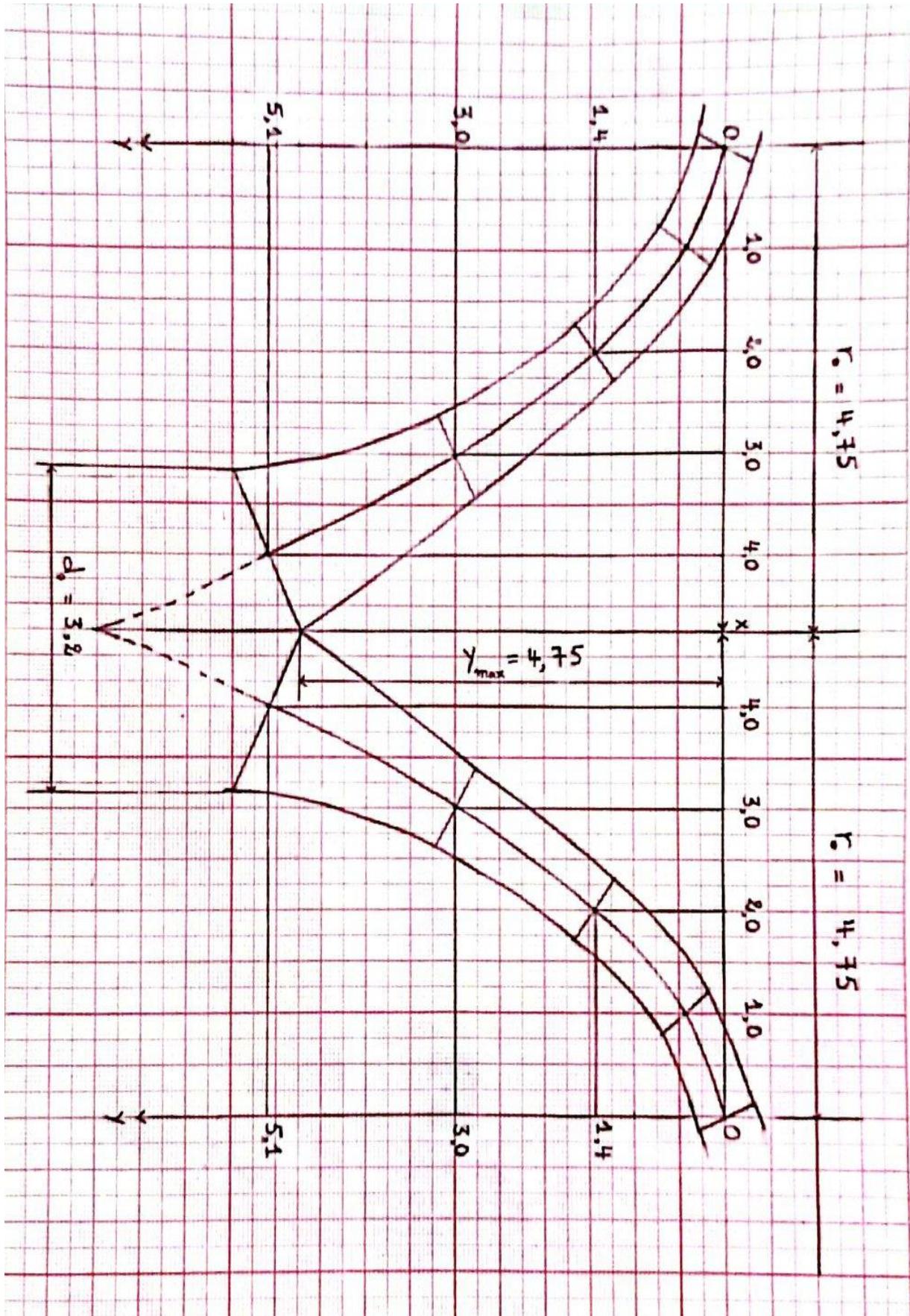


Figure (IV.1) : schéma du profilage de la tulipe d'évacuateur en puits



### IV.3. Application au cas réel du barrage Sidi Yakoub

#### IV.3.1. Description sur le barrage Sidi Yakoub

Le barrage Sidi Yakoub est situé sur l'Oued Ardjem à 20 kilomètres au Sud de la ville d'Oued Fodda dans la Wilaya de Chlef. Sa capacité est de  $286 \text{ hm}^3$ , Il est destiné à :

- L'irrigation d'un périmètre de 10 000 ha environ
- l'alimentation en eau potable de la wilaya Chlef.

La surface du bassin versant de l'oued ARDJEM est de  $920 \text{ km}^2$ . Dont l'apport moyen Annuel de l'oued est de  $98 \text{ hm}^3/\text{an}$ . L'envasement moyen annuel est de  $0.17 \text{ hm}^3/\text{an}$ .



Figure (IV.3) : photos aériennes du barrage Sidi Yakoub

#### IV.3.2. Application de la théorie du profilage (filet central)

L'évacuateur des crues est assuré par un évacuateur de crues en puits caractérisé par :

- |  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| ▪ Débit maximum :                          | $Q = 2048,36423 \text{ m}^3/\text{s}$ |
| ▪ Charge d'eau sur le seuil de déversoir : | $\bar{H} = 4,0 \text{ m}$             |
| ▪ Hauteur géométrique de l'évacuateur :    | $y_o = 52,1 \text{ m}$                |
| ▪ Diamètre de la corolle :                 | $\bar{D}_c = 40 \text{ m}$            |
| ▪ Diamètre du puits :                      | $d_o = 10 \text{ m}$                  |
| ▪ Diamètre de la section finale du coude : | $d_c = 8 \text{ m}$                   |
| ▪ Diamètre de la section de la galerie :   | $D = 10 \text{ m}$                    |

## Chapitre IV Profilage de la tulipe de l'évacuateur en puits

Dans ce cas l'entonnoir du déversoir est sans section conique ( $\alpha = 0$ ,  $L=0$ ) donc  $R=r_0 = 20m$

On détermine l'épaisseur du jet à l'extrémité de la partie conique par la formule (II.48) :

$$h_0 = 2,667m$$

On détermine la vitesse d'approche par la formule (II.47) :

$$v_0 = 6,1126m/s$$

On construit l'axe du jet à l'aide de l'équation (II.25), et nous déterminons les valeurs de  $v$  et  $h$  en utilisant les formules (II.51) et (II.52) respectivement pour les différentes valeurs de  $y$ . Nous résumons les calculs dans le tableau ci-après :

*Tableau (IV.2) : les coordonnées des points le long de l'axe du jet, les vitesses moyennes et l'épaisseur du jet des points, cas du déversoir du barrage Sidi Yacoub*

