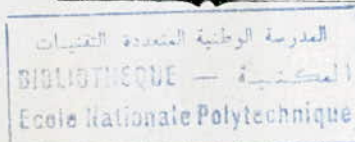


13/90

وزارة التعليم العالي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR



2ex

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : *HYDRAULIQUE*

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

ETUDE DES EVACUATEURS PUIITS(EN TULIPE)

Proposé par :

MOULOUDI Y.

Etudié par :

SAHLI S.
SAIDANI S.

Dirigé par :

MOULOUDI Y.

PROMOTION : Juin:90



- (/) EDICACES -

A mon Père et à ma Mère

A ma Soeur

A mes Frères

A mon Professeur M^l KRUCZEK WITOLD qui a su m'inculquer les bases de la Mécanique des Fluides.

SAHLI Samir

A ma Mère et à mon Père

A mes Frères et Soeurs

A Mahmoud

A mon Collègue et sa famille

A tous mes amis pour leur soutien et leurs encouragements.

SAIDANI Saâd

- //-(E M E R C I E M E N T S -

Nos sincères remerciements à :

- Notre Promoteur M^r MOULOUDI Yahia pour son aide tout le long de l'élaboration de notre travail
- M^r BAHIDJ.B. qui nous a aidé avec ses remarques et suggestions ainsi que les Enseignants du Département d'Hydraulique de l'E.N.P. qui ont contribué à notre Formation
- Sans oublier le Directeur de la Salle HARCHA - M^r SAHLI Boualem, le Président Directeur Général de l'ERAD-ALGER et sa Secrétaire pour la frappe du document.

SAHLI Samir

SAIDANI Saâd

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Departement : HYDRAULIQUE
Promoteur : MOULOUDI YAHIA
Elève Ingénieur : SAIDANI SAAD
SAHLI SAMIR

الموضوع : دراسة المفرغات البثرية (ذات الشكل الخزامى)
الملخص :

هذه الأطروحة تعرض مختلف الطرق للحسابات الخاصة بالمفرغات البثرية ذات الشكل الخزامى حيث تعالج تحديد الابعاد الهيدروليكية لمختلف الاجزاء المكونة لهذا النوع من المفرغات ، أى :
القطر عند عتبة قمة المفرغ ، شكل القمة ، المنطقة الانتقالية ، البثر العمودى ، رواق التصريف وأخيرا فتحة التهوية .
من أجل المقارنة بين هذه الطرق ، قمنا بتطبيقها على منشأة موجودة أصلا .

Sujet : Etude des évacuateurs puits (en tulipe) .

Resumé:

Ce travail présente différentes méthodes de calcul relatives aux déversoirs puits en tulipe , il traite du dimensionnement hydraulique des différentes parties constituant ce type de déversoirs , à savoir :

diamètre du seuil déversant ; profil de la crête ; zone de transition ; puits vertical ; coude ; galerie d'évacuation et cheminée d'aération .

Dans le but de comparer ces méthodes ; une application a été faite sur un ouvrage existant.

Subject: The study of shaft spillway (morning glory)

Abstract:

This assignment presents different methods of calculus relative to morning glory shaft spillway . It deals with a hydraulic dimensionnement of the different parts constituting this type of weir . i.e. :

The spill sills diameter ; crest profile ; transition zone ; vertical shaft ; bend ; the evacuation's gallery and the air vent .

In order to compare these different methods , a study has been done at an existing work .

S O M M A I R E

| | <u>Page</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| INTRODUCTION | 1 |
| 1. CRITERES D'ETABLISSEMENT DES EVACUATEURS EN TULIPE | 4 |
| 1.1. CRITERES TOPOGRAPHIQUES | 4 |
| 1.2. CRITERES GEOLOGIQUES | 4 |
| 2. DEBIT DE DIMENSIONNEMENT DES EVACUATEURS DE CRUES | 5 |
| 2.1. CRUE DE DIMENSIONNEMENT | 5 |
| 2.2. DEBIT DE DIMENSIONNEMENT | 6 |
| 3. GENERALITES SUR LES EVACUATEURS EN TULIPE | 8 |
| 3.1. DESCRIPTION | 8 |
| 3.2. ETUDE QUALITATIVE DU FONCTIONNEMENT | 9 |
| 3.3. ETUDE QUANTITATIVE | 13 |
| 4. THEORIES DE DIMENSIONNEMENT DES EVACUATEURS EN TULIPE | 15 |
| 4.1. RECHERCHE DE M ^{re} ANDRE. GARDEL | 15 |
| 4.1.1. ECOULEMENT DENOYE | 15 |
| 4.1.2. ECOULEMENT NOYE | 17 |
| 4.2. RECHERCHE DE M ^{re} W.E. WAGNER | 20 |
| 4.2.1. OBJET DES TRAVAUX | 20 |
| 4.2.2. INTERPRETATION ET ANALYSE DES RESULTATS | 22 |
| 2.2.1. PROFILS DE LA NAPPE | 26 |
| 1.a. EFFET DE LA PROFONDEUR D'APPROCHE SUR LE PROFIL DE LA NAPPE | 28 |
| 1.b. EFFET DES DEPRESSIONS SUR LA NAPPE | 29 |
| α . SUR LA SURFACE INFERIEURE..... | 29 |
| β . SUR LA SURFACE SUPERIEURE..... | 30 |
| 1.c. EFFET DE LA VITESSE D'APPROCHE | 30 |
| 2.2.2. RELATION ENTRE L'ELEVATION MAXIMUM E DE LA SURFACE INFERIEURE DE LA NAPPE ET LE DEBIT Q AU RAYON DU DEVERSOIR | 30 |
| 2.2.3. LIMITATION A L'APPLICATION DE LA METHODE | 32 |
| 4.3. REVUE "CONSTRUCTION HYDRAULIQUE "URSS | 39 |
| 4.3.1. CAPACITE DU DEVERSOIR CIRCULAIRE | 39 |
| 4.3.2. CALCUL DU DEBIT POUR LES DIFFERENTS DOMAINES D'ECOULEMENT .. | 40 |
| 4.3.3. PROFIL DU DEVERSOIR DE L'EVACUATEUR | 41 |

| | |
|------------------------------------------------------------------|----|
| 4.3.4. TRANSITION DEVERSOIR - PUIT'S | 44 |
| 4.3.5. LE PUIT'S VERTICAL | 45 |
| 4.3.6. LE COUDE | 45 |
| 4.3.7. LA GALERIE D'EVACUATION | 46 |
| 4.3.8. INFLUENCE ET AMELIORATION DES CONDITIONS D'APPROCHE | 47 |
| 4.4. RECHERCHE DE M ^{re} A. LENCASTRE | 49 |
| 4.4.1. CONNECTION DU DEVERSOIR AU PUIT'S VERTICAL..... | 49 |
| 4.4.2. CONNECTION DU PUIT'S VERTICAL A LA GALERIE | 50 |
| 4.4.3. LES PILIERS OU GUIDEAX | 51 |
| 4.4.4. ETUDE DE LA GALERIE | 52 |
| REMARQUE | |
| 4.5. RECHERCHE DE M ^{re} N.MARTINS | 52 |
| 4.5.1. POSITION DU PROBLEME | 56 |
| 4.5.2. L'ENTREINEMENT D'AIR | 57 |
| 4.5.3. EMPLACEMENT DE LA CHEMINEE D'AERATION | 60 |
| 4.5.4. DIMENSIONNEMENT DE LA CHEMINEE D'AERATION | 61 |
| 5. <u>APPLICATION A UN OUVRAGE EXISTANT</u> | 62 |
| CONCLUSION GENERALE | 78 |

INTRODUCTION

A l'élaboration d'un projet de retenue parmi les ouvrages à prévoir, nous citerons : les évacuateurs de crue.

Selon les conditions locales, la nature du barrage, les débits d'eau à évacuer et la hauteur de chutes, les évacuateurs de crue sont disposés conjointement aux ouvrages de barrage ou séparément, isolément ou conjointement à d'autres dispositifs d'exploitation, tels que les vidanges de fonds ou autres.

Pour le cas de l'Algérie dont les terrains sont en général de qualité médiocre, la plupart des barrages construits sont en terre ou en pierres, qui nécessitent donc des organes d'évacuation séparés du corps; d'où l'intérêt, pour nous d'étudier ce type d'évacuateurs.

DEFINITION : Un évacuateur de crue est un ouvrage complexe destiné à maintenir le niveau de retenue constant et à permettre le passage des débits de crue au droit d'un barrage, sans que cet ouvrage ou ses fondations ne risquent d'être endommagés par submersion ou par affouillement et sans que le niveau du plan d'eau amont, en période de crue, ne dépasse le niveau de retenue exceptionnel.

Les évacuateurs comprennent essentiellement :

- un ouvrage de tête assurant le guidage ou l'entonnement du débit; un canal à l'air libre ou en galerie dans lequel le débit de crue s'écoule de l'amont vers l'aval.

Il faut remarquer que l'évacuateur de crue est souvent un ouvrage important, d'un prix du même ordre de grandeur que celui du barrage proprement dit.

La mise au point de son projet (reconnaissance sur le site, étude hydraulique, étude de variante, essais hydrauliques sur modèle) mérite donc d'être particulièrement approfondie, afin d'obtenir le meilleur parti du point de vue de la sécurité et de l'économie.

Parmi les types de déversoirs, généralement utilisés dans les barrages en terre, les déversoirs en tulipe présentent des avantages certains :

- simplicité de l'ouvrage de génie-civil dont les formes sont de révolution et de dimensions réduites;
- diminution de l'emprise au sol de l'ouvrage dont les dimensions en plan sont minimales, ce qui entraîne une diminution des coûts de terrassement;
- du fait qu'il soit séparé du corps du barrage, sa construction pourra se faire parallèlement à celle du barrage;
- intégration de la dérivation provisoire.

Dans ce type d'évacuateurs, l'eau transite vers l'aval du barrage par une galerie ou par une conduite de gros diamètre, disposée sous le barrage ou latéralement en rive. Cette conduite est alimentée par l'intermédiaire d'un déversoir de surface en crête ronde, souvent circulaire, appelé tulipe.

Le déversoir circulaire est généralement monté sur une tour qui sert également de tour de prise d'eau et qui est reliée à la galerie d'évacuation; celle-ci joue également le rôle de conduite de vidange.

Dans ce qui suit, nous nous attacherons à exposer les méthodes de prédimensionnement de tels ouvrages, c'est à dire que dans le cas où un évacuateur en tulipe serait retenu comme variante d'un aménagement, connaissant le débit à évacuer et la charge maximale admise au dessus de la crête; déterminer toutes les caractéristiques géométriques qui serviront soit au dimensionnement avec une bonne sécurité et proche de l'optimum dans le cas des petits ouvrages, et à aider le concepteur à faire des dimensionnements initiaux meilleurs pour les études sur modèles réduits physiques, car il faut préciser ici qu'il n'est pas question de se passer de celles-ci.

Si les types d'évacuateurs de crue sont nombreux et variés, leur choix pose souvent de délicats problèmes et il semble bien difficile d'énoncer des règles précises fixant les conditions d'emploi de chacun d'eux.

D'autre part, il ne faut pas perdre de vue que dans tout projet d'aménagement hydraulique il existe toujours une série de variantes d'études et le choix définitif revient, en dernier lieu, à l'aspect économique.

Nous concluons en disant qu'il est en tout cas ^{eu}inconvenable que les organes dits de dérivation provisoire ne soient pas intégrés dans l'ouvrage définitif car ce sont des ouvrages importants qui sont en général capables d'évacuer, sous faible charge, des débits importants.

1 - CRITERES D'ETABLISSEMENT DES EVACUATEURS EN TULIPE

Dans la mise en oeuvre de ce type d'évacuateurs, le site doit répondre à certains critères surtout topographiques et géologiques.

1.1. Critères topographiques :

D'une manière générale, les déversoirs en puits sont implantés sur une plate forme autour de laquelle on cherche à donner la forme appropriée pour que les conditions d'alimentation soient radiales ou très proches de celle-ci.

Dans le cas où la gorge est étroite et les pentes abruptes, ce qui interdit d'opter pour un déversoir latéral ou frontal, on pourra décider de l'établissement de l'évacuateur en puits dans l'une des rives, ceci pour les conditions topographiques.

1.2. Critères géologiques :

Pour ce qui est des conditions géologiques, nous pouvons dire qu'à cause du grand développement en hauteur de ce type d'ouvrage, qu'il sera nécessaire de garantir une très bonne qualité du sol au moins localement au niveau de la fondation de l'ouvrage d'évacuation.

2 - DEBIT DE DIMENSIONNEMENT DES EVACUATEURS DE CRUE

2.1. Crue de dimensionnement :

Les évacuateurs de crue doivent assurer le passage des débits laminés maximums de la crue des cours d'eau ou de la crue des averses dans le cas où la retenue est remplie jusqu'au niveau normal de la retenue.

Pour la détermination des débits maximums de crue, il faut toujours avoir à l'esprit l'incertitude avec laquelle ceux-ci sont connus, c'est à dire qu'au lieu de dimensionner l'évacuateur pour le débit laminé maximum sans se soucier de ce qui peut se passer, si celui-ci venait à être dépassé, il serait plus réfléchi de le dimensionner de telle sorte que les dégâts soient nuls ou insignifiants jusqu'à un certain débit, et savoir prévoir l'importance des dégâts si ce débit venait à être dépassé.

Il faudra dans tous les cas, chercher à éviter les catastrophes majeures si faible que soit leur probabilité.

Il ne faut pas oublier aussi que les méthodes utilisées pour le calcul du débit maximum de crue sont en général, entachées d'erreurs, du fait que chaque bassin versant a sa propre Loi.

Le Docteur RAJU (Inde) recommande de ne baser la conception des grands ouvrages sur aucune formule; mais vu que les formules sont nécessaires pour l'Ingénieur, il faudra faire attention aux limitations de celles utilisées (9).

Le Docteur RAO a montré dans un petit résumé de 24 formules différentes avec lesquelles il a calculé le débit maximum sur une rivière, que les résultats obtenus variaient de 1 à 3,5 soit 350% d'erreurs (9).

Pour différents barrages étudiés et réalisés en Algérie au cours des Quinze (15) dernières années, il a été admis que l'on retiendrait, pour les digues, les prescriptions suivantes :

- dimensionner les ouvrages avec la crue millénaire.
- La crue Cinq millénaire doit être évacuée, en toute sécurité, en maintenant une revanche ultime suffisante face aux vagues dans la retenue et aux tassements possibles de la digue en cas de séisme; cette revanche n'est pas inférieure à 2 m.
- Il convient de s'assurer que si la revanche ultime est utilisée, le plan d'eau amont, au delà des plus hautes eaux, avant d'atteindre le couronnement de la digue, doit permettre le passage de la crue dix millénaire, avec peut être quelques dégâts, mais sans que soit mise en cause la sécurité du barrage.

2.2. Débit de dimensionnement :

Dans un réservoir de superficie donnée, quand une crue arrive, une partie du débit de celle-ci est stockée, momentanément, dans la tranche disponible entre le niveau normal de la retenue (NNR) et celle des plus hautes eaux (NPHE), l'autre s'écoule par le déversoir sous l'effet de l'élévation du plan d'eau.

On voit donc bien, que plus la surface du plan d'eau est grande, plus

$$\begin{array}{rcll} Q_e(t) dt & = & Q_s(t) dt & + A(Z) dZ \\ \text{élément de} & & \text{élément de} & \text{Variation} \\ \text{volume} & = & \text{volume} & + \text{de volume} \\ \text{entrant} & & \text{sortant} & \text{dans la retenue.} \end{array}$$

t : temps

Z : Côte du plan d'eau;

Q_e : débit de crue entrant dans la retenue;

Q_s : débit sortant de la retenue par l'évacuateur de crue;

$A(Z)$: aire du plan d'eau à la côte Z .

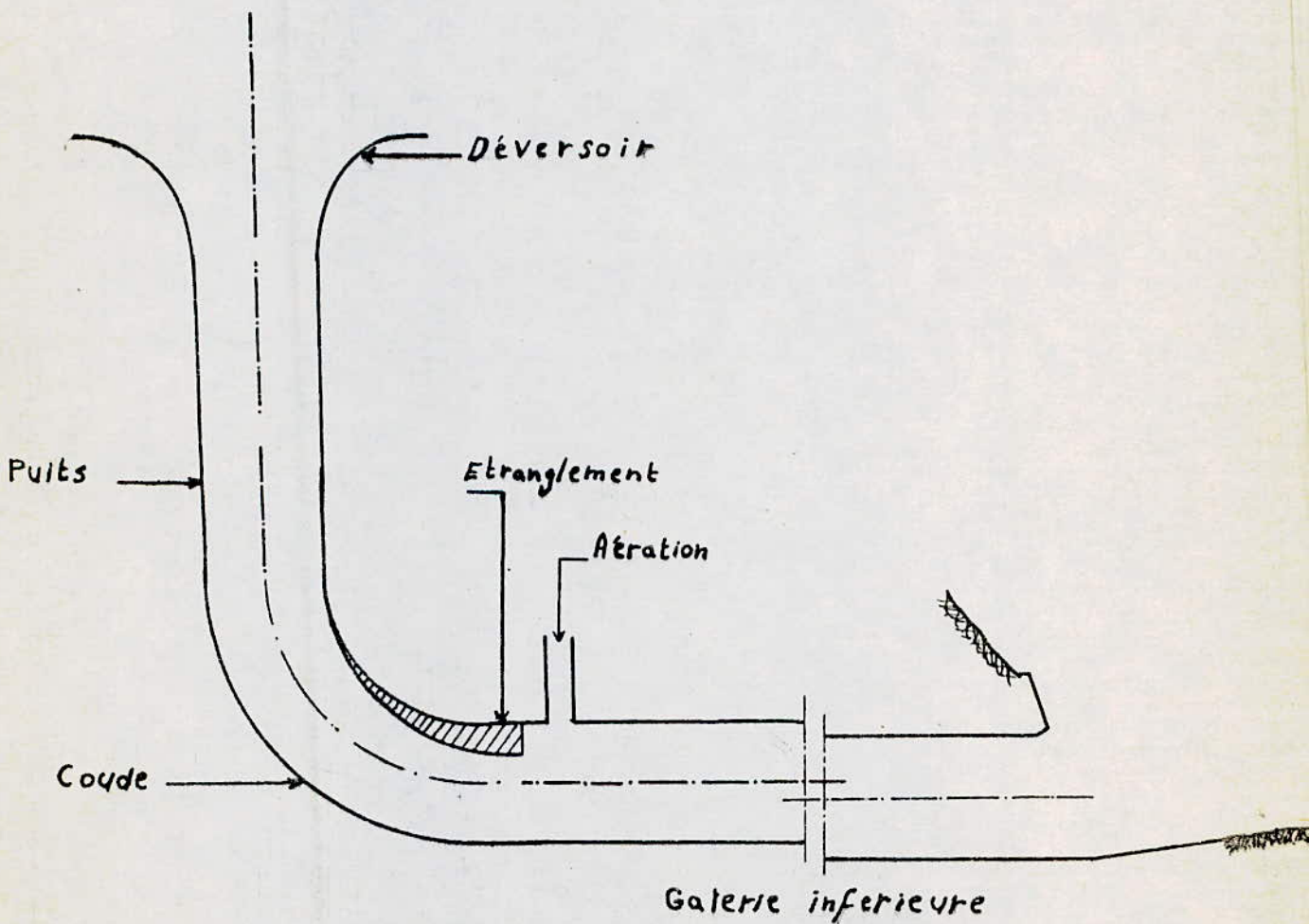
L'étude du laminage consiste soit à déterminer la côte maximale atteinte par le plan d'eau permettant le passage de la crue, les dimensions de l'évacuateur de crue étant fixées à priori, soit à déterminer les dimensions de l'évacuateur de crue, la hauteur maximale du plan d'eau au dessus de l'évacuateur de crue étant fixée à priori.