<b>X (m)</b>	<b>Y (m)</b>	<b>V (m/s)</b>	<b>h (m)</b>
0	0	6,11	2,667
1	0,13	6,13	2,799
2	0,53	6,7	2,71
3	1,18	7,55	2,54
4	2,098	8,598	2,37
5	3,28	9,78	2,22
6	4,72	11,06	2,11
7	6,43	12,4	2,02
8	8,39	13,79	1,97
9	10,62	15,21	1,95
10	13,11	16,65	1,96
11	15,87	18,11	2
12	18,88	19,59	2,08
13	22,16	21,08	2,21
14	25,7	22,58	2,41
15	29,51	24,08	2,71
16	33,57	25,59	3,19

## Chapitre IV Profilage de la tulipe de l'évacuateur en puits

Avec la même procédure, on détermine les positions des nappes supérieure et inférieure, leurs coordonnées sont regroupées dans le tableau ci-après

Tableau (IV.3) : les coordonnées des nappes supérieures et inférieure du jet de déversement, cas du barrage Sidi Yacoub

Nappe supérieure		Nappe inférieure	
X	Y	X	Y
0	-1,335	0	1,335
1	-1,32	1	1,578
2	-1,002	2	2,05
3	-0,44	3	2,797
4	0,38	4	3,82
5	1,45	5	5,11
6	2,76	6	6,68
7	4,31	7	8,54
8	6,1	8	10,68
9	8,12	9	13,13
10	10,37	10	15,86
11	12,81	11	18,92
12	15,45	12	22,32
13	18,24	13	26,09
14	21,13	14	30,29
15	24,01	15,2	36,03
16	26,699		
17	28,74		
17,5	29,17		

Le schéma du calcul obtenu dans ce cas, est illustré dans la figure ci-après :

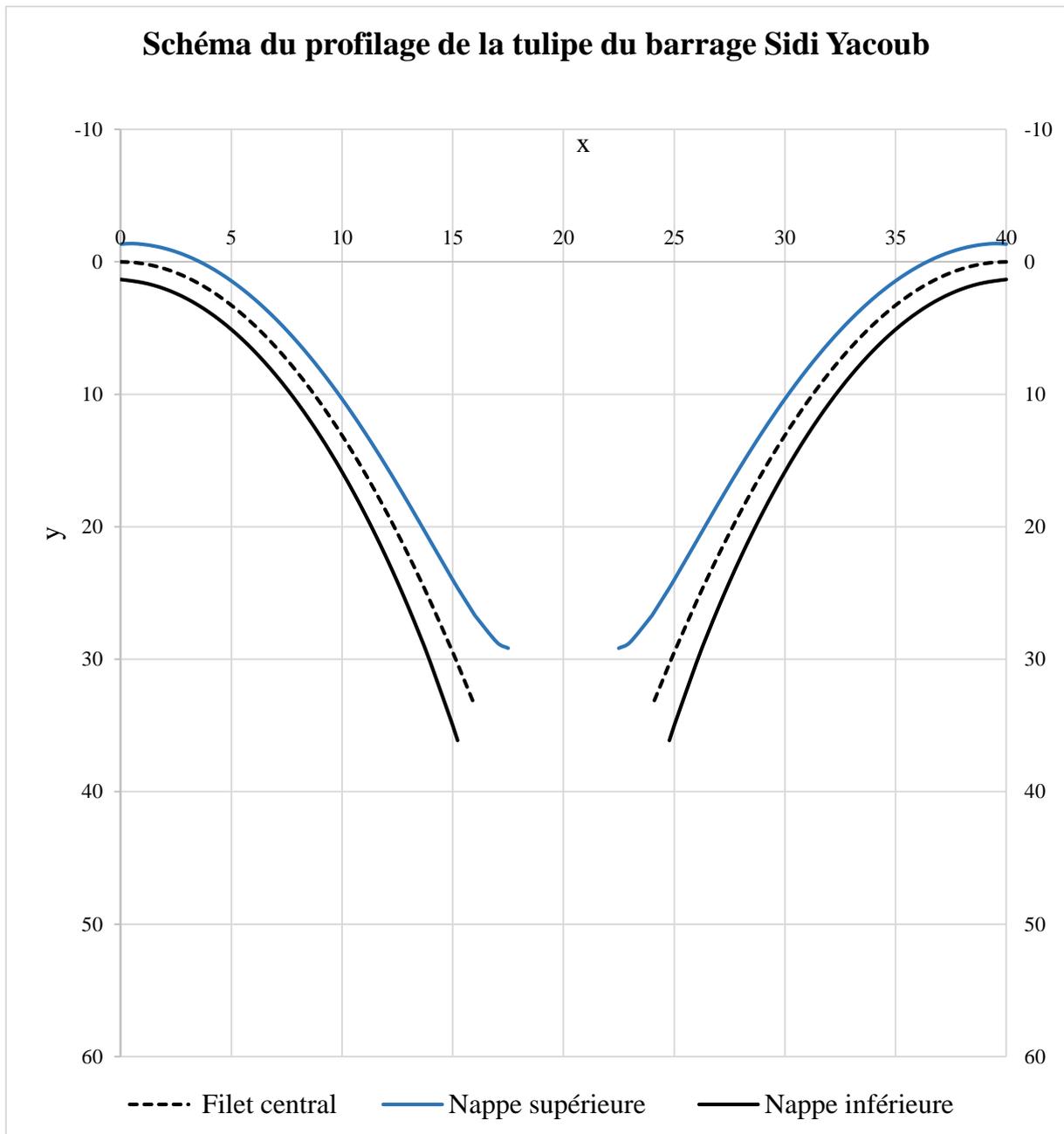


Figure (IV.4) : profilage de la tulipe du barrage Sidi Yacoub

D'après les résultats qu'on a trouvé (figure IV.4), on remarque que juste après la coordonnée d'abscisse  $x = 17,5$  m, la position de la nappe supérieure commence à monter, ce qui pose problème dans la détermination exacte du point d'intersection entre les deux nappes supérieures, ainsi que l'ordonnée  $y_{max}$  à partir duquel on place le puits. On peut justifier ça par le phénomène de CROTCH qui décrit la zone où l'écoulement commence à occuper toute la section transversale, tel qu'on appelle Boil, un volume d'eau non intéressé dans l'écoulement, qui est situé au-dessus de la zone de CROTCH (voir la figure IV.5).

Mais d'autre part, on remarque que les deux nappes supérieures convergent vers le point avec la coordonnées d'abscisse  $x=20$  m.