3 - GENERALITES SUR LES EVACUATEURS EN TULIPE

3.1. Description :

Ce type d'évacuateur de crue est généralement constitué :

- d'un déversoir circulaire de profil étudié;
- d'un puit vertical ou incliné;
- d'un coude muni ou non d'un déflecteur;
- d'une galerie d'évacuation plus ou moins inclinée équipée d'une cheminée d'aération.



3.2. Etude qualitative du fonctionnement :

Avant d'entrer dans le détail de l'étude quantitative, il convient de donner un aperçu qualitatif du fonctionnement et de mettre en évidence quelques faits importants.

La première constatation qui s'impose, dans l'étude de l'évacuateur de crue en déversoir circulaire, est l'existence de deux modes d'écoulement distincts et correspondant l'un aux faibles débits, l'autre aux débits élevés.

Dans le premier cas, c'est à dire pour les faibles débits, 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 qui est à surface libre en général.

Le coude est naturellement le siège de remous violents, les filets d'eau s'y heurtent pour repartir horizontalement.

Pour les gros débits, le déversoir est complètement noyé; il y a un plan d'eau continu au dessus de l'ouvrage. Le puits est entièrement sous charge et débite à pleine section dans la galerie qui fonctionne en surface libre ou en charge.

Dans ce cas il faut une forte surélévation du plan d'eau amont pour créer une augmentation, même faible, du débit.

La dissipation de l'énergie s'effectue par frottement dans le puits vertical et dans la galerie et encore par turbulence et dégagement de chaleur dans un ouvrage de dissipation d'énergie particulier placé à l'aval, appelé bassin de dissipation.

L'écoulement par dessus le déversoir circulaire, doit être guidé en direction radiale au moyen de piliers (guideaux) placés sur le pourtour du déversoir. Sans ces dispositions particulières, un écoulement rotationnel peut s'établir, ce qui provoquerait une diminution de la capacité d'évacuation.

Pour avoir une représentation précise du phénomène, le mieux est de considérer le débit comme fonction de la charge amont, mesurée par rapport à la crête du déversoir. Reportée en un graphique, cette fonction nous donne la courbe caractéristique de tarage de l'évacuateur.

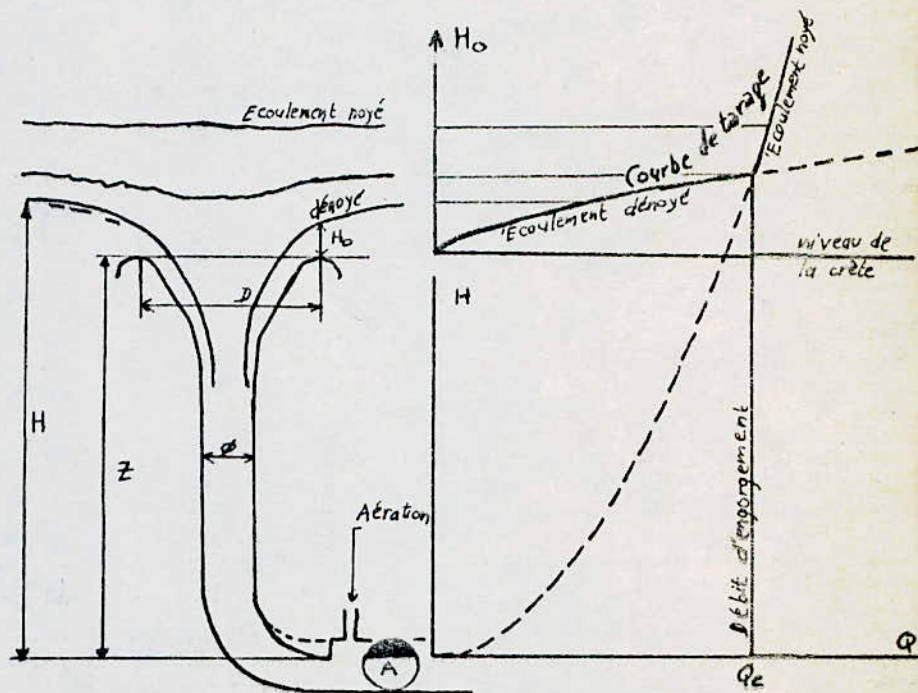


Fig. 1. Schéma de fonctionnement et définition de la courbe de tarage.

La figure 1 montre, l'allure générale d'une telle courbe. Elle est constituée de deux branches distinctes.

La branche inférieure correspond à l'écoulement dénoyé. Elle est peu différente de la courbe caractéristique d'un déversoir rectiligne.

La branche supérieure, définit l'écoulement noyé; 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 permet de définir le point d'engorgement. A ce point correspond un débit d'engorgement qui est la frontière séparant les deux modes d'écoulement. Ce débit est généralement adopté comme la limite pratique des possibilités d'évacuation de l'ouvrage; car, au delà, l'écoulement est noyé et l'augmentation de la charge amont, due à la surélévation du plan d'eau, ne se traduit que par un accroissement de débit négligeable.

Il faut toute fois, préciser que le passage d'un mode d'écoulement à un autre se fait d'une manière progressive par des formes un peu moins stables, sans qu'il n'apparaisse de phénomènes brutaux. Un champignon ou masse d'eau bouillonnante se forme dans le puits et monte jusqu'à la surface; A ce moment, le déversoir se noie avec formation d'une nappe ondulée.

De nombreux essais effectués sur modèles réduits physiques ont permis d'acquérir la certitude que les deux branches de la courbe de tarage, doivent être considérées comme indépendantes l'une de l'autre. C'est à dire que les causes susceptibles de modifier l'une des branches n'agissent pas sur l'autre, et réciproquement.

La branche inférieure est la courbe de tarage d'un déversoir. Elle n'est influencée 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;
- présence de guideaux ou d'une topographie particulière.

Cette branche de la courbe n'est pas modifiée par une variation des formes du puit, du coude ou de la galerie. Elle peut être considérée comme se prolongeant au delà du point d'engorgement.

En effet (voir fig.2), si la branche verticale est déplacée (par exemple en augmentant la hauteur de l'ouvrage, la géométrie du coude etc...), le nouveau tronçon de la branche inférieure vient exactement en prolongement de la partie déjà connue.

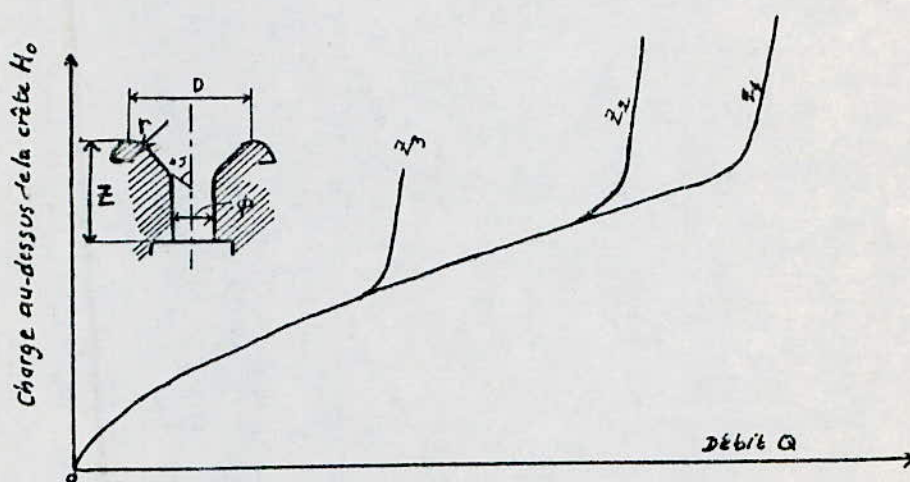


fig. 2. ($z_1 > z_2 > z_3$)

D'autre part, la branche supérieure est contrôlée par les conditions d'écoulement sous charge : perte d'énergie dans le coude, rugosité des parois etc...

Une modification de la crête du déversoir, ne change rien à ce mode d'écoulement ainsi que le montre le graphique de la fig.3; le débit d'engorgement ne varie pas à la suite d'un changement important des formes d'entrée (il est à remarquer que la forme A donne en écoulement noyé, des débits légèrement plus élevés pour une même charge, cela étant dû aux pertes de charges moins élevées du fait de la plus grande section).

Cette indépendance des deux modes d'écoulement permet d'étudier séparément les deux branches de la courbe.

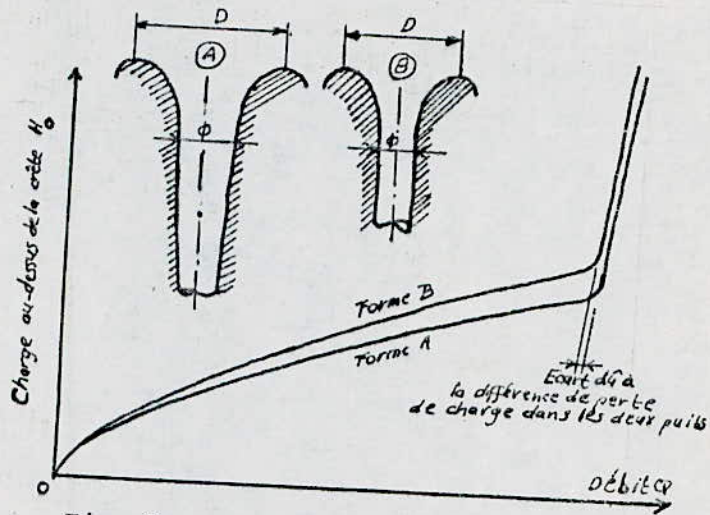


Fig. 3.

($D_A > D_B$ et $\phi_A > \phi_B$)

3.3. Etude quantitative :

Comme nous l'avons dit dans l'étude qualitative, le régime en écoulement dénoyé est caractéristique de l'écoulement par dessus la déversoir; le débit, ici est proportionnel à la puissance $3/2$ de la charge au dessus de la crête.

$$\text{soit : } Q = C_d \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2} \dots \dots \dots (1)$$

Q : débit d'eau en m^3/s ;

C_d : coefficient de débit en régime dénoyé;

L : Longueur développée en crête en m;

g : accélération gravitationnelle en m/s^2 ;

H_0 : charge d'eau au dessus de la crête en m.

Tandis que le régime en écoulement noyé est gouverné par l'écoulement sous charge; le débit est proportionnel à la puissance $1/2$ de la charge au dessus de la crête.

$$\text{soit : } Q = C_n A \sqrt{2g} H^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

Q : débit en m^3/s ;

C_n : coefficient du débit en régime noyé;

A : aire de la section d'écoulement en m^2 ;

g : accélération gravitationnelle en m/s^2 ;

H : charge géométrique à la sortie en m.

Les formules (1) et (2) permettent de déterminer l'ordre de grandeur du débit d'engorgement, en posant l'égalité entre elles et d'effectuer les calculs de laminage.

Lors de la conception de l'évacuateur de crue, il faut veiller à ce que le débit de dimensionnement soit inférieur au débit d'engorgement, pour le quel le système s'engorge. Ceci pour profiter de la faible variation de la charge nécessaire à évacuer un débit donné.

Différents auteurs ont travaillé à l'optimisation des facteurs intervenant dans les caractéristiques des évacuateurs en tulipe, chacun d'eux ayant vu le problème sous un certain angle.

Nous précisons que la majorité de ces recherches ont été effectuées en Laboratoire sur des modèles réduits.

Nous nous attacherons dans ce qui suit à exposer les résultats de ces recherches.

4 - THEORIES DE DIMENSIONNEMENT DES EVACUATEURS EN TULIPE

4.1. Recherche de M. ANDRE GARDEL (2) :

L'étude expérimentale a été faite sur un modèle réduit représenté schématiquement à la figure (1.1.).

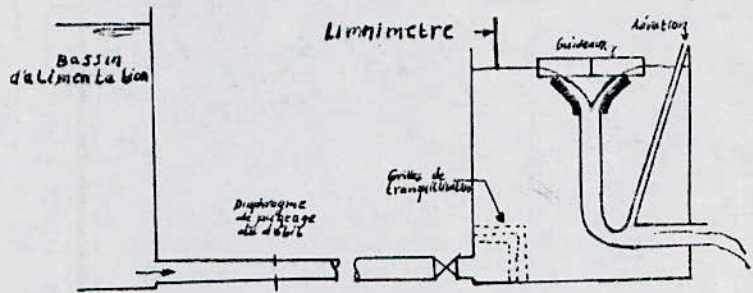


fig 1.1. Schéma de l'installation utilisée pour les essais.

4.1.1. Écoulement dénoyé :

Il a été jugé qu'une comparaison s'imposait entre le déversoir circulaire et le déversoir rectiligne, du fait que la branche dénoyée est caractéristique de l'écoulement par dessus le déversoir.

Ces deux déversoirs ayant même profil en travers et largeurs égales au développement en crête du déversoir circulaire. Les déversoirs circulaires considérés étant à crêtes rondes.

Soit "f", le rapport des débits des deux déversoirs sous même charge, alors :

$$Q_{\text{dev.circ.}} = f \cdot Q_{\text{dev.rect.}} = m \pi D \sqrt{2g} H_0^{3/2} f \dots (1.1)$$

où m : coefficient de débit du déversoir rectiligne de même profil.

Pour une crête ronde, il est donné par la formule de FAWER :

$$m = 0,385 + 0,085 \frac{H_0}{r} - 0,010 \left(\frac{H_0}{r} \right)^2 \dots\dots\dots (1.2.)$$

r : rayon de courbure de la crête ronde en m;

D : diamètre de la crête circulaire en m;

f : rapport des débits des deux déversoirs avec

$$f = f \left(\frac{H_0}{D}; \frac{r}{D} \right).$$

Tel que $\frac{H_0}{D}$ exprime l'effet de la courbure en plan du déversoir
cet effet est d'autant plus grand que $\frac{H_0}{D}$ est grand;

$\frac{r}{D}$ caractérisant le profil en travers de la crête.

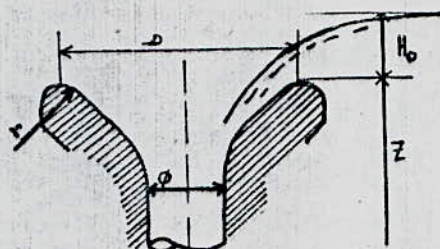


Fig. 1.2.

La figure (1.3) montre la variation de "f" en fonction de $\frac{H_0}{D}$
pour $\frac{r}{D}$ fixé il a été admis pour "f" la valeur suivante :

$$f = 1 - \alpha \frac{H_0}{D} \dots\dots\dots (1.3)$$

où " α " étant un coefficient exprimant l'influence du profil en crête

$$\text{d'où : } \alpha = \alpha (r/D) \dots\dots\dots (1.4)$$

la variation de " α " en fonction de r/D est montrée sur la figure (1.4) avec
 $\frac{H_0}{D}$ fixe, d'après le graphique obtenu, " α " ne doit pas être différente de :

$$\alpha = 0,3 + 2,5 \frac{r}{D} \dots\dots\dots (1.4)$$

et pour les formes les plus fréquentes $\alpha \simeq 0,5$ à $0,6$.