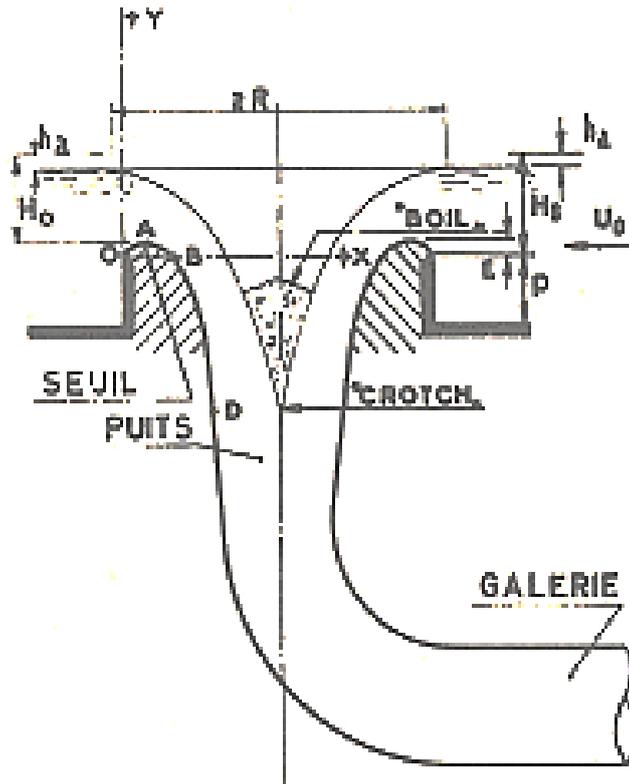


Figure (IV.5) : phénomène de CROTCH

D'après les résultats qu'on a trouvé, on remarque que la nappe inférieure s'arrête au niveau du point d'abscisse  $x=15,2$  m, et d'ordonnée  $y=36,03$  m.

Si on considère  $y_{max}=36,03$  m, on détermine la vitesse à ce niveau en utilisant la formule (II.56) :

$$v_y = 25,79m/s$$

Ensuite on peut déduire le diamètre du puits en utilisant la formule (II.55)

$$d_0 = 10,05m$$

### IV.3.3. Profil empirique de Wagner

La méthode de Wagner est utilisée pour tracer le contour des nappes inférieure et supérieure. Les coordonnées X et Y des nappes sont obtenues à partir du déversoir d'essai (les expériences de Wagner) et qui ont été divisées par  $H_s$ . Les résultats sont de forme adimensionnelle et la forme de la nappe pour n'importe quelle valeur du rayon de déversoir peut être déterminée. La figure (IV.6) représente des allures des courbes des nappes inférieures et supérieure pour les différentes valeurs de  $\frac{H_s}{R}$ . (Wagner, 1956)

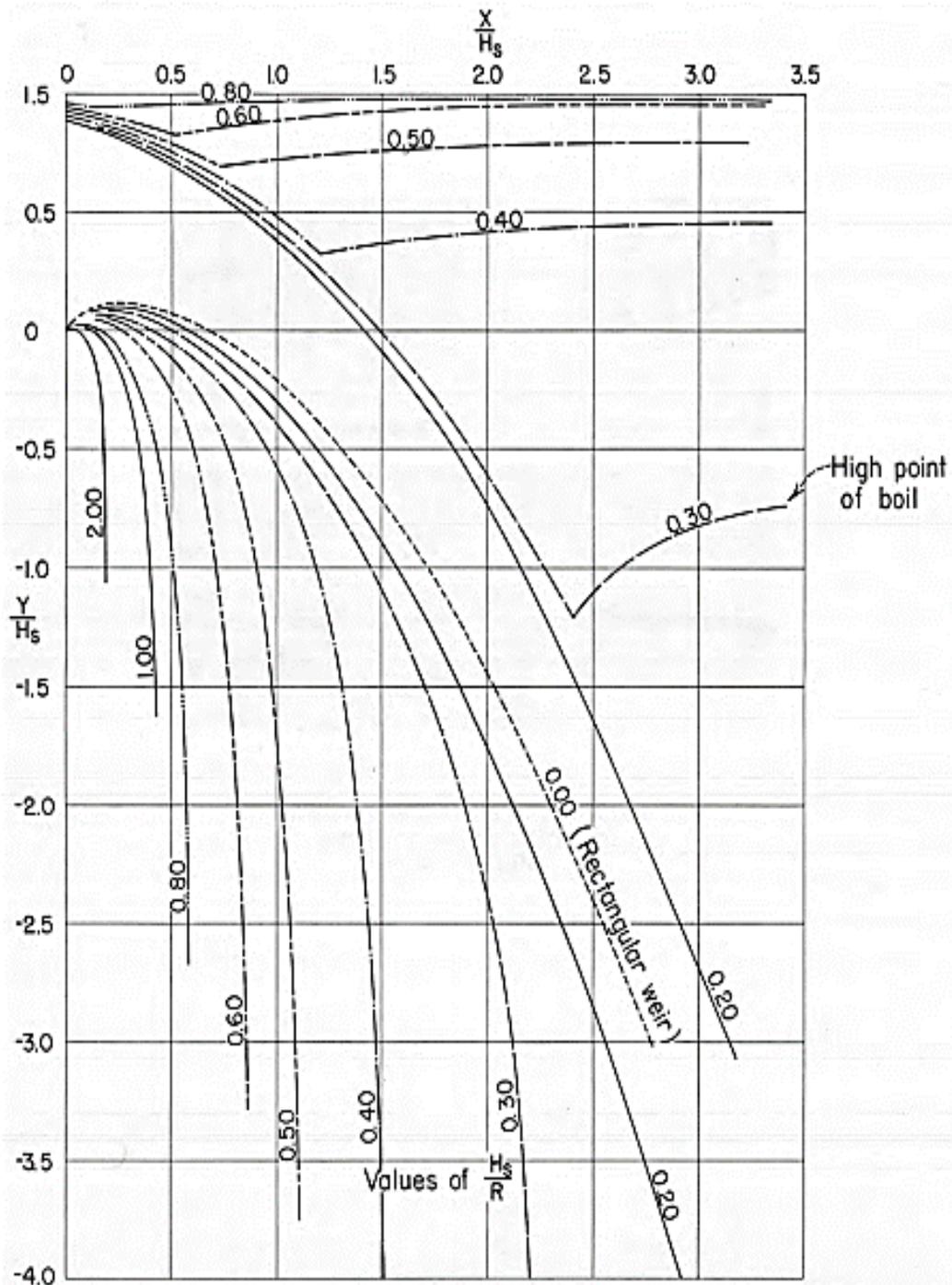


Figure (IV.6) : les allures des courbes des nappes inférieure et supérieure pour différentes valeurs de  $\frac{H_s}{R}$  (Wagner, 1956)

On a :  $H_s = 4,0m$

$R = 20,0m$

$$\frac{H_s}{R} = 0,2.$$

Afin de confirmer la fiabilité des résultats qu'on a trouvés par la méthode théorique simplifiée, on doit transformer nos résultats aux coordonnées adimensionnelles pour avoir le profil de Wagner de la tulipe du barrage Sidi Yacoub. Et dans ce cas on trace juste le tronçon ABD (figure IV.5), et donc on commence le dimensionnement à partir de la coordonnée d'abscisse

$\frac{X}{H_s}$  correspond à la valeur la plus élevée d'ordonnée  $\frac{Y}{H_s}$ , et selon la table de Wagner cette coordonnée d'abscisse correspond à  $\frac{X}{H_s} = 0,25$ ; d'où  $\frac{Y}{H_s} = 0,4$ .

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau ci-après :

*Tableau (IV.4) : les coordonnées adimensionnelles du profil de Wagner de la tulipe d'évacuateur du barrage Sidi Yacoub.*

<b>Profil de Wagner</b>			
<b>x</b>	<b>y</b>	<b>h sup</b>	<b>h inf</b>
0,25	0,4	0,734	0,067
0,375	0,392	0,744	0,039
0,5	0,367	0,729	0,0054
0,75	0,269	0,651	-0,113
1	0,105	0,509	-0,299
1,25	-0,125	0,305	-0,554
1,5	-0,4196	0,039	-0,878
1,75	-0,78	-0,289	-1,271
2	-0,206	-0,678	-1,735
2,25	-1,698	-1,125	-2,271
2,5	-2,256	-1,631	-2,88
2,75	-2,879	-2,191	-3,566
3	-3,567	-2,803	-4,331
3,25	-4,321	-3,806	-5,18
3,5	-5,141	-4,159	-6,123

Le profil de Wagner obtenu est dans la figure ci-après :

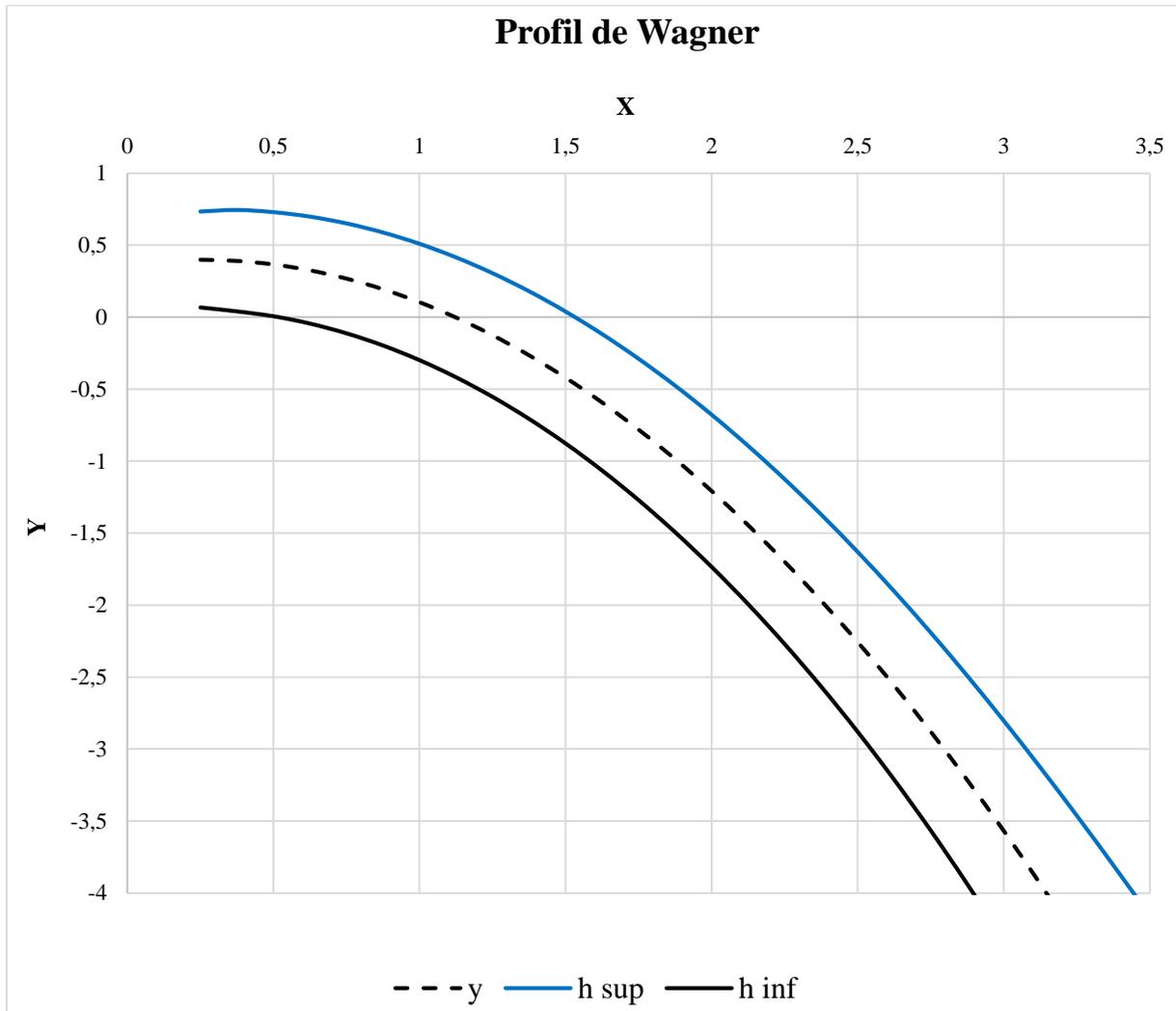


Figure (IV.7) : Profil de Wagner de la tulipe d'évacuateur de crue du barrage Sidi Yacoub

D'après les résultats qu'on a trouvés (figure IV.7), on remarque que le profil de Wagner du barrage Sidi Yacoub est presque confondu à celui de l'abaque de Wagner (figure IV.6), ce qui nous confirme la validité de la théorie simplifiée du profilage de la tulipe du barrage Sidi Yacoub.