Après ces résultats, la formule du débit sera :

$$Q = m \pi (D - \alpha H_0) \sqrt{2g} H_0^{3/2} \dots\dots\dots (1.5)$$

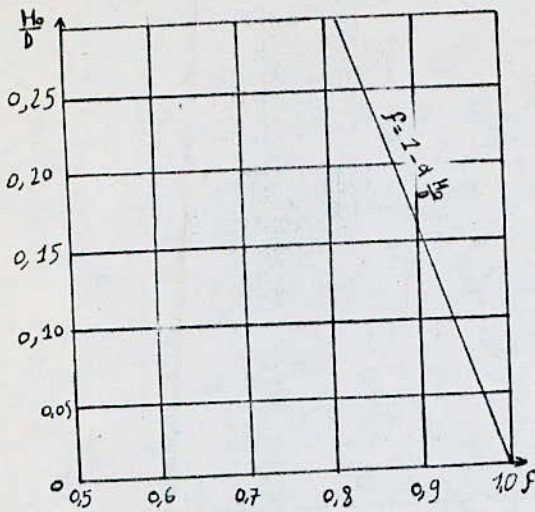


Fig. 1.3

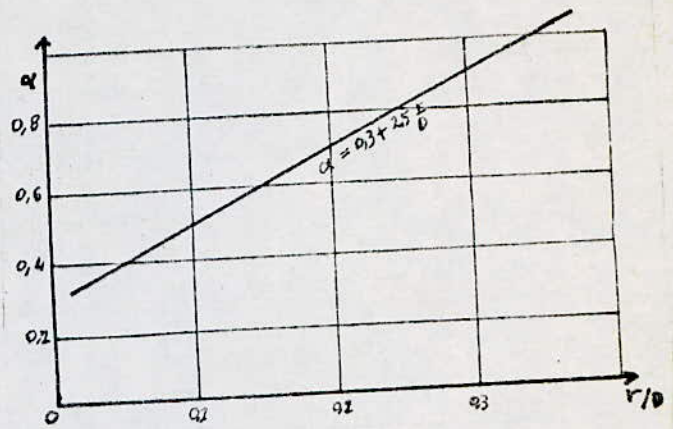


Fig. 1.4

Ces formules résultent d'essais effectués dans les limites suivantes :

$$\frac{H_0}{D} < 0,25 \quad \text{et} \quad \frac{r}{D} < 0,3$$

4.1.2. Écoulement noyé

comme cet écoulement est dépendant des caractéristiques du coude en premier lieu, il a été étudié deux séries de coude dont la différence principale était la position de l'aération; à l'aval dans le premier cas et à l'amont dans le second.

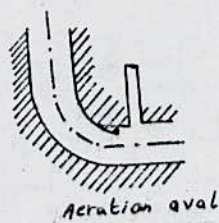


Fig. 15.a

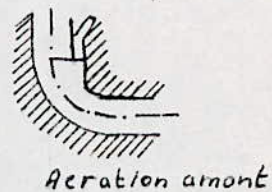


Fig. 15.b

Le débit dans ce régime est régié par la formule suivante:

$$Q = c_n A \sqrt{2.g} H^{1/2}$$

avec $H = H_0 + Z$;

Z : hauteur géométrique entre la crête et la surface libre dans la galerie en m.

en posant : $C_n \cdot \sqrt{(H_0+Z)} = \sqrt{H^+}$

$$H^+ = C_n^2 (H_0+Z) \text{ ou } H^+ = C_n^2 H.$$

La formule du débit dénoyé pourra s'écrire :

$$Q = A \sqrt{2.g} H^{+1/2}$$

H^+ : hauteur disponible au niveau de la section A.

Le problème est de déterminer la valeur de H^+ qui ne diffère de H que par des pertes par frottement le long du déversoir, du puits, du coude et des pertes par courbure sur la crête et dans le coude.

Les pertes par frottement dépendent de la rugosité des parois (plus importantes sur modèle que dans la réalité) et peuvent être calculées par l'intégrale $\int i.dl$ étendue à la longueur du parcours déversoir-étranglement. La perte de charge unitaire peut être calculée par la formule de STRICKLER :

$$i = \frac{v^2}{K^2 R^{4/3}} \dots\dots\dots (1.6)$$

v : vitesse d'écoulement en m/s;

R : rayon hydraulique en m;

K : coefficient de rugosité.

Les pertes par courbure sur la crête et dans le coude ont été considérées séparément.

Les essais ont montré que les pertes par courbure sur la crête étaient très faibles, généralement de 2% de l'Energie Cinétique à une section dans le puits.

La majorité des pertes par courbure se manifeste dans le coude et peuvent être introduites dans la formule du débit par un coefficient de rendement :

$$\eta = \frac{H^+}{H} < 1 \dots\dots\dots (1.7)$$

Dans ces conditions : $Q = A \sqrt{2.g.H.\eta}$

Expérimentalement, le coefficient η dépend de la courbure relative du coude $\frac{r_c}{\phi}$; il est croissant en fonction de celle-ci.

D'autre part, il est plus grand dans le cas de l'aération aval.

Ce qui indique que les pertes de charges par courbure dans le coude sont plus importantes $\frac{r_c}{\phi}$ est petit ou si l'aération est à l'amont.

$$\text{aération aval : } \eta = 0,54 + 0,13 \frac{r_c}{\phi} \dots\dots\dots (1.8)$$

$$\text{aération amont : } \eta = 0,32 + 0,18 \frac{r_c}{\phi} \dots\dots\dots (1.9).$$

4.2. Recherche de M^{re} W.E. WAGNER (B) :

4.2.1. Objet des travaux :

Cette recherche analyse le problème de la détermination de la forme des profils de la crête des évacuateurs en tulipe.

Dans ce but, un déversoir circulaire à crête mince a été construit et testé dans le Laboratoire d'hydraulique de l'U.S.B.R. (United States; Bureau of Reclamation).

Le but recherché par le choix de ce type de déversoir est d'essayer de reproduire le plus fidèlement possible, le profil de la surface inférieure d'une nappe se déversant librement au dessus du déversoir circulaire à crête mince.

Cette disposition est adoptée afin d'éviter des zones de dépressions dangereuses le long de la crête du déversoir en tulipe.

D'autre part, une partie de ces essais a porté sur la détermination de ces mêmes profils de surfaces inférieures pour des dépressions données en dessous de la nappe.

Sur le schéma théorique du montage expérimental fig 2.1, on peut voir les caractéristiques géométriques et physiques du déversoir et de la nappe déversante.

On peut définir aussi les deux points suivants :

- Le "CROTCH" désigne le point où l'écoulement commence à occuper toute la section transversale par analogie avec un évacuateur en tulipe.
- Le "BOIL" désigne un volume d'eau non intéressé dans l'écoulement, il est situé au dessus de la zone du "CROTCH", il est aussi appelé champignon ou ressaut annulaire.

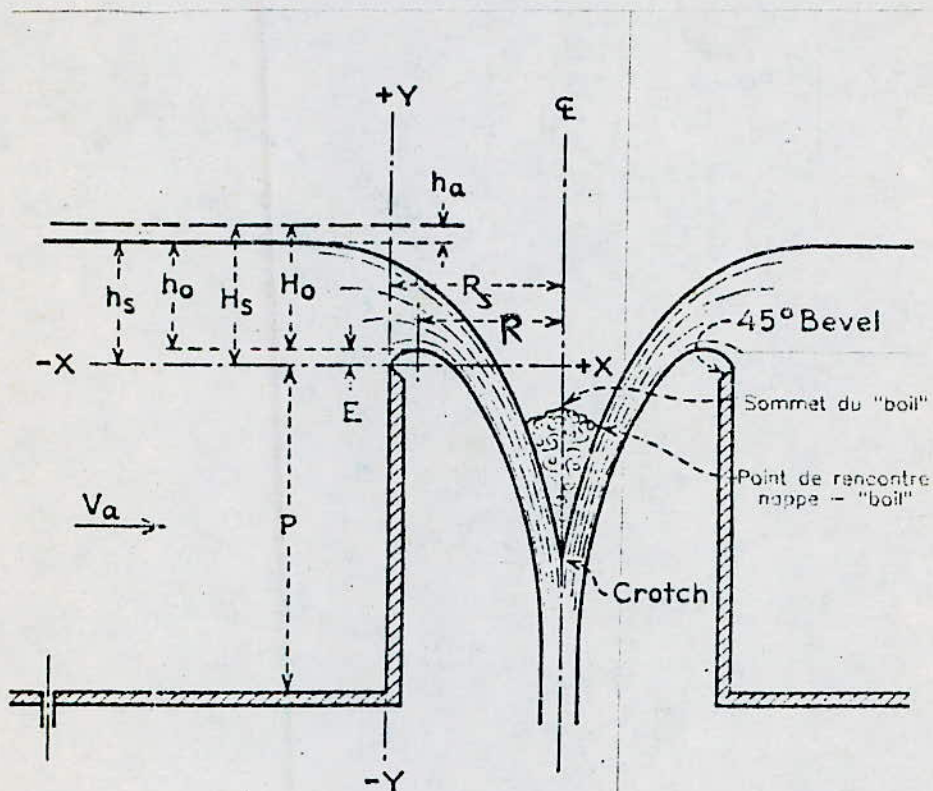


Figure 2.1 PRINCIPAUX ELEMENTS
DU DEVERSOIR CIRCULAIRE

4.2.2. Interprétation et analyse des résultats

Les écoulements noyé et dénoyé sont toujours caractérisés par les mêmes formules.

Pour une immersion partielle, le coefficient du débit c_d ou c_n , change plus rapidement en fonction de la charge et la caractéristique du débit ne suit ni l'équation de l'écoulement libre ni celle de l'écoulement par un orifice.

Puisque le point où l'écoulement à surface libre se termine et où l'écoulement noyé commence est difficile à définir, les auteurs ont choisi la formule du régime dénoyé pour exprimer le coefficient du débit, car la majorité des évacuateurs en tulipe sont prévus pour fonctionner en écoulement à surface libre.

D'autre part, il a été démontré que les profils des nappes, s'écoulant sur deux quelconques déversoirs circulaires à crête mince de rayon différent, étaient similaires si les rapports respectifs $\frac{H_s}{R_s}$ étaient semblables.

Ainsi, en exprimant les coordonnées X et Y des surfaces de la nappe et le rayon du déversoir en fonction de H_s , les courbes obtenues sont adimensionnelles et valables quelque soit le rayon du déversoir à crête mince.

Cette propriété permet d'éviter le recours aux Lois de similitude pour le dimensionnement d'ouvrages réels.

La fig (2.2) montre la relation entre $\frac{H_s}{R_s}$ et le coefficient du débit pour différentes profondeurs d'approche P .

En se référant aux figures (2.2) et (2.3), l'écoulement est apparemment libre pour des rapports de $\frac{H_s}{R_s} < 0,45$. Le coefficient de débit décroît presque linéairement de 0,42 à 0,40 pour $\frac{H_s}{R_s}$ variant de 0,20 à 0,45 respectivement.

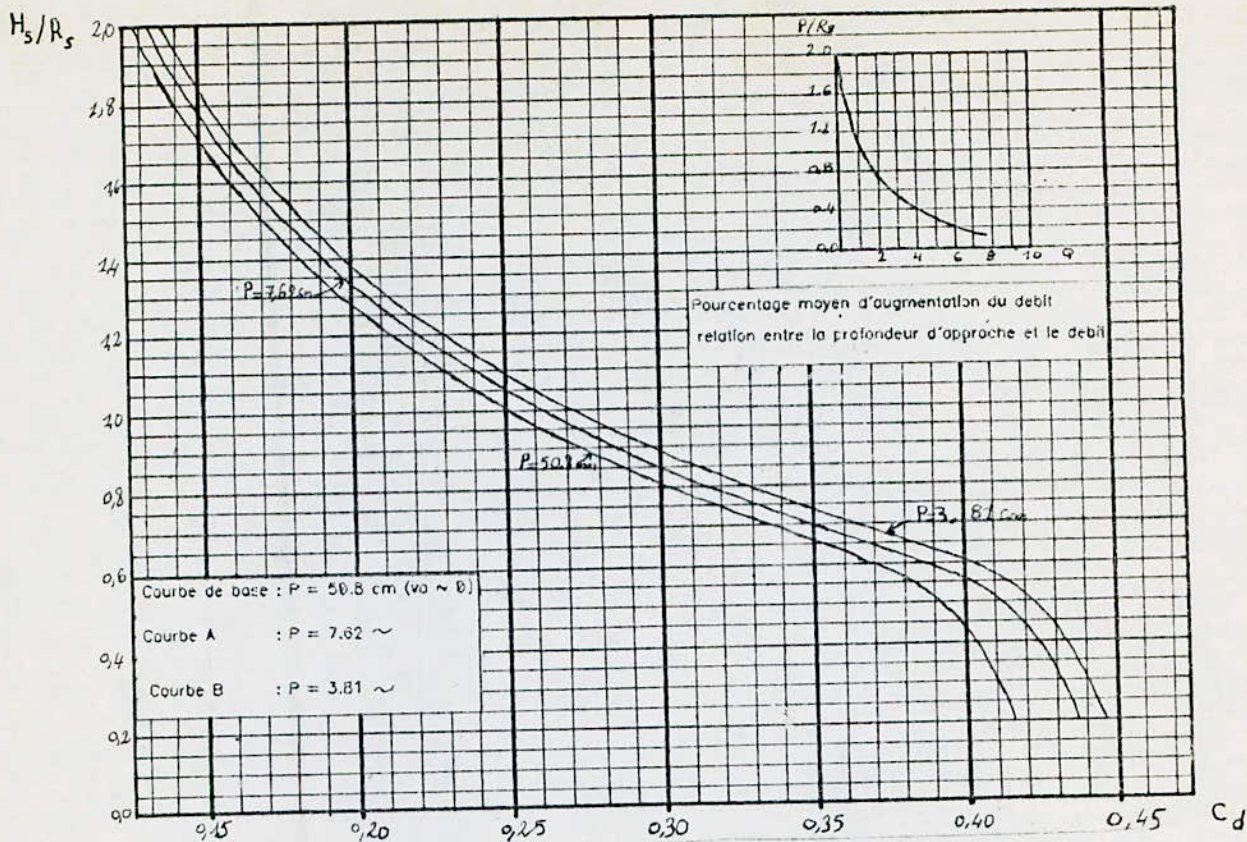


Figure 2.2 Relation de H_s/R_s au coefficient de debit pour differentes profondeurs d'approche (nappe aeree)

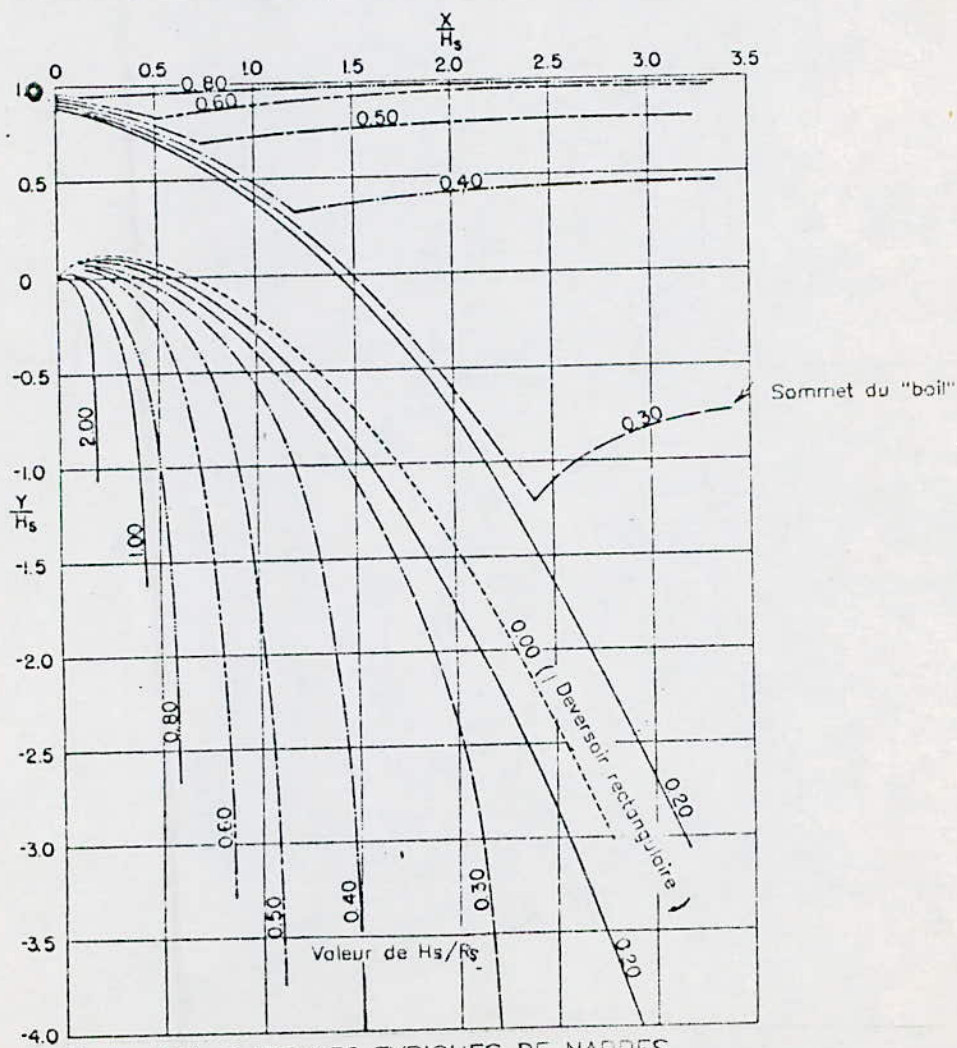


Figure 2.3 SURFACES TYPQUES DE NAPPES INFERIEURES ET SUPERIEURES. (NAPPE AZREE ET VITESSE D'APPROCHE NEGLIGEABLE)

Quand le rapport $\frac{H_s}{R_s}$ augmente au dessus de 0,45, le déversoir devient partiellement submergé, il y a réduction brusque du coefficient de débit.

Pour $\frac{H_s}{R_s} > 1,0$ la surface de l'eau est presque plane et l'écoulement est noyé.

Il est à remarquer qu'une amélioration est apportée au coefficient du débit quand la profondeur d'approche diminue (la vitesse d'approche augmente).

Pour la courbe A, cette amélioration est de l'ordre de 5% par rapport à la courbe de base dans le domaine de l'écoulement libre, de 4% à peu près dans le domaine de l'écoulement noyé.

Alors que pour la courbe B, l'augmentation est de 7 et 8% respectivement. L'insertion de la figure (2.2), montre la relation entre les profondeurs d'approche et le débit, valable pour les deux domaines d'écoulement.

La figure (2.4.A) montre la même relation pour des valeurs différentes de dépression au dessous de la nappe et cela pour la profondeur d'approche de 508 mm.

Les dépressions (pourcentage de vide) sont calculées par rapport à la charge totale au dessus de la crête H_s .

soit : - dépression en pourcentage $\frac{H_v}{H_s}$

ou H_v étant la hauteur vacuométrique au dessous de la nappe.

La figure (2.4.B) a été tracée à partir des données contenues dans la fig (2.4.A) et elle indique le pourcentage moyen d'augmentation du débit pour différentes dépressions sous la nappe.