#### IV.3.4. Superposition des deux profils théorique et empirique de Wagner

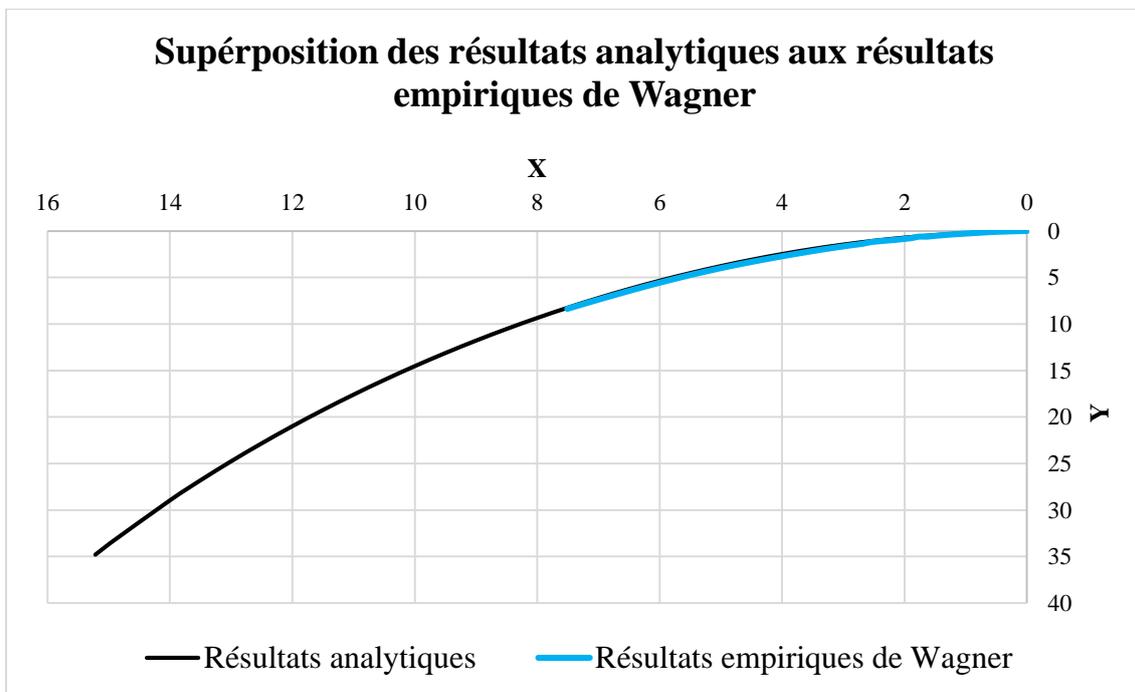
Cette fois-ci on doit déterminer le profil de Wagner de la tulipe du barrage Sidi Yacoub avec des coordonnées dimensionnelles, En vue de superposer le profil analytique obtenu par la méthode théorique simplifiée au profil empirique de Wagner, et pour cela on doit multiplier les coordonnées de la table de Wagner qui correspondent à  $\frac{H_s}{R} = 0,2$  fois  $H_s$ , et avec le même principe on trace juste le tronçon ABD (figure IV.5).

Les résultats obtenus est dans le tableau ci-après

*Tableau (IV.5) : les coordonnées dimensionnelles du profil de Wagner de la tulipe d'évacuateur du barrage Sidi Yacoub.*

x	y	x	y
0	0	2,676	1,3704
0,2	0,0304	2,904	1,5704
0,4	0,0704	3,316	1,9704
0,6	0,1224	3,688	2,3704
1,216	0,3704	4,04	2,7704
1,368	0,4504	4,688	3,5704
1,508	0,5304	5,256	4,3704
1,64	0,6104	5,764	5,1704
1,768	0,6104	6,232	5,9704
1,888	0,7704	6,672	6,7704
2,172	0,9704	7,096	7,5704
2,52	1,1704	7,507	8,3704

La superposition des deux profils analytique et celui empirique de Wagner est dans la figure suivante :



*Figure (IV.8) : superposition des profils analytique et empirique de Wagner*

**IV.3.5. Superposition des deux profils théorique et expérimental**

Afin de vérifier une autre fois la validité de la théorie simplifiée du profilage de la tulipe d'évacuateur de crue du barrage Sidi Yacoub, on doit comparer le profil théorique obtenu par la méthode théorique simplifiée avec le profil expérimental obtenu par le bureau des études (Entreprise HIDROELECTRA-Zagreb-Yougoslavie).

Le profil expérimental de la tulipe d'évacuateur de crues du barrage Sidi yacoub est déterminé selon deux équations tel que :

Le tronçon OA (figure IV.5) est obtenu par l'équation (IV.1) :

$$\frac{X}{H_p} = -0,625\left(\frac{Y}{H_p}\right)^{0,43} \quad (IV.1)$$

Le tronçon ABD (figure IV.5) est obtenu par l'équation (IV.2) :

$$\frac{Y}{H_p} = 0,6\left(\frac{X}{H_p}\right)^{1,73} + 0,00375\left(\frac{X}{H_p}\right)^{4,77} \quad (IV.2)$$

Dans notre étude de profilage, on intéresse juste pour le tronçon ABD (figure IV.5) et donc on utilise l'équation (IV.2) pour avoir le profil expérimental de la tulipe du barrage Sidi Yacoub. Les coordonnées de ce dernier sont regroupées dans le tableau ci-après : (ANBT, Sidi Yacoub)

*Tableau (IV.6) : les coordonnées du profil expérimental de la tulipe du barrage Sidi Yacoub*

<b>Profil Expérimental</b>			
<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
0	0	8	8,37
1	0,22	9	10,48
2	0,72	10	12,9
3	1,46	11	15,68
4	2,42	12	18,89
5	3,57	13	22,59
6	4,94	14	26,87
7	6,54	14,98	31,72

La superposition des deux profils théorique et expérimental est dans la figure (IV.9).

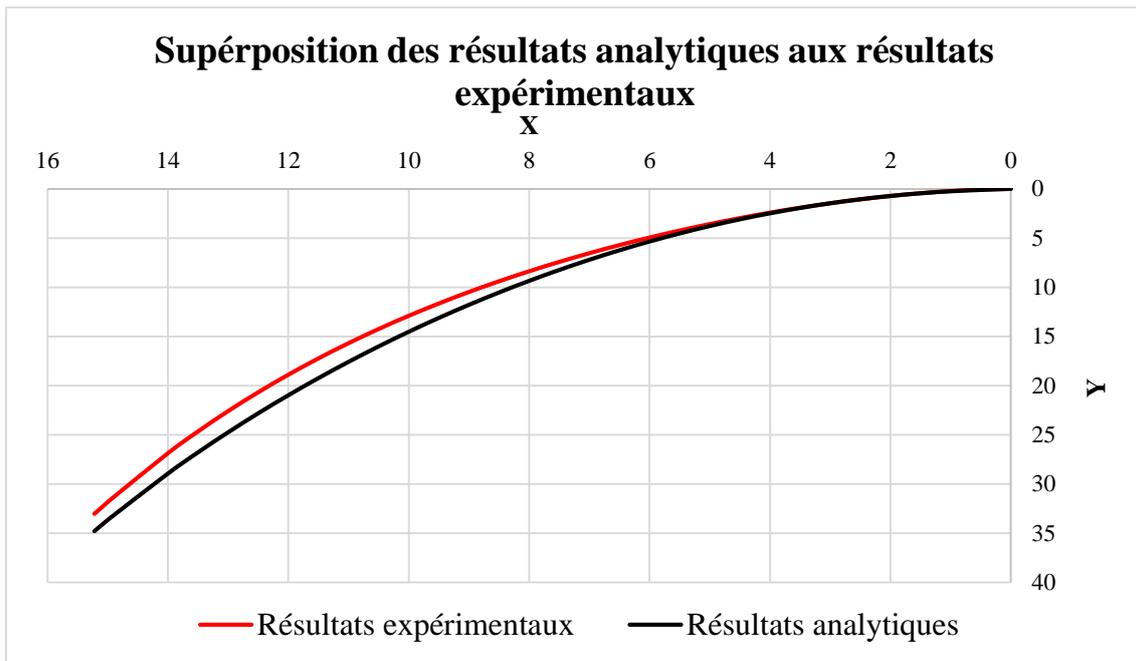


Figure (IV.9) : superposition des deux profils théorique et expérimental

#### IV.3.6. Superposition des trois profils, théorique, expérimental et celui de Wagner

Afin de comparer les résultats précédents, on doit les superposés dans un seul graphe, les résultats obtenus sont dans la figure suivante :

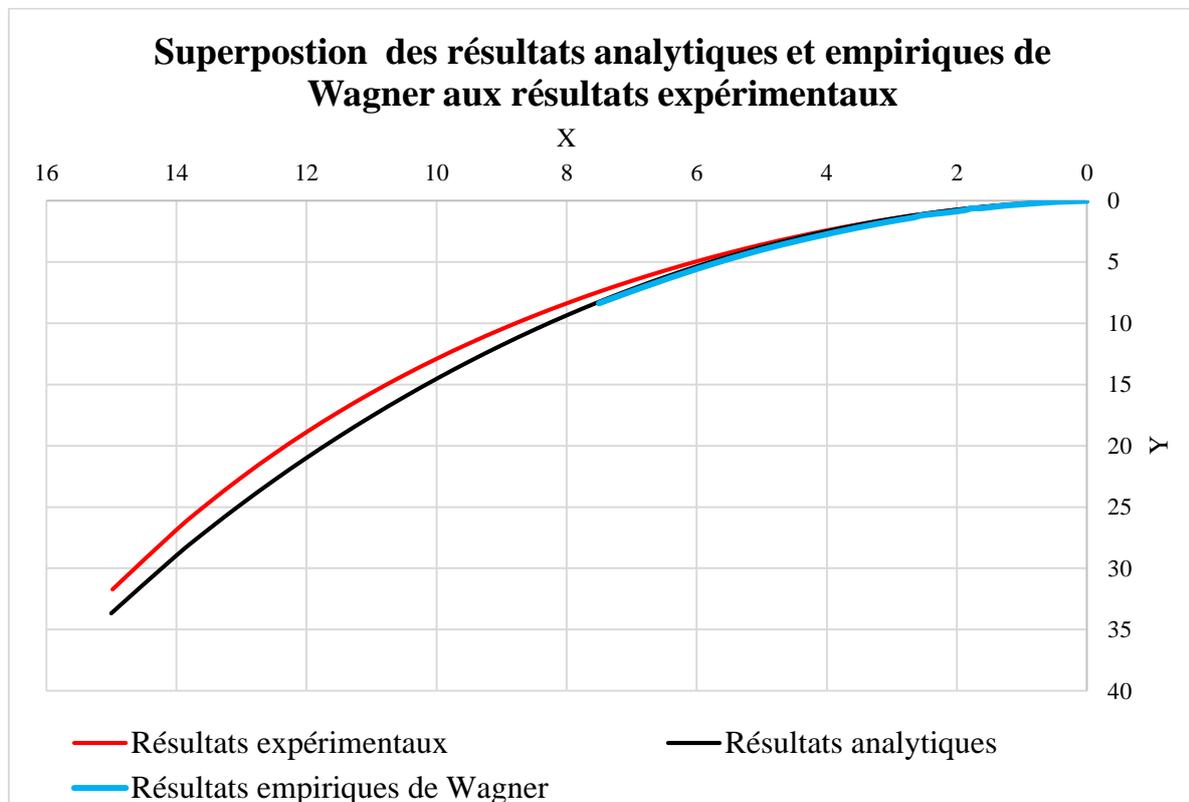


Figure (IV.10) : superposition des trois profils, théorique, expérimental et celui de Wagner

### IV.3.7. Interprétation des résultats

D'après les résultats précédents (figure IV.10) on remarque que :

Les trois profils théorique, expérimental et celui de Wagner prennent la même allure et sont presque confondus.

Le profil théorique et le profil empirique de Wagner sont confondus strictement. A ce stade on peut dire que l'hypothèse empirique de Wagner vérifie la validité de la théorie simplifiée du profilage de la tulipe de l'évacuateur du barrage Sidi Yacoub.

Le profil expérimental et le profil théorique sont presque confondus, ce qui nous assure la validité de la théorie simplifiée de profilage de la tulipe de l'évacuateur du barrage Sidi Yacoub.

### IV.4. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était d'appliquer et de vérifier la validité de la théorie simplifiée du profilage citée dans le deuxième chapitre.

L'objectif du chapitre a été atteint vu que les résultats théoriques du profilage de la tulipe d'évacuateur du barrage Sidi Yacoub sont presque confondus avec ceux du profil expérimental (réel) et strictement confondus avec ceux du profil de Wagner.

En conclusion, le chapitre prouve que la théorie simplifiée est bien adaptée pour le profilage hydrodynamique de la tulipe des évacuateurs de crues en puits.

## Conclusion Générale

L'objectif de ce travail fut d'apporter une modeste contribution à l'étude des évacuateurs de crues en puits.

De nombreux chercheurs et ingénieurs se sont penchés sur l'étude de cet ouvrage, et y ont contribué. Ce modeste travail avait pour but l'application de la méthode théorique simplifiée (trajectoire du filet central) pour le profilage de la tulipe d'un évacuateur en puits. Ce travail est décomposé en quatre chapitres, traitant un nouvel aspect de la théorie des évacuateurs en puits.

Le premier chapitre concerne une introduction sur les évacuateurs en puits, leurs différents types, son fonctionnement ainsi que le calcul de sa géométrie. Le deuxième chapitre a porté sur les deux méthodes théoriques du profilage, spécifiquement un aperçu sur la méthode théorique des potentiels des vitesses, ensuite exposer la méthode théorique simplifiée avec toutes ses particularités. Le troisième chapitre avait pour objectif de vérifier la méthode analytique simplifiée pour un cas de seuil rectiligne en saut de ski, en se basant sur les résultats expérimentaux des deux étudiants Nait Cherifi.K et Brahimi.M qui ont effectués des essais sur un modèle expérimental au niveau de laboratoire d'hydraulique de l'université de Bejaia, et ce dans le but de confronter la théorie à l'expérience. Le quatrième chapitre se focalisait sur l'application de la théorie simplifiée du profilage sur un cas du déversoir circulaire (évacuateur en puits), pour un exemple de calcul premièrement, ensuite pour un cas réel du barrage Sidi Yacoub de la wilaya de chlef-Algérie. En comparant les résultats obtenus avec le profil expérimental (réel) et le profil empirique de Wagner, et ça pour le but de vérifier la fiabilité de la théorie simplifiée de profilage de la tulipe du barrage Sidi Yacoub. On constate que les résultats souhaités sont obtenus et donc la validité de la théorie est assurée.

Le profilage de la tulipe d'un évacuateur en puits est l'un des domaines les plus mystérieux en hydraulique, et ce simple travail n'a fait qu'un aperçu sur la partie émergée de cette immense énigme. Et bien que la grandeur de ce domaine et sa complexité reste encore à découvrir, ce modeste travail représente une inauguration sur la conception du profilage.