Figure 2.4A Relation entre H_s/R_s et le coefficient de debit pour differentes depressions sous la nappe

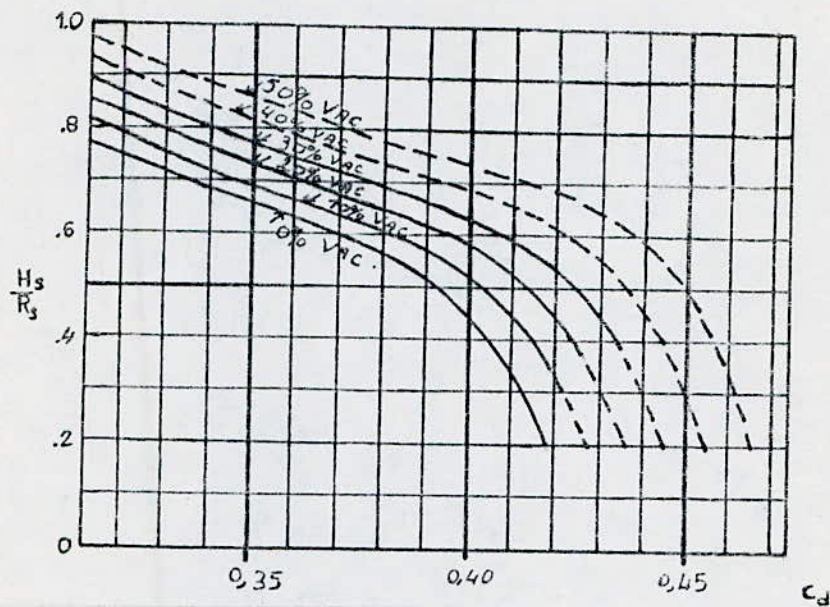
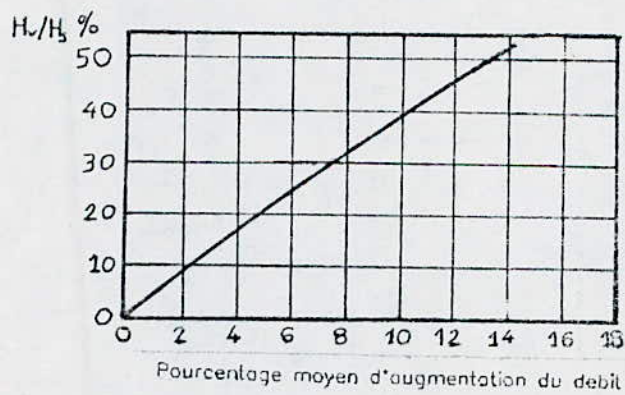


Figure 2.4B Relation entre la depression sous la nappe et le debit



2.2.1. Profils de la nappe :

Les profils de la nappe sont montrés sur la figure (2.3).

Dans la table 1, ces profils sont donnés en fonction des coordonnées adimensionnelles $\frac{X}{H_s}$ et $\frac{Y}{H_s}$ avec paramètre $\frac{H_s}{R_s}$.

La colonne correspondante à $\frac{H_s}{R_s} = 0,1$ a été trouvée par interpolation entre les colonnes de $\frac{H_s}{R_s} = 0,0$ et $\frac{H_s}{R_s} = 0,2$ car pour $\frac{H_s}{R_s} = 0,1$ le profil adhérerait à la crête et était non conforme aux autres résultats.

Le profil de la surface inférieure de la nappe indiqué par $\frac{H_s}{R_s} = 0$ est celui d'un déversoir rectangulaire à crête mince, celui-ci pouvant être considéré comme un déversoir circulaire de rayon infini.

Les profils de la surface supérieure de la nappe en coordonnées adimensionnelles avec vitesse d'approche négligeable et nappe aérée, sont donnés au tableau 4.

Les profils des surfaces, exprimés en coordonnées adimensionnelles donnent une fausse idée des formes réelles de celles-ci, car les coordonnées par rapport à la charge H_s deviennent de plus en plus petits quand H_s augmente.

La figure (2.5) montre les formes réelles des surfaces inférieures pour différents rapports $\frac{H_s}{R_s}$; ce qui permet de voir que la surface inférieure de la nappe a plutôt tendance à se rabaïsser quand la charge ou le rapport $\frac{H_s}{R_s}$ augmente, ce qui est contraire à ce qui se passe avec un déversoir à crête mince rectiligne.

Ce phénomène pourrait engendrer des dépressions au dessous de la nappe, si l'évacuateur en tulipe a été dimensionné pour la charge maximum et qu'il fonctionne à des charges inférieures à celle-ci.

Néanmoins, des vérifications sur modèles réduits d'ouvrages existants n'ont révélé aucune réduction de pression décelable pour des charges inférieures à la charge de dimensionnement.

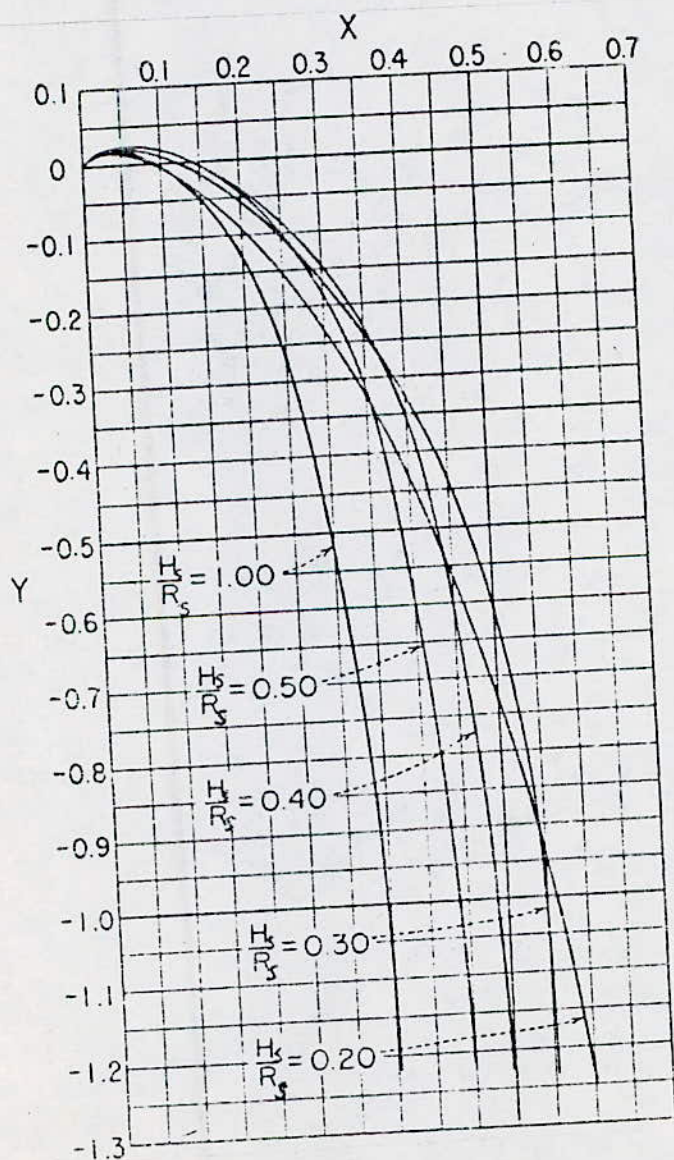


Figure 2.5 Profils typiques de la surface inférieure de la nappe en coordonnées X et Y

1.a. Effet de la profondeur d'approche sur le profil de la nappe

Cet effet, est montré en figure (2.6).

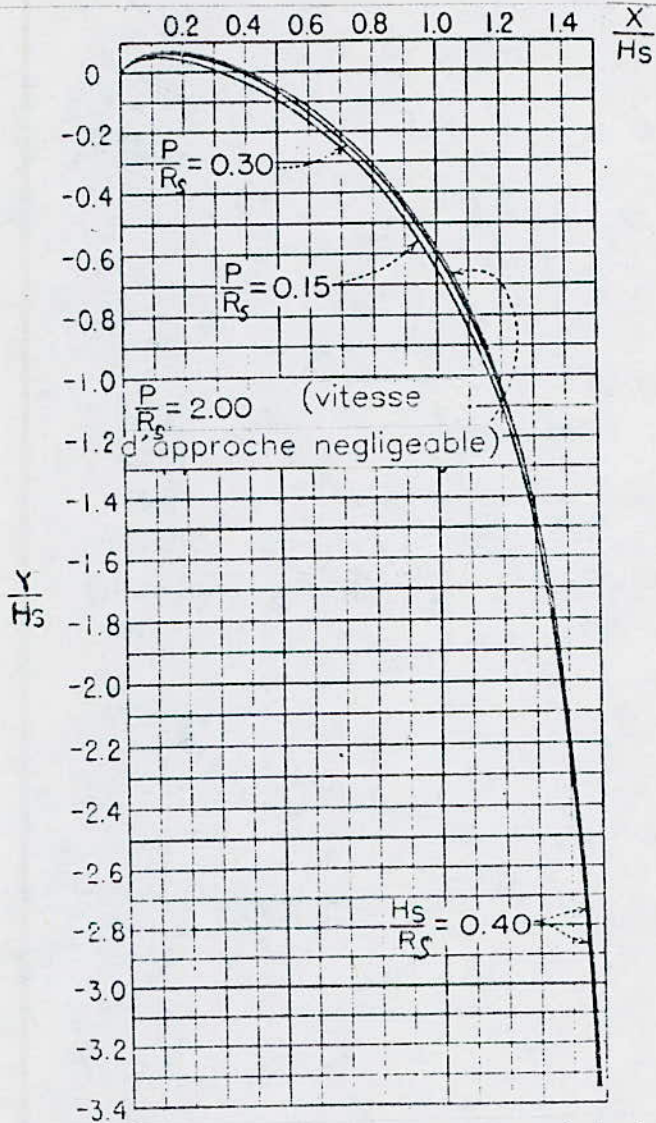


Figure 2.6 Profils typiques de la surface inferieure de la nappe montrant l'effet de la vitesse d'approche

On voit que la contraction du jet diminue quand la vitesse d'approche augmente ($\frac{P}{R_s}$ diminue). Les coordonnées adimensionnelles des surfaces inferieures des nappes, pour des vitesses d'approche appreciables et aeration totale sont tabulees en table 2.

1.b. Effet des dépressions sous la nappe :

α. sur la surface inférieure :

Pour une même charge, à mesure que la pression décroît, la surface inférieure de la nappe a tendance à se rabattre vers les parois du déversoir.

Sur la figure (2.7); l'effet de cette dépression a été déterminé pour $\frac{H_s}{R_s} = 0,4$ et vitesse d'approche négligeable.

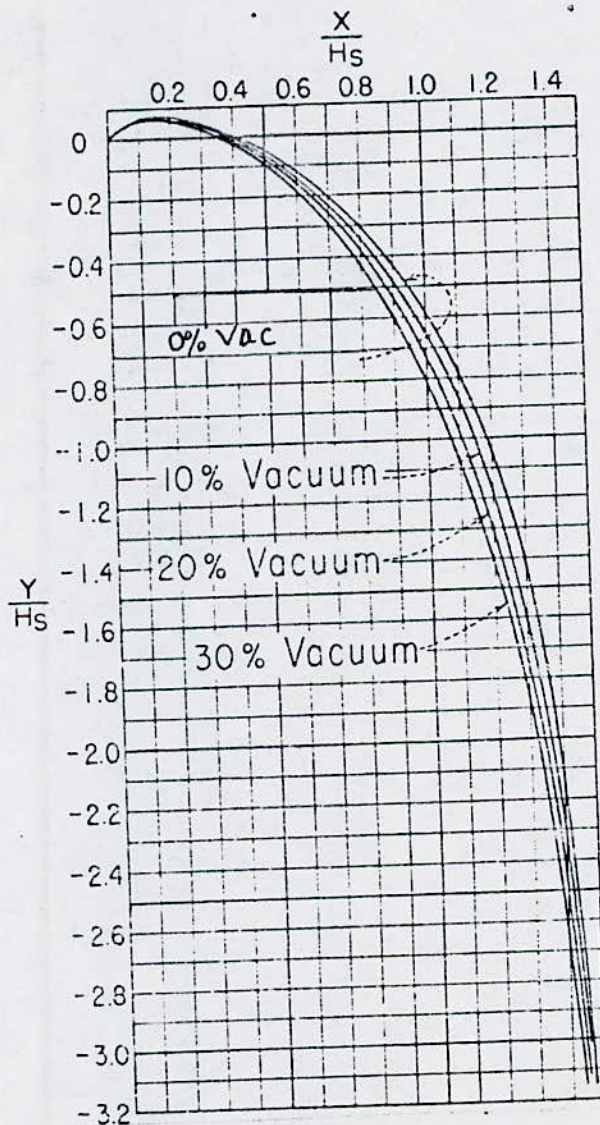


Figure 2.7 Profils typiques de la nappe inférieure montrant l'effet des dépressions sous la nappe ($H_s/R_s = 0.4$)

Les coordonnées $\frac{X}{H_S}$ et $\frac{Y}{H_S}$ sont données au tableau 3.

β. sur la surface supérieure :

Au delà de la crête du déversoir, la surface de la nappe tombe de plus en plus bas pour des dépressions croissantes en dessous du jet, les profils de celle-ci sont donnés en coordonnées adimensionnelles au tableau 6.

1.C. Effet de la vitesse d'approche :

Dans le tableau 5, sont données les coordonnées adimensionnelles de la surface supérieure de la nappe; dans ce cas la surface supérieure est d'autant plus élevée que la vitesse d'approche est grande ($\frac{P}{R_S}$ petit).

2.2.2. Relation entre l'élévation maximum E de la surface inférieure de la nappe et le débit Q au rayon du déversoir :

Tous les calculs relatifs aux déversoirs en mince paroi ont été effectués par rapport à la charge totale H_S au dessus de la crête, alors que dans l'ébauche de la section d'écoulement d'un évacuateur en tulipe, il est plus convenable d'effectuer ces mêmes calculs avec H_0 , la charge totale au dessus du point d'élévation maximum de la surface inférieure de la nappe.

Pour permettre le passage de H_S à H_0 , la relation $\frac{H_S}{R_S}$ pour les trois profondeurs d'approche (0,16; 0,30 et 2,00) et les trois taux de dépressions (10%; 20% et 30%) est donnée aux figures (2.8) et (2.9).

Les valeurs de $\frac{E}{H_S}$, qui sont égales à $\frac{Y_{max}}{H_S}$ ont été obtenues à partir des tables (1), (2) et (3).

Nous avons : $H_S = H_0 + E$ (fig. 2.1).

où (C_d , L ou R_S et H_S sont inconnues).

$$Q = C_d \sqrt{2g} L H_S^{3/2}.$$

La procédure de détermination de la taille de la section d'écoulement devra donc se faire par approximation successive.

Si on exprime le débit en fonction du rapport adimensionnel $\frac{H_s}{R_s}$; le nombre d'inconnues est réduit à deux.

$$\begin{aligned} \text{Soit : } Q &= C_d \sqrt{2g} L H_s^{3/2} \\ &= C_d \sqrt{2g} (2\pi R_s) H_s^{3/2} \\ &= C_d \frac{\sqrt{2g} \cdot 2\pi}{H_s/R_s} H_s^{5/2} \rightarrow \frac{H_s}{R_s} = 2\pi \left(\frac{C_d \sqrt{2g} H_s^{5/2}}{Q} \right) \end{aligned}$$

Les valeurs $C_d \frac{\sqrt{2g} H_s^{5/2}}{Q}$ pour différents rapports de $\frac{H_s}{R_s}$ sont tracées aux figures (2.8) et (2.9). En les utilisant en même temps que le rapport $\frac{E}{H_s}$; le nombre d'approximations successives nécessaires se réduit.