## Bibliographie

- Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) du barrage Sidi Yacoub.
- Cedric, A., Alain, H., Paul, P., 2011, Notes de cours PHY-144, Introduction à la physique du génie.
- Fawer, C., 1937, Etude de quelques écoulements permanents à filet courbes, Thèse de doctorat en sciences techniques, Ecole d'ingénieurs de l'université de Lausanne, 1937.
- Gardel, A., 1949, Les évacuateurs de crues en déversoir circulaire, Bulletin technique de la suisse Romande N° 27.
- Hager, W.H., 1990, Vom schachtuberfall zum schachtwehr, Wasserwirtschaft 80,4.
- Hager, W.H, Shieiss, A.J., 2009, Constructions hydrauliques, Ecoulements stationnaires, Edition Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 595p.
- Himeric, Yu.A., 1957, Hydraulic structures (design and calculation), State publishing house of Technical literature of the Ukranian SSR, Kiev, 193p.
- Indelkoffer, H., 1977, Zur frage der Profilform Kelchformuger Uberfallbauwerke, Bautechnik 54, 203-207.
- Khatsuria, R.M., 2005, Hydraulics of spillway and energy dissipators, CRC press.
- Lazzari, E., 1954, Ricerrca sperimentale sullosfiatore a piante circolare. Energia Elettrica, v, 31, N° 11.
- Le Delliou, P., Aigouy, S., Degoutte, G., Derro, L., Doms, E., Frossard, E., Frachart, F., Lang, M., Lemperiere, F., al., 2013, Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages, CFBR, 166p.
- Nait Cherifi, K., Brahimi, M.I., 2020, Etude expérimentale et théorique d'évacuateur de crue en saut de ski, Mémoire de fin d'étude, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, Algérie, 58p.
- Ouamane, A., 1955, Contribution à l'étude des évacuateurs de crues en puits, Ecole National de polytechnique d'Alger.
- Poleni, J., 1717, De motu aque mixto libri duo, Typis Losephie Comini, padova.
- Sanoyan., Khoblaryan., 1960, Profilage de l'évacuateur en puits, Académie des sciences de l'Armenie URSS (en langue russe).
- Saptsin, V.P., 2005, Hydrotechnical structures for integrated and industry purpose, part earth dams, Mari state Technical University, Operational printing department, Russia, 172p.
- Wagner, W.E, 1956, Determination of pressure – Controlled profiles, Transactions ASCE, 121, 345-384.
- White, M.W., Mc Pherson, M.B., Blaisdell, F.W., Mostafa, I.M., Chanda, B., Johanson, H.P., 1956, Morning-Glory Shaft Spillways, A Symposium : Determination of Pressure-Controlled Profiles, Transactions of the American Society of Civil Engineers, 121(1), 369-379.

# ANNEXES

- Résultats expérimentales

Tableau A.3.1

Q1			
Nappe inférieure		Nappe supérieure	
X	Y	X	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

Tableau A.3.2

Q2			
Nappe inférieure		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.3.3

Q3			
Nappe inférieure		Nappe supérieure	
X	Y	X	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.3.4

Q4			
Nappe inférieure		Nappe supérieure	
X	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

Tableau A.3.5

Q5			
Nappe inférieure		Nappe supérieure	
X	Y	X	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

- **Résultats analytiques cas sans frottement**

Tableau A.3.6

Q1					
Filet central		Nappe supérieure		Nappe inférieure	
X	Y	X	Y	X	Y
0	3,4	0	3,8	0	3
0,5	3,51	0,5	3,9	0,5	3,12
1	3,53	1	3,92	1	3,15
1,5	3,47	1,5	3,86	1,5	3,08
2	3,32	2	3,73	2	2,91
2,5	3,09	2,5	3,53	2,5	2,65
3	2,76	3	3,24	3	2,29
3,5	2,36	3,5	2,87	3,5	1,84
4	1,86	4	2,43	4	1,3
4,5	1,28	4,5	1,9	4,5	0,67
5	0,62	5	1,28	4,96	0
5,41	0	5,87	0		

Tableau A.3.7

Q2					
Filet central		Nappe supérieure		Nappe inférieure	
X	Y	X	Y	X	Y
0	3,17	0	3,34	0	3
1	3,41	1	3,58	1	3,25
2	3,54	2	3,7	2	3,38
3	3,54	3	3,7	3	3,38
4	3,42	4	3,58	4	3,25
5	3,17	5	3,34	5	3
6	2,81	6	2,98	6	2,63
7	2,32	7	2,5	7	2,14
8	1,71	8	1,9	8	1,52
9	0,98	9	1,18	9	0,77
10	0,12	10	0,34	9,89	0
10,13	0	10,36	0		

Tableau A.3.8

Q3					
Filet central		Nappe supérieure		Nappe inférieure	
X	Y	X	Y	X	Y
0	3,17	0	3,39	0	2,95
1	3,43	1	3,65	1	3,21
2	3,59	2	3,8	2	3,37
3	3,65	3	3,87	3	3,44
4	3,62	4	3,84	4	3,41
5	3,49	5	3,71	5	3,27
6	3,27	6	3,49	6	3,04
7	2,94	7	3,17	7	2,72
8	2,53	8	2,76	8	2,29
9	2,01	9	2,26	9	1,76
10	1,4	10	1,66	10	1,14
11	0,69	11	0,96	11	0,42
11,86	0	12,2	0	11,53	0

Tableau A.3.9

Q4					
Filet central		Nappe supérieure		Nappe inférieure	
X	Y	X	Y	X	Y
0	3,25	0	3,5	0	3
1	3,51	1	3,75	1	3,26
2	3,68	2	3,92	2	3,44
3	3,75	3	3,99	3	3,51
4	3,74	4	3,98	4	3,5
5	3,63	5	3,88	5	3,39
6	3,43	6	3,68	6	3,19
7	3,14	7	3,4	7	2,89
8	2,76	8	3,02	8	2,5
9	2,29	9	2,56	9	2,02
10	1,73	10	2	10	1,44
11	1,07	11	1,36	11	0,78
12,39	0	12,77	0	12,01	0

Tableau A.3.10

Q5					
Filet central		Nappe supérieure		Nappe inférieure	
X	Y	X	Y	X	Y
0	3,5	0	4	0	3
1	3,78	1	4,27	1	3,29
2	3,99	2	4,48	2	3,51
3	4,15	3	4,63	3	3,67
4	4,25	4	4,72	4	3,77
5	4,29	5	4,76	5	3,81
6	4,27	6	4,74	6	3,79
7	4,19	7	4,66	7	3,71
8	4,05	8	4,53	8	3,57
9	3,85	9	4,34	9	3,37
10	3,6	10	4,09	10	3,1
11	3,28	11	3,78	11	2,78
12	2,9	12	3,42	12	2,39
13	2,47	13	2,99	13	1,95
14	1,98	14	2,51	14	1,44
15	1,42	15	1,97	15	0,87
16	0,81	16	1,38	16,36	0
17,19	0	17	0,72		
		18	0		