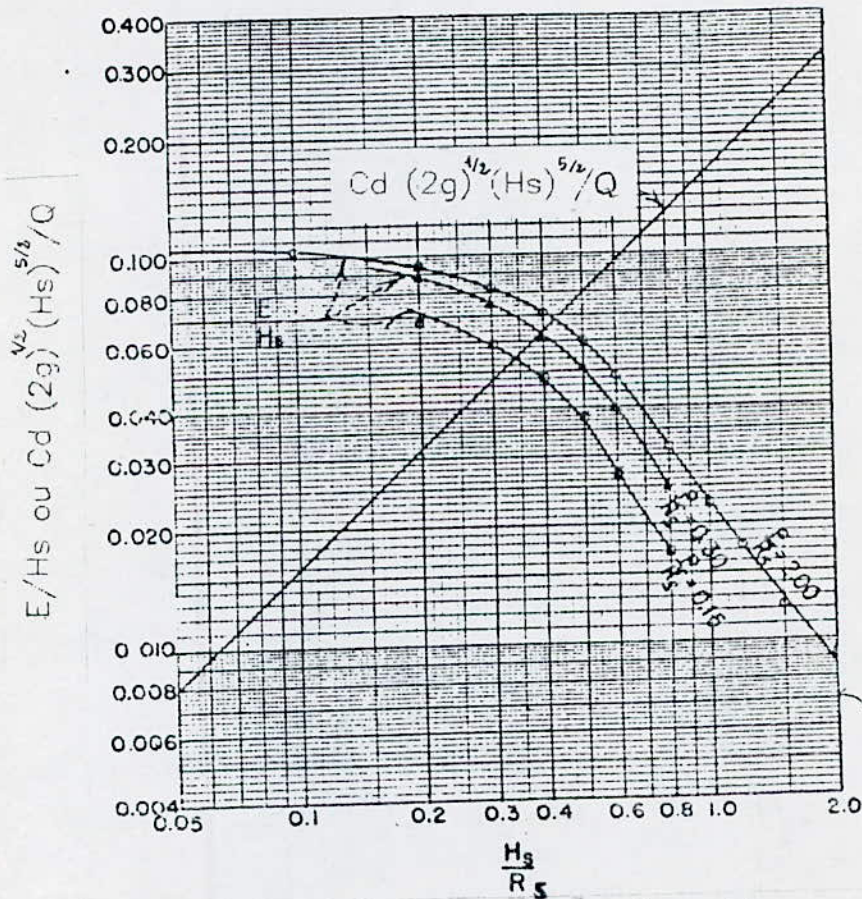


Figure 2.8 Relation de H_s/R_s à $C_d (2g)^{1/2} (H_s)^{5/2} / Q$ et à E/H_s pour différentes profondeurs d'approche (nappe derèe)

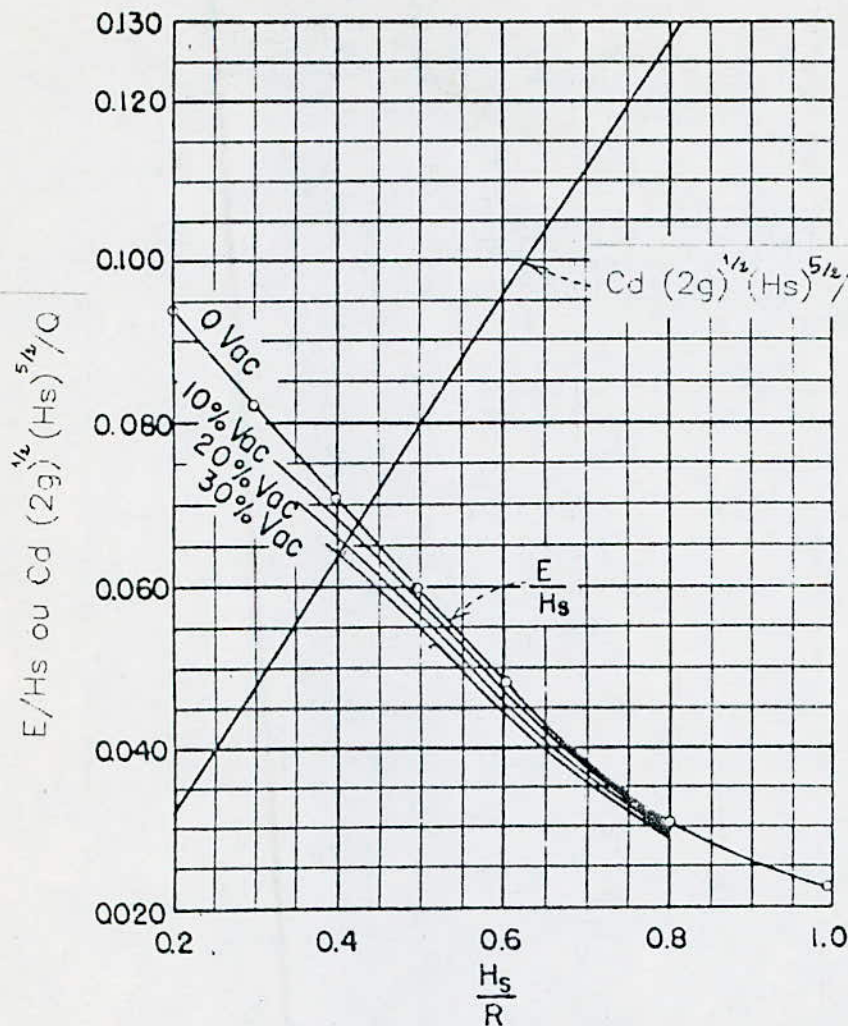


Figure 2.9 Relation de H_s/R_s à $Cd (2g)^{1/2} (H_s)^{5/2} / Q$
pour différentes dépressions sous la nappe
(vitesse d'approche négligeable)

2.2.3. Limitation à l'application de la méthode :

certaines limitations doivent être admises à l'application des résultats expérimentaux de ces travaux à la détermination des caractéristiques d'un évacuateur en tulipe, car ces résultats ont été obtenus à partir d'un déversoir circulaire dans lequel l'eau tombe librement dans l'atmosphère ou dans un vide partiel.

Par conséquent, la charge produisant le débit était la charge au dessus du déversoir plus la pression sous la nappe.

Dans un évacuateur en tulipe, les mêmes conditions existent, mais quand celui-ci est conçu pour fonctionner en régime partiellement ou complètement noyé; une charge supplémentaire contribue à augmenter le débit, elle est due à l'effet de la colonne d'eau dans le puits qui agit comme un siphon.

Par conséquent, quand un évacuateur de crue en tulipe est dimensionné pour fonctionner en régime presque noyé, la similitude entre le puits et la tulipe disparaît.

Dans le cas où, le puits est dimensionné pour fonctionner en régime dénoyé, la similitude existe.

Il faudra donc, pour conserver cette similitude, garantir les points suivants :

- concevoir un évacuateur en tulipe avec un rapport $\frac{H_s}{R_s}$ petit; tel que le puits ne soit pas noyé;
- placer un étranglement dans le puits, en n'importe quel point au dessous du "boil" pour maintenir la pression de calcul imposée sous la nappe;
- assurer une ventilation sous la nappe au niveau du "boil" pour dissiper la charge de succion due au fonctionnement en charge du puits.

Tableau 2 x

Coordonnées de la surface inférieure de la nappe
pour différentes valeurs de H_s/R_s et P/R_s
(nappe aérée)

Pour Y positif

| $\frac{Y}{H_s}$ | $\frac{H_s}{R_s}$ | $P/R_s = 0.30$ | | | | | | | | | $P/R_s = 0.15$ | | | | | | | | |
|-----------------|-------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.50 | 0.60 | 0.80 | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.50 | 0.60 | 0.80 |
| | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 0.000 | 0.000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 0.010 | 0.010 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 |
| 0.020 | 0.020 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 |
| 0.030 | 0.030 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 |
| 0.040 | 0.040 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 |
| 0.050 | 0.050 | 0.0475 | 0.0470 | 0.0455 | 0.0440 | 0.0420 | 0.0395 | 0.0370 | 0.0325 | 0.0245 | 0.0405 | 0.0385 | 0.0375 | 0.0360 | 0.0345 | 0.0320 | 0.0300 | 0.0250 | 0.0170 |
| 0.060 | 0.060 | 0.0560 | 0.0530 | 0.0505 | 0.0490 | 0.0460 | 0.0440 | 0.0405 | 0.0350 | 0.0250 | 0.0450 | 0.0430 | 0.0420 | 0.0400 | 0.0380 | 0.0355 | 0.0330 | 0.0265 | 0.0165 |
| 0.070 | 0.070 | 0.0610 | 0.0575 | 0.0550 | 0.0530 | 0.0500 | 0.0480 | 0.0440 | 0.0370 | 0.0245 | 0.0495 | 0.0470 | 0.0455 | 0.0430 | 0.0410 | 0.0385 | 0.0350 | 0.0270 | 0.0150 |
| 0.080 | 0.080 | 0.0660 | 0.0620 | 0.0595 | 0.0575 | 0.0540 | 0.0520 | 0.0480 | 0.0395 | 0.0235 | 0.0525 | 0.0500 | 0.0485 | 0.0460 | 0.0435 | 0.0400 | 0.0365 | 0.0270 | 0.0130 |
| 0.090 | 0.090 | 0.0705 | 0.0660 | 0.0635 | 0.0615 | 0.0575 | 0.0550 | 0.0520 | 0.0430 | 0.0215 | 0.0560 | 0.0530 | 0.0510 | 0.0480 | 0.0455 | 0.0420 | 0.0370 | 0.0265 | 0.0100 |
| 0.100 | 0.100 | 0.0740 | 0.0690 | 0.0660 | 0.0640 | 0.0595 | 0.0570 | 0.0540 | 0.0450 | 0.0190 | 0.0590 | 0.0560 | 0.0535 | 0.0500 | 0.0465 | 0.0425 | 0.0375 | 0.0255 | 0.0065 |
| 0.120 | 0.120 | 0.0840 | 0.0780 | 0.0750 | 0.0730 | 0.0670 | 0.0645 | 0.0615 | 0.0520 | 0.0020 | 0.0630 | 0.0600 | 0.0570 | 0.0525 | 0.0480 | 0.0435 | 0.0365 | 0.0220 | |
| 0.140 | 0.140 | 0.0880 | 0.0810 | 0.0780 | 0.0760 | 0.0690 | 0.0665 | 0.0635 | 0.0540 | | 0.0670 | 0.0635 | 0.0595 | 0.0550 | 0.0500 | 0.0450 | 0.0355 | 0.0205 | |
| 0.160 | 0.160 | 0.0905 | 0.0830 | 0.0800 | 0.0780 | 0.0700 | 0.0675 | 0.0645 | 0.0550 | | 0.0675 | 0.0635 | 0.0580 | 0.0530 | 0.0475 | 0.0425 | 0.0320 | 0.0190 | |
| 0.180 | 0.180 | 0.0925 | 0.0850 | 0.0820 | 0.0800 | 0.0710 | 0.0685 | 0.0655 | 0.0560 | | 0.0670 | 0.0625 | 0.0560 | 0.0510 | 0.0455 | 0.0405 | 0.0300 | 0.0170 | |
| 0.200 | 0.200 | 0.0945 | 0.0870 | 0.0840 | 0.0820 | 0.0720 | 0.0695 | 0.0665 | 0.0570 | | 0.0665 | 0.0620 | 0.0550 | 0.0500 | 0.0445 | 0.0395 | 0.0290 | 0.0160 | |
| 0.250 | 0.250 | 0.0990 | 0.0910 | 0.0880 | 0.0860 | 0.0750 | 0.0725 | 0.0695 | 0.0600 | | 0.0660 | 0.0615 | 0.0540 | 0.0490 | 0.0435 | 0.0385 | 0.0280 | 0.0150 | |
| 0.300 | 0.300 | 0.1010 | 0.0930 | 0.0900 | 0.0880 | 0.0760 | 0.0735 | 0.0705 | 0.0610 | | 0.0650 | 0.0605 | 0.0530 | 0.0480 | 0.0425 | 0.0375 | 0.0270 | 0.0140 | |
| 0.350 | 0.350 | 0.1030 | 0.0950 | 0.0920 | 0.0900 | 0.0770 | 0.0745 | 0.0715 | 0.0620 | | 0.0640 | 0.0595 | 0.0520 | 0.0470 | 0.0415 | 0.0365 | 0.0260 | 0.0130 | |
| 0.400 | 0.400 | 0.1050 | 0.0970 | 0.0940 | 0.0920 | 0.0780 | 0.0755 | 0.0725 | 0.0630 | | 0.0630 | 0.0585 | 0.0510 | 0.0460 | 0.0405 | 0.0355 | 0.0250 | 0.0120 | |
| 0.450 | 0.450 | 0.1070 | 0.0990 | 0.0960 | 0.0940 | 0.0790 | 0.0765 | 0.0735 | 0.0640 | | 0.0620 | 0.0575 | 0.0500 | 0.0450 | 0.0395 | 0.0345 | 0.0240 | 0.0110 | |
| 0.500 | 0.500 | 0.1090 | 0.1010 | 0.0980 | 0.0960 | 0.0800 | 0.0775 | 0.0745 | 0.0650 | | 0.0610 | 0.0565 | 0.0490 | 0.0440 | 0.0385 | 0.0335 | 0.0230 | 0.0100 | |
| 0.550 | 0.550 | 0.1110 | 0.1030 | 0.1000 | 0.0980 | 0.0810 | 0.0785 | 0.0755 | 0.0660 | | 0.0600 | 0.0555 | 0.0480 | 0.0430 | 0.0375 | 0.0325 | 0.0220 | 0.0090 | |

Pour Y négatif

| $\frac{Y}{H_s}$ | $\frac{H_s}{R_s}$ | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.50 | 0.60 | 0.80 | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.50 | 0.60 | 0.80 |
|-----------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| -0.000 | 0.000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| -0.010 | 0.010 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 |
| -0.020 | 0.020 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 | 0.0245 |
| -0.030 | 0.030 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 | 0.0350 |
| -0.040 | 0.040 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 | 0.0415 |
| -0.050 | 0.050 | 0.0475 | 0.0470 | 0.0455 | 0.0440 | 0.0420 | 0.0395 | 0.0370 | 0.0325 | 0.0245 | 0.0405 | 0.0385 | 0.0375 | 0.0360 | 0.0345 | 0.0320 | 0.0300 | 0.0250 | 0.0170 |
| -0.060 | 0.060 | 0.0560 | 0.0530 | 0.0505 | 0.0490 | 0.0460 | 0.0440 | 0.0405 | 0.0350 | 0.0250 | 0.0450 | 0.0430 | 0.0420 | 0.0400 | 0.0380 | 0.0355 | 0.0330 | 0.0265 | 0.0165 |
| -0.070 | 0.070 | 0.0610 | 0.0575 | 0.0550 | 0.0530 | 0.0500 | 0.0480 | 0.0440 | 0.0370 | 0.0245 | 0.0495 | 0.0470 | 0.0455 | 0.0430 | 0.0410 | 0.0385 | 0.0350 | 0.0270 | 0.0150 |
| -0.080 | 0.080 | 0.0660 | 0.0620 | 0.0595 | 0.0575 | 0.0540 | 0.0520 | 0.0480 | 0.0395 | 0.0235 | 0.0525 | 0.0500 | 0.0485 | 0.0460 | 0.0435 | 0.0400 | 0.0365 | 0.0270 | 0.0130 |
| -0.090 | 0.090 | 0.0705 | 0.0660 | 0.0635 | 0.0615 | 0.0575 | 0.0550 | 0.0520 | 0.0430 | 0.0215 | 0.0560 | 0.0530 | 0.0510 | 0.0480 | 0.0455 | 0.0420 | 0.0370 | 0.0265 | 0.0100 |
| -0.100 | 0.100 | 0.0740 | 0.0690 | 0.0660 | 0.0640 | 0.0595 | 0.0570 | 0.0540 | 0.0450 | 0.0190 | 0.0590 | 0.0560 | 0.0535 | 0.0500 | 0.0465 | 0.0425 | 0.0375 | 0.0255 | 0.0065 |
| -0.120 | 0.120 | 0.0840 | 0.0780 | 0.0750 | 0.0730 | 0.0670 | 0.0645 | 0.0615 | 0.0520 | 0.0020 | 0.0630 | 0.0600 | 0.0570 | 0.0525 | 0.0480 | 0.0435 | 0.0365 | 0.0220 | |
| -0.140 | 0.140 | 0.0880 | 0.0810 | 0.0780 | 0.0760 | 0.0690 | 0.0665 | 0.0635 | 0.0540 | | 0.0670 | 0.0635 | 0.0595 | 0.0550 | 0.0500 | 0.0450 | 0.0355 | 0.0205 | |
| -0.160 | 0.160 | 0.0905 | 0.0830 | 0.0800 | 0.0780 | 0.0700 | 0.0675 | 0.0645 | 0.0550 | | 0.0675 | 0.0635 | 0.0580 | 0.0530 | 0.0475 | 0.0425 | 0.0320 | 0.0190 | |
| -0.180 | 0.180 | 0.0925 | 0.0850 | 0.0820 | 0.0800 | 0.0710 | 0.0685 | 0.0655 | 0.0560 | | 0.0670 | 0.0625 | 0.0560 | 0.0510 | 0.0455 | 0.0405 | 0.0300 | 0.0170 | |
| -0.200 | 0.200 | 0.0945 | 0.0870 | 0.0840 | 0.0820 | 0.0720 | 0.0695 | 0.0665 | 0.0570 | | 0.0665 | 0.0620 | 0.0550 | 0.0500 | 0.0445 | 0.0395 | 0.0290 | 0.0160 | |
| -0.250 | 0.250 | 0.0990 | 0.0910 | 0.0880 | 0.0860 | 0.0750 | 0.0725 | 0.0695 | 0.0600 | | 0.0660 | 0.0615 | 0.0540 | 0.0490 | 0.0435 | 0.0385 | 0.0280 | 0.0150 | |
| -0.300 | 0.300 | 0.1010 | 0.0930 | 0.0900 | 0.0880 | 0.0760 | 0.0735 | 0.0705 | 0.0610 | | 0.0650 | 0.0605 | 0.0530 | 0.0480 | 0.0425 | 0.0375 | 0.0270 | 0.0140 | |
| -0.350 | 0.350 | 0.1030 | 0.0950 | 0.0920 | 0.0900 | 0.0770 | 0.0745 | 0.0715 | 0.0620 | | 0.0640 | 0.0595 | 0.0520 | 0.0470 | 0.0415 | 0.0365 | 0.0260 | 0.0130 | |
| -0.400 | 0.400 | 0.1050 | 0.0970 | 0.0940 | 0.0920 | 0.0780 | 0.0755 | 0.0725 | 0.0630 | | 0.0630 | 0.0585 | 0.0510 | 0.0460 | 0.0405 | 0.0355 | 0.0250 | 0.0120 | |
| -0.450 | 0.450 | 0.1070 | 0.0990 | 0.0960 | 0.0940 | 0.0790 | 0.0765 | 0.0735 | 0.0640 | | 0.0620 | 0.0575 | 0.0500 | 0.0450 | 0.0395 | 0.0345 | 0.0240 | 0.0110 | |
| -0.500 | 0.500 | 0.1090 | 0.1010 | 0.0980 | 0.0960 | 0.0800 | 0.0775 | 0.0745 | 0.0650 | | 0.0610 | 0.0565 | 0.0490 | 0.0440 | 0.0385 | 0.0335 | 0.0230 | 0.0100 | |
| -0.550 | 0.550 | 0.1110 | 0.1030 | 0.1000 | 0.0980 | 0.0810 | 0.0785 | 0.0755 | 0.0660 | | 0.0600 | 0.0555 | 0.0480 | 0.0430 | 0.0375 | 0.0325 | 0.0220 | 0.0090 | |

Tableau 3 ✕

Coordonnées de la surface inférieure de la nappe
pour différentes valeurs de H_s/R_s et de dépressions
sous la nappe

pour γ positif

[illegible]