- Résultats analytiques cas avec frottement fluide laminaire

Tableau A.3.11

Q1					
Filet central		Nappe supérieure		Nappe inférieure	
X	Y	X	Y	X	Y
0	3,4	0	3,8	0	3
0,5	3,51	0,5	3,9	0,5	3,12
1	3,53	1	3,92	1	3,14
1,5	3,47	1,5	3,86	1,5	3,08
2	3,32	2	3,73	2	2,9
2,5	3,09	2,5	3,53	2,5	2,65
3	2,76	3	3,24	3	2,28
3,5	2,36	3,5	2,87	3,5	1,83
4	1,85	4	2,42	4	1,29
4,5	1,28	4,5	1,81	4,5	0,66
5	0,6	5	1,27	4,95	0
5,39	0	5,86	0		

Tableau A.3.12

Q2					
Filet central		Nappe supérieure		Nappe inférieure	
X	Y	X	Y	X	Y
0	3,17	0	3,34	0	3
1	3,41	1	3,58	1	3,25
2	3,54	2	3,7	2	3,38
3	3,54	3	3,7	3	3,38
4	3,41	4	3,58	4	3,25
5	3,17	5	3,34	5	3
6	2,8	6	2,98	6	2,63
7	2,31	7	2,49	7	2,13
8	1,7	8	1,89	8	1,5
9	0,96	9	1,16	9	0,75
10	0,1	10	0,31	9,86	0
10,1	0	10,33	0		

Tableau A.3.13

Q3					
Filet central		Nappe supérieure		Nappe inférieure	
X	Y	X sup	Y sup	X inf	Y inf
0	3,17	0	3,39	0	2,95
1	3,43	1	3,65	1	3,21
2	3,59	2	3,8	2	3,37
3	3,65	3	3,87	3	3,44
4	3,62	4	3,84	4	3,41
5	3,49	5	3,71	5	3,27
6	3,26	6	3,49	6	3,04
7	2,94	7	3,17	7	2,71
8	2,52	8	2,75	8	2,28
9	2	9	2,24	9	1,75
10	1,38	10	1,64	10	1,12
11	0,67	11	0,94	11	0,4
11,82	0	12,15	0	11,49	0

Tableau A.3.14

Q4					
Filet central		Nappe supérieure		Nappe inférieure	
X	Y	X	Y	X	Y
0	3,25	0	3,5	0	3
1	3,51	1	3,75	1	3,26
2	3,68	2	3,92	2	3,44
3	3,75	3	3,99	3	3,51
4	3,74	4	3,98	4	3,5
5	3,63	5	3,88	5	3,39
6	3,43	6	3,68	6	3,18
7	3,14	7	3,39	7	2,89
8	2,75	8	3,02	8	2,49
9	2,28	9	2,55	9	2
10	1,71	10	1,99	10	1,43
11	1,05	11	1,34	11	0,75
12,35	0	12,72	0	11,97	0

Tableau A.3.15

Q5					
Filet central		Nappe supérieure		Nappe inférieure	
X	Y	X	Y	X	Y
0	3,5	0	4	0	3
1	3,78	1	4,27	1	3,29
2	3,99	2	4,48	2	3,51
3	4,15	3	4,63	3	3,67
4	4,25	4	4,72	4	3,77
5	4,29	5	4,76	5	3,81
6	4,27	6	4,74	6	3,79
7	4,19	7	4,66	7	3,71
8	4,05	8	4,53	8	3,56
9	3,85	9	4,33	9	3,36
10	3,59	10	4,08	10	3,1
11	3,27	11	3,77	11	2,76
12	2,89	12	3,4	12	2,38
13	2,45	13	2,97	13	1,92
14	1,95	14	2,49	14	1,41
15	1,39	15	1,94	15	0,84
16	0,77	16	1,34	16,3	0
17,31	0	17	0,68		
		17,93	0		

- Table de Wagner

## A.4.1

Table de Wagner pour $H_s/R = 0,2$			
$x/H_s$	$y/H_s$	$x/H_s$	$y/H_s$
0	0	0,554	0
0,01	0,0133	0,592	-0,02
0,02	0,025	0,627	-0,04
0,03	0,035	0,66	-0,06
0,04	0,0435	0,692	-0,06
0,05	0,0506	0,722	-0,1
0,06	0,057	0,793	-0,15
0,07	0,0627	0,88	-0,2
0,08	0,0677	0,919	-0,25
0,09	0,0722	0,976	-0,3
0,1	0,0762	1,079	-0,4
0,12	0,0826	1,172	-0,5
0,14	0,0872	1,26	-0,6
0,16	0,0905	1,422	-0,8
0,18	0,0927	1,564	-1
0,2	0,0938	1,691	-1,2
0,25	0,0926	1,808	-1,4
0,3	0,085	1,918	-1,6
0,35	0,075	2,024	-1,8
0,4	0,062	2,126	-2

## Résumé :

Les évacuateurs de crues ont considérés parmi les ouvrages les plus compliqué à réaliser dans le domaine hydraulique. Ainsi le sous dimensionnement ou le dysfonctionnement de ces derniers constitue une des causes principales de rupture de barrage, et donc la nécessité d'un bon profilage des évacuateurs de crue. Cette étude présentera l'évacuateur de crue en puits dans son ensemble, elle se focalisera sur la théorie simplifié, pour le profilage de la tulipe, elle tendra de vérifier sa validité par leur application au cas de seuil rectiligne en saut de ski et au cas réel du barrage de Sidi Yacoub.

Les résultats obtenus nous ont aidés à atteindre l'objectif de notre travail en l'occurrence le profilage hydrodynamique de la tulipe d'un évacuateur de crue en puits.

## Abstract:

Spillways are considered among the most complicates construction to design in hydraulic field. Thus the under sizing or the dysfunction of these is one of the main causes of dams failure, and there for the need for good profiling of spillways. This study will present the shaft spillway as a whole, it focuses on the simplified theoretical method for tulip profiling. It will try to check its validity by their application in the case of a straight threshold on a ski jump, and to the real case of a dam Sidi Yacoub.

The results obtained helped us to achieve the objective of our work in this case determining the profiling tulip of shaft spillways.

## ملخص

تعتبر مجاري الفيضانات من أكثر الأعمال تعقيدا التي يتعين تنفيذها في مجال الهيدروليكي, حيث أي خطأ في تحجيم أو تعطيل, يشكل أحد الأسباب لإنهيار السد, و بالتالي ضرورة التنميط الجيد لمجاري الفيضانات. ستعرض هذه الدراسة كامل جهاز الفيضانات, حيث ستركز على الطريقة النظرية المبسطة من أجل تحديد مدخل مجرى الفيضانات والتحقق من صلاحيتها بتطبيقها على سد Creager المجهز بقفزة تزلج و أيضا تطبيقها على سد سيدي يعقوب.

النتائج التي تحصلنا عليها ساعدتنا على تحقيق الهدف من عملنا في هذه الحالة بتحديد شكل المدخل لمجاري الفيضانات.