Pour γ négatif

| | | $\frac{X}{H_s}$ | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| $\frac{Y}{H_s}$ | $\frac{H}{H_s}$ | 0.30 | 0.40 | 0.50 | 0.60 | 0.80 | 0.40 | 0.50 | 0.60 | 0.80 | 0.40 | 0.50 | 0.60 | 0.80 |
| 0.000 | 0.442 | 0.393 | 0.328 | 0.257 | 0.158 | 0.374 | 0.319 | 0.253 | 0.157 | 0.356 | 0.313 | 0.248 | 0.155 | |
| -0.020 | 0.478 | 0.431 | 0.362 | .288 | .187 | 0.411 | 0.353 | .264 | .185 | 0.392 | 0.346 | .279 | .183 | |
| -0.040 | 0.512 | 0.465 | 0.392 | .314 | .210 | 0.444 | 0.383 | .310 | .208 | 0.425 | 0.375 | .305 | .205 | |
| -0.060 | 0.452 | 0.406 | 0.318 | .338 | .229 | 0.475 | 0.410 | .333 | .227 | 0.454 | 0.402 | .328 | .224 | |
| -0.080 | 0.572 | 0.525 | 0.444 | .358 | .247 | 0.504 | 0.434 | .354 | .244 | 0.482 | 0.426 | .348 | .240 | |
| -0.100 | 0.600 | 0.552 | 0.467 | .377 | .262 | 0.531 | 0.458 | .372 | .259 | 0.509 | 0.449 | .367 | .255 | |
| -0.150 | 0.663 | 0.613 | 0.519 | .418 | .295 | 0.592 | 0.508 | .414 | .291 | 0.567 | 0.498 | .409 | .287 | |
| -0.200 | 0.720 | 0.669 | 0.563 | .454 | .321 | 0.645 | 0.552 | .449 | .316 | 0.618 | 0.540 | .443 | .312 | |
| -0.250 | 0.773 | 0.718 | 0.601 | .484 | .343 | 0.692 | 0.589 | .479 | .339 | 0.664 | 0.577 | .472 | .333 | |
| -0.300 | 0.823 | 0.764 | 0.634 | .511 | .363 | 0.734 | 0.622 | .506 | .358 | 0.705 | 0.609 | .498 | .351 | |
| -0.400 | 0.913 | 0.843 | 0.690 | .556 | .395 | 0.813 | 0.678 | .550 | .389 | 0.779 | 0.664 | .542 | .381 | |
| -0.500 | 0.926 | 0.913 | 0.737 | .593 | .422 | 0.879 | 0.723 | .587 | .414 | 0.844 | 0.709 | .573 | .407 | |
| -0.600 | 1.068 | 0.973 | 0.777 | .623 | .442 | 0.938 | 0.763 | .617 | .435 | 0.900 | 0.749 | .609 | .427 | |
| -0.800 | 1.193 | 1.070 | 0.843 | .670 | .476 | 1.032 | 0.826 | .663 | .469 | 0.993 | 0.810 | .656 | .459 | |
| -1.000 | 1.303 | 1.144 | 0.889 | .705 | .501 | 1.108 | 0.873 | .696 | .493 | 1.071 | 0.860 | .690 | .483 | |
| -1.200 | 1.401 | 1.203 | 0.927 | .732 | .518 | 1.170 | 0.912 | .723 | .510 | 1.137 | 0.900 | .716 | .501 | |
| -1.400 | 1.492 | 1.253 | 0.955 | .755 | .533 | 1.223 | 0.943 | .746 | .525 | 1.193 | 0.931 | .739 | .516 | |
| -1.600 | 1.574 | 1.297 | 0.980 | .773 | .545 | 1.268 | 0.970 | .765 | .535 | 1.243 | 0.958 | .757 | .528 | |
| -1.800 | 1.649 | 1.331 | 1.000 | .790 | .555 | 1.307 | 0.991 | .780 | .546 | 1.287 | 0.980 | .773 | .538 | |
| -2.000 | 1.717 | 1.361 | 1.018 | .803 | .564 | 1.340 | 1.010 | .795 | .555 | 1.321 | 1.000 | .785 | .546 | |
| -2.500 | 1.865 | 1.420 | 1.053 | .828 | .579 | 1.408 | 1.046 | .819 | .571 | 1.389 | 1.039 | .810 | .564 | |
| -3.000 | 1.988 | 1.457 | 1.078 | .848 | | 1.450 | 1.070 | .838 | | 1.435 | 1.062 | .830 | | |
| -3.500 | 2.088 | 1.482 | 1.093 | | | 1.473 | 1.083 | | | 1.467 | 1.077 | | | |
| -4.000 | 2.158 | 1.498 | | | | 1.490 | | | | 1.483 | | | | |
| -4.500 | 2.205 | 1.508 | | | | 1.500 | | | | | | | | |
| -5.000 | 2.228 | | | | | | | | | | | | | |
| -5.500 | 2.230 | | | | | | | | | | | | | |
| -6.000 | 2.231 | | | | | | | | | | | | | |

Tableau 4 X

Coordonnees de la surface superieure de la nappe
pour differentes valeurs de H_s/R_s
(vitesse d'approche negligee et nappe aeree)

| $\frac{Y}{H_s}$ | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\frac{X}{H_s}$ | $\frac{H_s}{R_s}$ | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.50 | 0.60 | 1.00 |
| -0.40 | | 0.955 | 0.956 | 0.959 | 0.960 | 0.961 | 0.962 | 0.968 | 0.976 | 1.000 |
| -0.20 | | 0.925 | 0.927 | 0.929 | 0.930 | 0.935 | 0.936 | 0.942 | 0.958 | 0.996 |
| 0.00 | | 0.860 | 0.866 | 0.869 | 0.895 | 0.900 | 0.905 | 0.920 | 0.932 | |
| 0.20 | | 0.820 | 0.829 | 0.838 | 0.845 | 0.851 | 0.861 | 0.870 | 0.900 | |
| 0.40 | | 0.740 | 0.753 | 0.763 | 0.772 | 0.787 | 0.801 | 0.815 | 0.855 | |
| 0.60 | | 0.640 | 0.658 | 0.669 | 0.684 | 0.702 | 0.726 | 0.746 | | |
| 0.80 | | 0.516 | 0.540 | 0.556 | 0.578 | 0.600 | 0.633 | | | |
| 1.00 | | 0.372 | 0.402 | 0.420 | 0.449 | 0.475 | | | | |
| 1.20 | | 0.205 | 0.240 | 0.265 | 0.300 | 0.328 | | | | |
| 1.40 | | 0.013 | 0.051 | 0.061 | 0.128 | | | | | |
| 1.60 | | -0.205 | -0.160 | -0.122 | -0.063 | | | | | |
| 1.80 | | -0.457 | -0.400 | -0.357 | | | | | | |
| 2.00 | | -0.748 | -0.678 | -0.613 | | | | | | |
| 2.20 | | -1.072 | -0.981 | -0.895 | | | | | | |
| 2.40 | | -1.440 | -1.315 | -1.198 | | | | | | |
| 2.60 | | -1.845 | -1.670 | | | | | | | |
| 2.80 | | -2.268 | | | | | | | | |
| 3.00 | | -2.685 | | | | | | | | |
| Point de jonction de la surface superieure avec le "boil" | | | | | | | | | | |
| X/H_s | | | | 2.410 | 1.711 | 1.208 | 0.810 | 0.725 | 0.510 | 0.220 |
| Y/H_s | | | | -1.210 | -0.185 | 0.320 | 0.626 | 0.696 | 0.825 | 0.940 |
| Sommet du "boil" | | | | | | | | | | |
| X/H_s | | | | 2.911 | 2.545 | 2.267 | 2.043 | 1.710 | 1.275 | 1.030 |
| Y/H_s | | | | 0.606 | 0.438 | 0.666 | 0.783 | 0.942 | 0.970 | 1.000 |

Niveau de la surface de l'eau pour $H_s/R_s > 1.0$

Tableau 5 X

Coordonnees de la surface superieure de la nappe
pour differentes valeurs de H_s/R_s et P/R_s

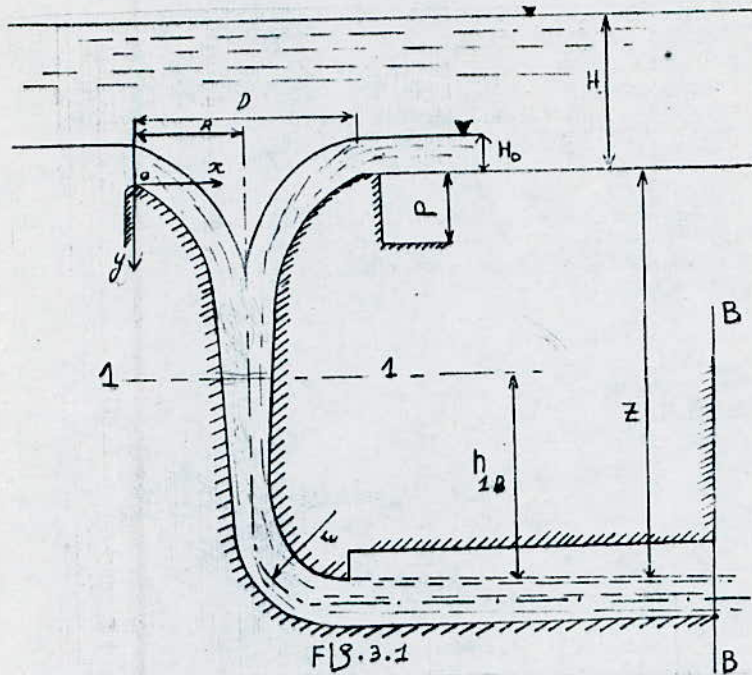
| $\frac{Y}{H_s}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------|-------------------|------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\frac{X}{H_s}$ | $\frac{H_s}{R_s}$ | $\frac{P}{R_s} = 0.30$ | | | | | | | | | $\frac{P}{R_s} = 0.15$ | | | | | | | | |
| | | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.50 | 0.60 | 0.80 | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.50 | 0.60 | 0.80 |
| -0.40 | | 0.964 | 0.965 | 0.968 | 0.975 | 0.976 | 0.977 | 0.978 | 0.986 | 0.991 | 0.957 | 0.962 | 0.968 | 0.971 | 0.978 | 0.980 | 0.987 | 0.995 | |
| -0.20 | | 0.929 | 0.934 | 0.936 | 0.947 | 0.949 | 0.950 | 0.954 | 0.966 | 0.981 | 0.917 | 0.924 | 0.934 | 0.942 | 0.949 | 0.955 | 0.960 | 0.970 | 0.985 |
| 0.00 | | 0.879 | 0.885 | 0.890 | 0.901 | 0.907 | 0.911 | 0.919 | 0.938 | 0.966 | 0.870 | 0.875 | 0.877 | 0.899 | 0.909 | 0.915 | 0.922 | 0.937 | 0.970 |
| 0.20 | | 0.813 | 0.816 | 0.829 | 0.843 | 0.853 | 0.862 | 0.871 | 0.892 | 0.944 | 0.800 | 0.810 | 0.823 | 0.836 | 0.850 | 0.860 | 0.871 | 0.894 | 0.948 |
| 0.40 | | 0.730 | 0.737 | 0.753 | 0.772 | 0.788 | 0.798 | 0.810 | 0.836 | | 0.715 | 0.727 | 0.745 | 0.759 | 0.776 | 0.792 | 0.807 | 0.841 | |
| 0.60 | | 0.626 | 0.641 | 0.658 | 0.683 | 0.700 | 0.715 | 0.730 | | | 0.610 | 0.629 | 0.648 | 0.666 | 0.686 | 0.708 | 0.735 | | |
| 0.80 | | 0.506 | 0.524 | 0.544 | 0.574 | 0.592 | 0.611 | | | | 0.490 | 0.511 | 0.533 | 0.556 | 0.582 | 0.612 | | | |
| 1.00 | | 0.363 | 0.388 | 0.413 | 0.442 | 0.465 | | | | | 0.352 | 0.377 | 0.398 | 0.427 | 0.465 | | | | |
| 1.20 | | 0.199 | 0.228 | 0.253 | 0.292 | | | | | | 0.187 | 0.216 | 0.240 | 0.277 | 0.337 | | | | |
| 1.40 | | 0.035 | 0.042 | 0.071 | 0.123 | | | | | | -0.007 | 0.028 | 0.055 | 0.106 | | | | | |
| 1.60 | | -0.223 | -0.175 | -0.135 | -0.070 | | | | | | -0.235 | -0.190 | -0.155 | -0.081 | | | | | |
| 1.80 | | -0.472 | -0.422 | -0.368 | | | | | | | -0.498 | -0.437 | -0.388 | | | | | | |
| 2.00 | | -0.772 | -0.702 | -0.625 | | | | | | | -0.795 | -0.710 | -0.648 | | | | | | |
| 2.20 | | -1.083 | -1.018 | -0.910 | | | | | | | -1.118 | -1.023 | -0.903 | | | | | | |
| 2.40 | | -1.405 | -1.347 | -1.235 | | | | | | | -1.448 | -1.350 | | | | | | | |
| 2.60 | | -1.767 | -1.683 | | | | | | | | -1.800 | -1.683 | | | | | | | |
| 2.80 | | -2.130 | -2.018 | | | | | | | | -2.148 | -2.035 | | | | | | | |
| 3.00 | | -2.500 | -2.351 | | | | | | | | -2.522 | -2.388 | | | | | | | |
| Point de jonction de la surface superieure avec le "boil" | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| X/H_s | | | | 2.410 | 1.733 | 1.096 | 0.938 | 0.714 | 0.420 | 0.315 | | | 2.222 | 1.723 | 1.260 | 0.948 | 0.732 | 0.420 | 0.344 |
| Y/H_s | | | | -1.253 | -0.210 | 0.394 | 0.531 | 0.680 | 0.830 | 0.926 | | | -0.932 | -0.200 | 0.295 | 0.530 | 0.681 | 0.835 | 0.925 |
| coordonnees du sommet du "boil" | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| X/H_s | | | | 3.370 | 2.922 | 2.436 | 2.288 | | 1.775 | 1.252 | | | | 2.935 | 2.531 | 2.278 | 2.009 | 1.680 | 1.263 |
| Y/H_s | | | | -0.755 | 0.043 | 0.496 | 0.713 | | 0.950 | 0.985 | | | | 0.002 | 0.458 | 0.647 | 0.815 | 0.935 | 0.998 |

Tableau 6 X

Coordonnees de la surface superieure de la nappe
pour differents rapports H_s/R_s et taux de depression
(vitesse d'approche negligee)

| $\frac{Y}{H_s}$ | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------|
| $\frac{X}{H_s}$ | 10% de depression | | | | | 20% de depression | | | | 30% de depression | | | |
| | 0.30 | 0.40 | 0.50 | 0.60 | 0.80 | 0.40 | 0.50 | 0.60 | 0.80 | 0.40 | 0.50 | 0.60 | 0.80 |
| -0.40 | 0.940 | 0.951 | 0.956 | 0.963 | 0.981 | 0.941 | 0.950 | 0.958 | 0.978 | 0.939 | 0.945 | 0.957 | 0.975 |
| -0.20 | .911 | .927 | .938 | .940 | .971 | .911 | .925 | .931 | .966 | .908 | .912 | .929 | .964 |
| 0.00 | .865 | .883 | .897 | .909 | .960 | .865 | .886 | .898 | .957 | .865 | .870 | .890 | .952 |
| 0.20 | .803 | .825 | .848 | .873 | .950 | .808 | .835 | .860 | .941 | .803 | .815 | .843 | |
| 0.40 | .725 | .753 | .783 | .825 | | .735 | .770 | .808 | | .723 | .742 | .789 | |
| 0.60 | .628 | .662 | .711 | | | .641 | .697 | | | .622 | .650 | .724 | |
| 0.80 | .508 | .551 | | | | .522 | | | | .491 | | | |
| 1.00 | .358 | .413 | | | | .368 | | | | .325 | | | |
| 1.20 | .170 | .242 | | | | .173 | | | | .105 | | | |
| 1.40 | -.062 | -.053 | | | | -.070 | | | | -.163 | | | |
| 1.60 | -.327 | | | | | -.345 | | | | -.460 | | | |
| 1.80 | -.629 | | | | | -.638 | | | | -.783 | | | |
| 2.00 | -.975 | | | | | | | | | | | | |
| 2.20 | -1.374 | | | | | | | | | | | | |
| 2.40 | -1.819 | | | | | | | | | | | | |
| 2.60 | -2.300 | | | | | | | | | | | | |
| Point de rencontre nappe - "boll" | | | | | | | | | | | | | |
| X/H_s | 2.600 | 1.504 | .721 | .403 | .300 | 1.808 | .722 | .418 | .299 | 1.803 | .735 | .608 | .152 |
| Y/H_s | -2.300 | -.043 | .665 | .821 | .944 | -.644 | .647 | .803 | .931 | -.790 | .620 | .722 | .940 |

4.3. Revue "Construction Hydraulique" U.R.S.S. (10) :



4.3.1. Capacité du déversoir circulaire

Les auteurs considèrent qu'il existe cinq domaines d'écoulement qui sont :

- $\frac{H_0}{R} < 0,46$ - déversoir dénoyé

- $\frac{H_0}{R} = 0,46 \div 1,0$ - puit en charge

(pour $\frac{H_0}{R} = 0,8 \div 1$ une surface plane se forme au dessus du déversoir).

- $\frac{H_0}{R} = 1,0 \div 1,6$ - déversoir noyé.
(l'ouvrage fonctionne comme un orifice noyé).

- $\frac{H_0}{R} > 1,6$ - déversoir parfaitement noyé.

Ils recommandent de prendre $\frac{H_0}{R} < 0,46$, c'est à dire dimensionner l'évacuateur pour qu'il travaille dans le domaine dénoyé.

4.3.2. Calcul du débit pour les différents domaines d'écoulement :

a) Pour $\frac{H_0}{R} \leq 1$:

Le débit est donné par : $Q = \xi C_d L \sqrt{2.g} H_0^{3/2} \dots (3.1)$

$L = 2\pi R - n_0 s$ Longueur développée en crête en m; (ou longueur géométrique)

n_0 : nombre de piliers;

s : épaisseur des piliers en m.

ξ : coefficient de contraction.

Il est égal à 0,9 en présence des piliers et à 1 en leur absence.

Pour le domaine $\frac{H'_0}{R} = 0,20 \div 0,38$ et $\frac{P}{R} = 0 \div 1$, le coefficient de débit C_d est donné par la formule de

R O M A N I E N K O :

$$C_d = \left(0,490 - 0,068 \left(\frac{H'_0}{R} \right)^{1/2} \right) - 0,03 \left(1 - \left(\frac{P}{R} \right)^{2/3} \right) \dots (3.2).$$

Remarque :

H'_0 est la charge de dimensionnement, non la charge actuelle.

Le coefficient de débit C_d , diminue de 6% environ dans le cas d'absence de guideaux.

b) Pour $\frac{H_0}{R} > 1,6$

Le débit est donné par : $Q = C_n A \sqrt{2.g} H^{1/2} \dots (3.3)$

C_n : coefficient de débit en régime noyé; déterminé selon la somme des pertes de charges sur le parcours jusqu'à la section de contrôle.

$H = H_0 + Z$ - charge géométrique à la sortie en m;
 Z - hauteur géométrique entre la crête du déversoir
 et la charge libre d'eau dans la galerie en m.

4.3.3. Profil de déversoir de l'évacuateur :

Le tracé du profil du déversoir est déterminé en considérant que les particules liquides tombent librement sous l'effet de leur poids.

Considérons une particule arrivant avec une vitesse d'approche initiale v_r au dessus de la crête, après avoir dépassé celle-ci, le mouvement de la particule est décrit par les équations suivantes :

$$x = v_r \cos \alpha \cdot t$$

$$y = 1/2 g t^2 + v_r \sin \alpha$$

où α est l'angle d'inclinaison de la vitesse d'approche initiale par rapport à l'horizon.

L'équation de la trajectoire de la particule, en éliminant le temps "t" sera donnée par :

$$y = \frac{g x^2}{2 v_r^2 \cos^2 \alpha} + x \operatorname{tg} \alpha$$

Le profil du déversoir est construit de telle sorte à recréer cette trajectoire. On recherche ainsi à éviter les dépressions tout au long de l'entonnement de l'évacuateur. Si la vitesse d'approche est horizontale ($\alpha = 0$) on a : $y = \frac{g x^2}{2 v_r^2}$

Dans certains cas, on peut imposer un angle d'approche par la disposition d'un plan incliné à l'amont de la crête. Cette disposition ayant l'avantage de prolonger le domaine de $\frac{H_0}{R}$ pour lequel le déversoir fonctionne en dénoyé.

a) Profil du déversoir sans plan d'approche ($\alpha = 0$) :

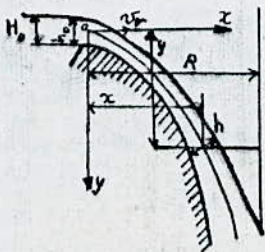


Fig. 3.2

Cette disposition est adoptée pour le domaine $0,20 < \frac{H_0}{R} < 0,46$ car pour $\frac{H_0}{R} < 0,20$ la tulipe est surdimensionnée et pour $\frac{H_0}{R} > 0,46$, la tulipe entre dans le domaine noyé.

Les caractéristiques géométriques du déversoir sont déterminées selon la formule (3.1.); le profil du déversoir est construit selon la méthode d'AHOUTIN dite "méthode du filet central".

L'origine des coordonnées se trouve au dessus de la crête sur le filet central, là où $h = h_0 = 0,75 H_0$, soit à $\frac{h_0}{2}$ au dessus de la crête.

La vitesse radiale d'entrée moyenne (vitesse d'approche initiale) est :

$$v_r = \frac{Q}{2\pi R \cdot 0,75 H_0} \dots\dots\dots (3.4.)$$

L'équation du filet central est :

$$y = \frac{g x^2}{2 v_r^2} \dots\dots\dots (3.5.)$$

Le module de la vitesse en n'importe quel point est :

$$v = 0,98 \sqrt{v_r^2 + 2 g y} \dots (3.6.)$$

L'épaisseur de la lame en n'importe quelle position du profil de la crête est :

$$h = \frac{Q}{2\pi(R-x)v} \dots\dots\dots (3.7.)$$

Connaissant la forme de la veine centrale, les profils de la nappe sont obtenus en ajoutant $\frac{h}{2}$ de part et d'autre de la veine centrale.

Remarque :

Pour la méthode du "filet central", les dépressions au dessous de la nappe peuvent aller jusqu'à 50%.

Pour éviter de tels problèmes, les auteurs recommandent de déterminer le profil du déversoir à partir de la charge correspondant au débit de plus grande occurrence; le rayon en crête étant toujours calculé à partir du débit de pointe laminé.

b) Profil avec plan d'approche :

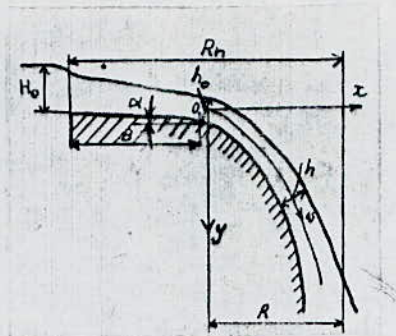


FIG. 3.3

Ce type de profil, est adopté quand le rayon de l'entonnoir est tel que $R_n = (5 \div 7) H_0$.

Pour un plan d'approche incliné d'un angle $\alpha = 6^\circ \div 9^\circ$ par rapport à l'horizontale, la profondeur du courant d'eau au dessus de la crête (voir fig. 3.3.) est de " $h_0 \simeq 0,65 H_0$ ".

Ce déversoir fonctionnera en régime dénoyé si $\frac{h_0}{R} < 0,46$, soit $\frac{H_0}{R} < 0,70$.

D'habitude, la longueur du plan d'approche B est prise égale à $(3 \div 4) H_0$;

on voit sur le schéma ci dessus que le rayon au niveau de la crête est égal à :

$$R = R_n - B - 0,325 \cdot H_0 \cdot \sin \alpha .$$

Pour établir le lieu du filet moyen du courant sur le tronçon parabolique du déversoir, en aval du plan d'approche, on utilise la formule suivante :

$$y = \frac{g x^2}{2 v_r^2 \cos^2} + x \operatorname{tg} \alpha \dots\dots\dots (3.8)$$

$$0 \leq x \leq R$$

où v_r est la vitesse radiale moyenne d'entrée, elle est égale à :

$$v_r = \frac{Q}{2\pi R \cdot 0,85 \cdot H_0} \dots\dots\dots (3.9)$$

Le long du déversoir, la vitesse en n'importe quel point est :

$$v = \sqrt{v_r^2 + 2 g y + 2 v_r \sin \alpha \sqrt{2g y}} \dots\dots (3.10).$$

Le tracé du profil, s'effectue comme pour les déversoirs sans plan d'approche.

4.3.4. transition déversoir - puits

La zone de transition est définie comme étant la section où le "CROTCH" s'établit pour le débit du dimensionnement.

Pour trouver la section nécessaire au passage du débit maximum, sans pour autant que celle-ci ne contrôle le débit, on applique l'équation de continuité.

La vitesse au niveau de cette section est :

$$v_t = 0,98 \sqrt{2 g (y_t + \frac{h_0}{2})} \dots\dots\dots (3.11)$$

où y_t est l'ordonnée de la section par rapport à la crête.

et $y_t + \frac{h_0}{2}$ étant la charge géométrique au niveau de la section du CROTCH.

d'où le diamètre de la section :

$$d_t = \sqrt{\frac{4 Q}{\pi \cdot v_t}} \dots\dots\dots (3.12).$$

Les diamètres dans les section suivantes, seront déterminés de la même façon, mais les vitesses seront calculées avec la formule suivante :

$$v = 0,93 \sqrt{2 g y} \dots\dots\dots (3.13).$$

Remarque : Les coefficients 0,98 et 0,93 dans (3.11) et (3.13) supposent des pertes de charge par frottement et par courbure au dessous de la crête de l'ordre de 4 et 14% respectivement au niveau de la section de transition, et au delà.

On obtiendra ainsi un tronçon convergent qui se rétrécit de haut en bas.

Le calcul de ce tronçon se termine là où l'écoulement en chute libre, se transforme en écoulement en charge (section 1.1. fig 3.1). L'altitude de cette section par rapport à la surface libre du courant dans la galerie est calculée par application du théorème de Bernoulli, entre cette section et la section à la sortie B-B.

$$h_{1-B} = \frac{v_B^2 - v_1^2}{2g} + \sum \sum h_{1-B} \dots\dots\dots (3.14)$$

où $\sum h_{1-B}$ est la somme des pertes de charge étendues au parcours de la section 1-1 à la section B-B.

La détermination de la position de la section 1-1 doit être effectuée avec beaucoup de précaution, car si la section réelle où a lieu le début de la mise en charge se trouve au dessous de la section envisagée, le diamètre de la veine liquide aura tendance à diminuer, d'où naissance de dépression. D'autre part, si celle-ci se trouve au dessus de la section envisagée, il y aura noyade prématurée du déversoir.

4.3.5. Le puits vertical :

Son rôle est de relier le déversoir à la galerie d'évacuation, plus ou moins inclinée déjà existante.

Le puit vertical peut être cylindrique ou convergent.

Le second choix est adopté quand la détermination de la hauteur h_{1-B} (voir ci-avant), conduit à la localisation de la section (1.1) très près du coude. Dans le cas contraire, la section du puits se continue avec un diamètre constant jusqu'au coude.

4.3.6. Le coude :

Le coude est l'élément le plus sensible de l'évacuateur; son rôle est d'imposer une direction nouvelle à l'écoulement.

Les caractéristiques principales de cet élément sont : sa section transversale, son rayon de courbure et la position de l'aération.

Si la galerie d'évacuation est conçue pour fonctionner en charge, le diamètre de la section transversale du coude sera égal à celui de la galerie. Dans le cas contraire, le diamètre sera inférieur.

D'autre part, à cause de la courbure du coude et de la grande vitesse d'écoulement à ce niveau, les filets liquides seront soumis à la force centrifuge. Ils auront tendance à se détacher de la paroi supérieure du coude et à éroder la paroi inférieure de celui-ci.

Pour se débarrasser du risque de cavitation, plusieurs dispositions peuvent être adoptées, parmi elles, on citera :

- 1 - adoption d'une section de coude convergente vers la galerie qui oblige les filets liquides à adhérer à la paroi supérieure;
- 2 - Installation d'une aération au niveau de la zone déprimée;
- 3 - adoption d'un rayon de courbure du coude assez grand.

comme le coude a une grande influence sur les caractéristiques de l'écoulement dans la galerie, les auteurs recommandent de choisir un rayon de courbure r_c du coude, tel que $r_c = (2 \div 5) \varnothing \dots\dots\dots (3.15)$.

\varnothing étant le diamètre de la section transversale du coude.

4.3.7. La galerie d'évacuation :

La galerie d'évacuation, peut fonctionner soit en charge, soit en surface libre. Dans le cas où elle fonctionne en surface libre, la profondeur à l'aval du coude sera déterminée par les formules habituelles de calcul de la section contractée.

Si la pente de la galerie est supérieure à la pente critique, le ressaut n'aura pas lieu à l'intérieur de la galerie, il s'établira à l'extérieur d'où nécessité de prévoir un bassin de dissipation important.

Si la pente est inférieure, le ressaut se manifeste au delà de la section contractée, ce qui nécessite des dimensions transversales de la section, plus importantes.

4.3.8. Influence et amélioration des conditions d'approche :

Les conditions d'approche (profondeur d'approche; proximité des berges etc...) influencent le fonctionnement de l'évacuateur de crue (en tulipe) surtout quand celui-ci fonctionne en régime dénoyé.

Dans le cas où le déversoir n'est pas alimenté uniformément sur tout son pourtour, une diminution de la capacité d'évacuation est remarquée. D'autre part, l'accélération de coriolis aidant, il y a formation d'un vortex qui contribue à cette diminution.

Il y a donc lieu de corriger la distribution inégale du débit et d'empêcher la naissance du vortex, cela par le guidage de l'eau au moyen de murs construits entre la tulipe et la rive, dans ce but.

Le profil de ceux-ci est établi en se basant sur la relation suivante :

$$c' = \beta - \alpha \dots\dots\dots (3.16)$$

c' : constante choisie dans le domaine 5° à 15° .

β et α sont les angles qui déterminent le profil du mur.

En prenant une valeur de c' et en faisant varier l'angle α de 0° à 70° , on obtient les valeurs de β correspondantes.

L'intersection des rayons issus des points 1 et 2 donne le profil du mur (voir fig 3.4).

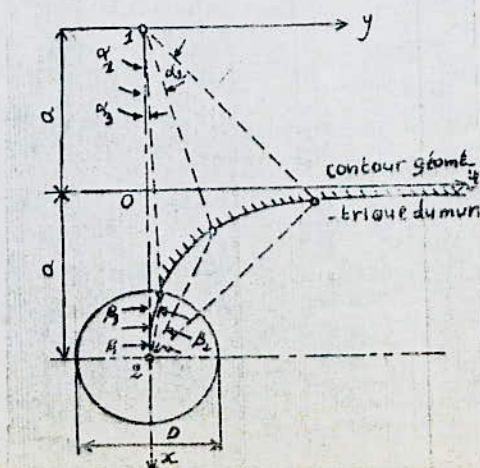


FIG.3-4

Si cette disposition n'est pas adoptée et que le déversoir se trouve à proximité d'un mur rectiligne : les vitesses sur le seuil aux points "e" et "f" (fig 3.5 A) seront calculées d'après les relations suivantes :

$$v_e = \frac{Q}{2\pi R \cdot 0,75 \cdot H_0} \frac{2K_1}{K_1 + K_2} \dots\dots\dots (3.17).$$

$$v_f = \frac{Q}{2\pi R \cdot 0,75 \cdot H_0} \frac{2K_2}{K_1 + K_2} \dots\dots\dots (3.18).$$

où K_1 et K_2 sont des coefficients déterminés à partir du graphique (fig 3.5 B), en fonction de la distance "a" séparant le mur de l'axe du puits.

La vitesse en n'importe quel point intermédiaire est donnée par :

$$v_i = v_f + \frac{\pi - \mathcal{Y}}{\pi} (v_e - v_f) \dots\dots\dots (3.19).$$

où \mathcal{Y} angle définissant la position du point "i".

$$\mathcal{Y} = (0 \div \pi) r_d.$$

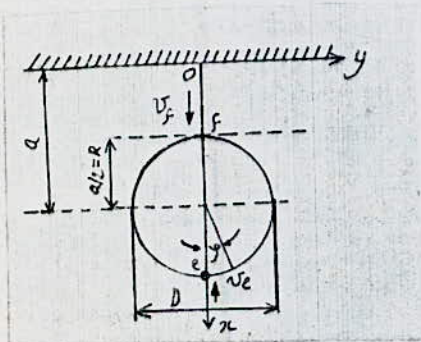


FIG.3.5.A

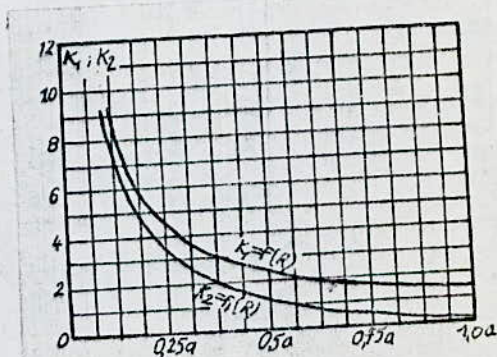


FIG.3.5.B

4.4. Recherche de M^r A. LENCASTRE (5) :

M^r A. LENCASTRE, dans ses recherches sur les évacuateurs en tulipe adopte les résultats des expériences de M. CREAGER en ce qui concerne les déversoirs rectilignes (forme CREAGER). Il fait l'analogie suivante :

- Le profil du déversoir circulaire déterminé pour une charge H et un débit "Q" donné, est le même que celui d'un déversoir CREAGER rectiligne calculé pour les mêmes H et Q.

4.4.1. Connection du déversoir au puits vertical :

La règle adoptée ici est de maintenir la hauteur cinétique, en n'importe quelle section, toujours inférieure ou égale à l'énergie totale disponible au niveau de celle-ci.

$$\frac{v_t^2}{2g} \leq y_t$$

ou bien

$$v_t \leq \sqrt{2g y_t} \dots\dots\dots (4.1)$$

y_t étant l'ordonnée de la section horizontale considérée par rapport à la crête.

La charge au dessus de la crête est considérée comme totalement perdue.

Remarque : Contrairement à M^r LENCASTRE, nous considérons que le fait de négliger complètement la charge au dessus du déversoir n'est pas justifiée surtout pour les grandes valeurs de H_0 .

Pour une section circulaire de diamètre ϕ , la condition (4.1) peut être écrite :

$$\phi^2 \geq \frac{4 Q}{\pi \sqrt{2g} \sqrt{y_t}} = \frac{4 Q}{13,9 \sqrt{y_t}} \dots\dots (4.2.)$$

4.2. Connection du puits vertical à la galerie :

L'auteur considère que le problème principal à ce niveau, est la disposition de l'aération dans le cas où elle est nécessaire.

Il adopte pour cela les conclusions de M. GARDEL les évacuateurs de crue du déversoir circulaire "LAUSANNE 1946" (que nous n'avons pas consulter) qui conseille l'utilisation systématique de l'aération à l'aval du coude.

L'auteur de sa part aboutit aux conclusions suivantes :

- l'Aération n'est pas nécessaire dans le cas où la galerie est courte ou bien si le taux de remplissage choisi est faible.

Le taux de remplissage "a" est définie comme étant le rapport de la hauteur maximum du niveau d'eau dans la galerie à la hauteur maximum de la galerie :

$$a = \frac{h'}{h_1} \dots\dots\dots (4.3).$$

Si la galerie est circulaire, alors $h_1 = d$.

— Pour la galerie plus longue, l'aération dans tous les cas conduit à un écoulement plus stable.

L'aération amont provoquant des pertes de charges plus importantes que l'aération avale, ce qui a pour conséquence de provoquer la mise en charge prématurée de l'évacuateur.

C'est pour cela, que l'aération amont n'est adoptée que pour les cas où le débit de dimensionnement est petit par rapport au débit d'engorgement. On élimine ainsi, le risque de cavitation à l'intérieur du coude.

4.4.3. Les piliers ou guideaux :

Le rôle principal de ceux-ci est :

- d'imposer à l'écoulement une direction déterminée (radiale dans le cas d'un déversoir circulaire), pour que le débit soit distribué uniformément tout autour du déversoir;
- loger ou supporter des installations mécaniques ou électriques (vannes ... etc).

L'installation des guideaux est surtout nécessaire quand l'évacuateur est destiné à fonctionner en régime dénoyé.

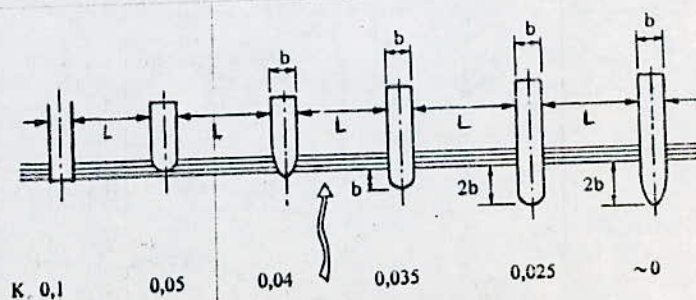
L'équipement d'un déversoir avec des guideaux, conduit à considérer une longueur géométrique égale au périmètre du déversoir, à la crête diminué de l'épaisseur des guideaux, tandis que la longueur réelle à prendre en compte pour le calcul du débit sera égale à la longueur géométrique diminuée d'une longueur fictive traduisant l'effet des contractions;

- soit donc : L la longueur géométrique - la longueur réelle peut être exprimée par $L - n K H_0$.

où n est le nombre de contractions, en général, égal à deux fois le nombre de piliers.

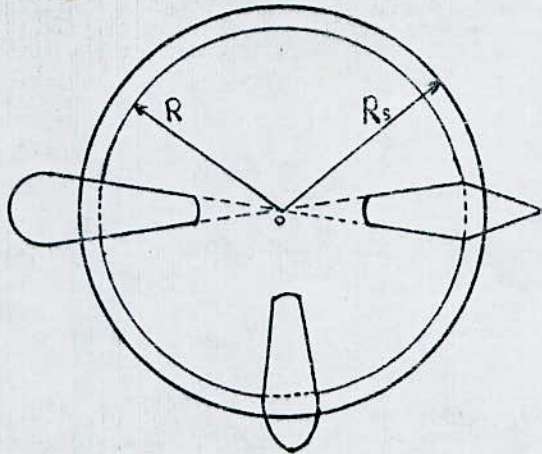
K est le coefficient de piliers, il est constant pour un type de pilier donné et décroît avec l'amélioration de la géométrie de celui-ci.

Pour fixer les idées, nous présentons ci-après quelques types de guideaux généralement utilisés pour les déversoirs rectilignes et étudiés par l'U.S.C.E (3).



Types de piliers simples et coefficients de contraction latérale K : b et L caractérisent l'épaisseur des piliers et la distance entre ceux-ci.

Pour adapter ces profils aux déversoirs circulaires, une première approche serait de faire converger l'aval des profils radialement vers le centre du déversoir.



4.4.4. Etude de la Galerie :

Un déversoir en puits utilise en général la dérivation provisoire comme galerie d'évacuation; il ne faudra pas dans ce cas oublier de la dimensionner convenablement, pour son rôle provisoire et définitif.

La galerie d'évacuation peut être dimensionnée soit pour fonctionner en charge soit à surface libre.

On préfère en général que le fonctionnement pour le débit maximum se fasse en surface libre, ce qui a l'avantage que le débit soit proportionnel à peu près à $h^{3/2}$. Donc, s'il y a une crue supérieure à celle qu'on attend, il y a une certaine marge de sécurité, tandis que si la galerie fonctionne en charge il n'y a donc pratiquement pas possibilité de dériver un débit plus fort que celui qu'on attend.

Pour garantir un écoulement à surface libre, on se fixe un taux de remplissage maximum à ne pas dépasser, celui-ci étant toujours inférieur au taux maximum expérimental, ceci, à cause des différences existantes entre la réalité et les conditions sur modèle réduit (effet des vagues, non permanence de l'écoulement, etc...).

Le fait de fixer le taux de remplissage maximum et le débit maximum à faire transiter, détermine automatiquement les caractéristiques suivantes :

- le diamètre et la pente de la galerie;
- l'élévation du courant aval;
- la hauteur du batardeau, vu que celui-ci doit assurer une charge suffisante pour faire transiter le débit de la crue de chantier.

Si "a" est le taux de remplissage, la hauteur maximum à l'intérieur de la galerie sera :

$$h'_{\max} = a h_1 \dots\dots\dots (4.4)$$

à laquelle correspond une section mouillée A max. L'énergie correspondante, au niveau de cette section, pour le débit maximum, sera :

$$H'_M = h'_{\max} + \frac{Q^2_{\max}}{2 g A_{\max}^2} \dots\dots\dots (4.5).$$

En assumant que le coefficient de CORIOLIS $\alpha = 1$.

La pente de la galerie 'i' peut être déterminée directement avec les formules de CHEZY ou de STRICKLER.

Si on connaît la courbe de tarrage $Q = f'(h')$ et la vitesse moyenne du courant dans la galerie, on peut calculer l'énergie spécifique à la section aval :

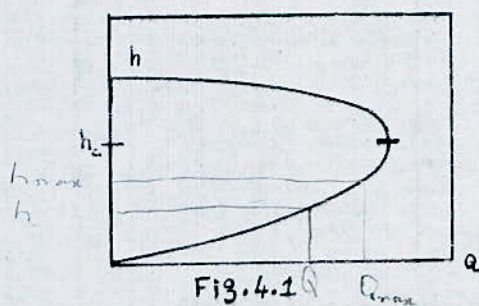
$$F_1(Q) = h' + \frac{Q'^2}{2 g A^2} \dots\dots\dots (4.6).$$

Il est aussi possible d'obtenir, la courbe de l'énergie spécifique pour la section maximum aval :

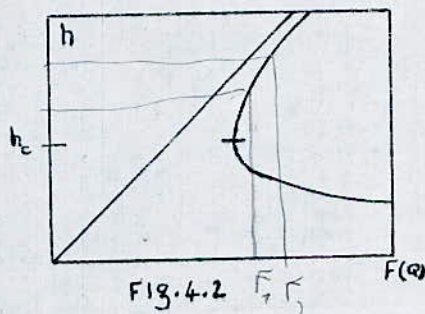
$$F_2(Q) = h'_{\max} + \frac{Q^2}{2 g A_{\max}^2} \dots\dots\dots (4.7).$$

Si un ressaut hydraulique se trouve à l'intérieur de la galerie, sa hauteur maximum se situera à la sortie aval de la galerie.

Si l'écoulement est torrentiel, la profondeur sera toujours inférieure à la profondeur maximum h'_{max} pour tout débit $Q < Q_{max}$ (fig 4.1).



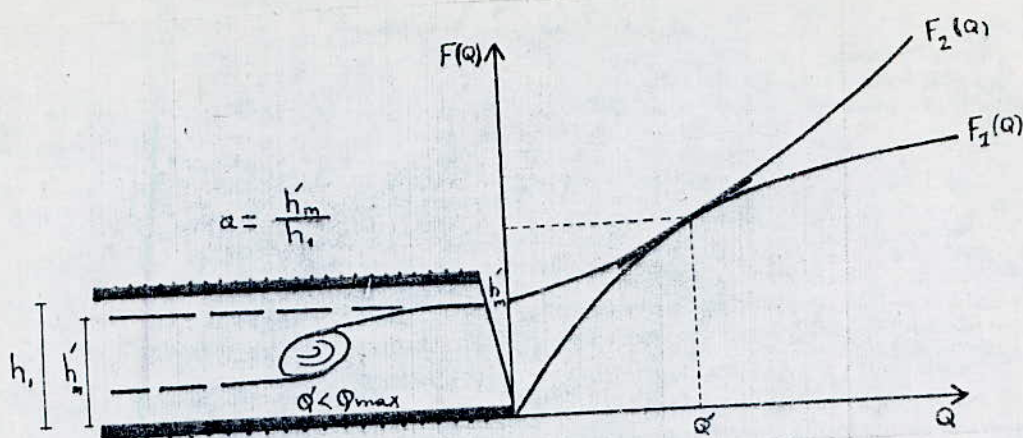
Dans cette section, l'énergie sera $F_1(Q)$, d'autre part en écoulement fluvial, l'énergie est minimum pour la hauteur minimum (fig 4.2).



ce qui permet de dire que si $F_1(Q) < F_2(Q)$, la profondeur du courant sera toujours inférieure à h'_{max} même si l'écoulement fluvial pénètre dans la galerie (tant que $Q < Q_{max}$).

Si $F_1(Q) = F_2(Q)$, la profondeur sera égale à h'_{max} à la sortie et inférieure dans toutes les autres sections.

Si $F_1(Q) > F_2(Q)$, la profondeur dépassera le maximum dans le cas du régime fluvial.



Remarque : M^r LENCASTRE, en faisant la supposition que le profil du déversoir circulaire était le même que celui d'un déversoir de CREAGER, néglige l'effet de resserement de la lame déversante; ce qu'il lui fait dire que des dépressions pouvaient apparaître sous la nappe si la charge au dessus de la crête devient supérieure à celle du dimensionnement. Ceci est vrai pour un déversoir rectiligne mais contradictoire avec les résultats expérimentaux obtenus par W. E. WAGNER(8) (voir sous chapitre 4.2. ci-avant).

Néanmoins, les deux auteurs s'accordent à dire que dans tous les cas, l'effet des dépressions était négligeable sur les ouvrages réels.

4.5. Recherche de M^r N. MARTINS (6) :

4.5.1. Position du problème :

A la sortie du coude, le courant qui vient de subir un important changement de direction est très perturbé; l'écoulement est en général super-critique et la surface du courant présente un aspect rugueux.

A cause de la rencontre de l'air et de l'eau, des contraintes tangentielles (dépendant de la vitesse relative) prennent naissance à l'interface air-eau, ce qui provoque la mise en mouvement du volume surmontant le courant liquide entraînant une dépression à l'aval du coude.

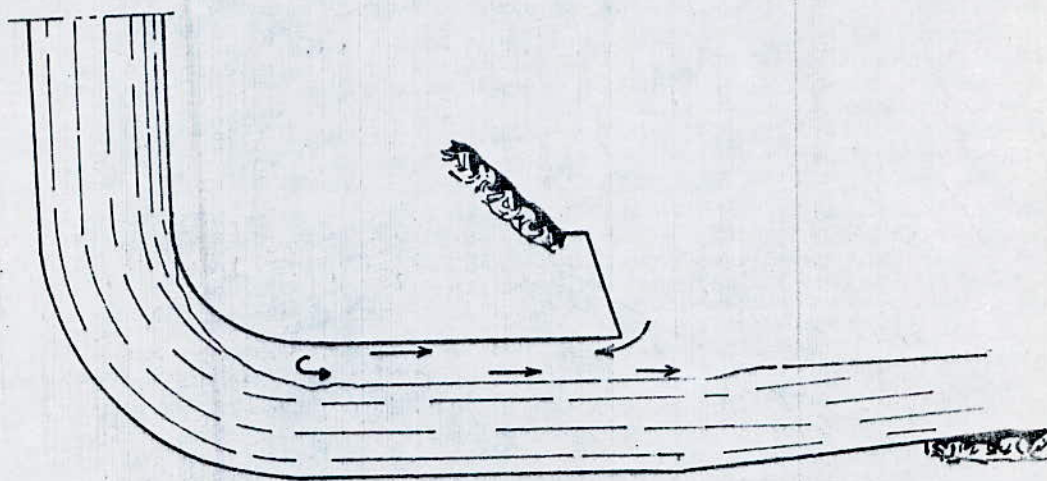


Fig (5.1) Schéma de l'aération par l'aval

Lorsqu'il s'agit de galeries courtes, dans lesquelles le taux de remplissage adopté est faible, ce type d'aération est suffisant.

S'il s'agit de galeries plus longues, ou de taux de remplissage plus important, le courant d'air ascendant aura une vitesse plus élevée, entraînant une perturbation de l'écoulement plus importante avec des dépressions non négligeables dans la galerie.

A la limite, la galerie peut se mettre en charge, provoquant une augmentation de capacité d'évacuation intéressante mais avec risque des vibrations de la structure entraînant des tassements locaux le long de la surface de contact béton-terrain naturel, créant ainsi des chemins privilégiés d'infiltration pouvant aboutir à la destruction de l'aménagement tout entier.

D'un autre côté, l'existence, à l'intérieur de la galerie, d'un ressaut hydraulique (dû soit à une pente faible du radier, soit à la formation d'un banc de matériaux solides en aval de la zone de restitution ou encore à un choix du concepteur) dont l'écoulement torrentiel amont à la propriété d'entraîner de grandes quantités d'air, crée des dépressions qui provoquent son déplacement vers l'amont et la remontée du niveau d'eau qui peut aller jusqu'à la mise en charge de la galerie.

L'air est entraîné vers l'aval sous forme de mélange air-eau par les rouleaux du ressaut.

C'est pour cela, outre l'adoption d'un taux de remplissage maximum à ne pas dépasser, il faut régénérer continuellement par le biais d'une cheminée, l'air entraîné afin d'éviter les dépressions et retarder ainsi la mise en charge prématurée de la galerie.

4.5.2. L'entraînement d'air :

a) au niveau du déversoir :

Dans l'écoulement dénoyé, l'entraînement d'air est dû en premier lieu à l'action de la turbulence à l'interface air-eau au niveau de la crête (région I - fig 5.2.b)

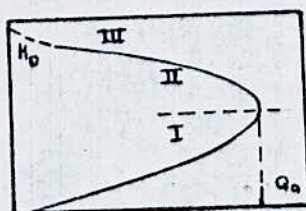


Fig 5.2. b

Si le débit augmente sur le déversoir, la lame d'eau déversante peut fermer entièrement le puits (région II). Cette situation est caractérisée par le "boil" (ressaut annulaire) à l'entrée du puits. Une fois le réservoir complètement noyé, il n'y a plus d'air entraîné par le puits (région III).

Une partie de l'air qui est en contact avec le liquide est entraîné par l'écoulement, l'autre finit par s'émulsionner dans le même liquide augmentant ainsi son volume (3).

b) au niveau de la galerie :

Comme on l'a vu plus haut, l'existence d'un ressaut dans la galerie provoque à son pied un entraînement d'air, qu'il faudra compenser.

Plusieurs auteurs se sont penchés sur le problème, notamment:

KALINSKE et RUBERTSON (1943) qui trouvent sur modèle réduit, que le rapport en débit d'air Q_a au débit d'eau Q pour un ressaut hydraulique est :

$$\frac{Q_a}{Q} = 0,006(F-1)^{1,4} \dots\dots\dots (5.1).$$

CAMPBELL et GUYTON ont trouvé pour leur part que le volume d'air nécessaire d'un ressaut à la sortie d'une vanne était :

$$\frac{Q_a}{Q} = 0,04 (F-1)^{0,85} \dots\dots\dots (5.2).$$

WISNER (1965) a modifié la formule (5.1) et trouve :

$$\frac{Q_a}{Q} = 0,014 (F-1)^{1,4} \dots\dots\dots (5.3).$$

Le "U S B R" donne:

$$\frac{Q_a}{Q} = 0,03 (F-1)^{1,06} \dots\dots\dots (5.4).$$

dans tous les cas F est nombre de froude dans la tranche torrentielle amont, mais il est remarqué que toutes ces formules déterminées sur modèle réduit négligent totalement les effets d'échelle.

Des expériences menées sur des modèles réduits de tailles différentes ayant tous deux des écoulements où $F = 5$ et où les vitesses d'écoulement amont étaient de 5 et 2 m/s respectivement donnèrent des valeurs de Q_a/Q deux à trois fois supérieures (pour $V = 5$ m/s).

KENNER pour sa part a montré que le débit d'air variait en fonction de V^3 .

A partir de là, CASTELEYN et KOLKMAN (1977) trouvaient que le volume d'air entraîné était de :

$$Q_a = K (V - 0,8)^3 / g \dots\dots\dots (5.5).$$

où V est la vitesse du courant supercritique.

Modifiée par THOMAS (1982), cette formule devient :

$$\frac{Q_a}{Q} = 0,01 F^2 \left(1 - \frac{0,8}{V}\right)^3 \dots\dots\dots (5.6).$$

forme similaire à celle proposée par KENNER, mais qui inclue le terme 0,8 qui est considéré comme la vitesse à laquelle commence l'entraînement de l'air.

Une équipe Anglaise (1) a proposé après des recherches laborieuses (plus de 2250 tests en 3 ans) que le rapport $\left(\frac{Q_a}{Q}\right)_{\max}$ est donné par :

$$\left(\frac{Q_a}{Q}\right)_{\max} = 0,00234 F^2 (1 + 4,87 e^{-0,35 (F - 1)}) \dots\dots (5.7).$$

qui peut s'écrire simplement :

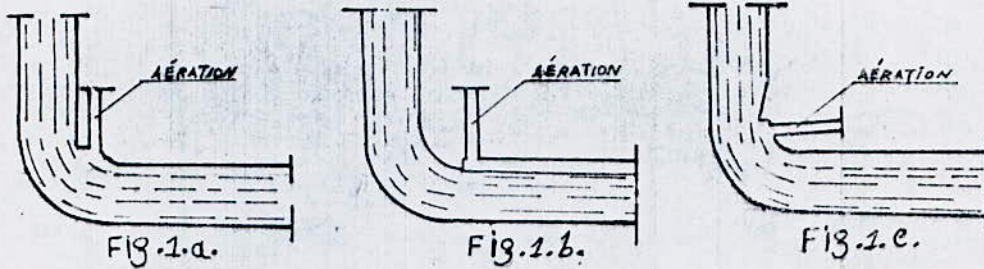
$$\left(\frac{Q_a}{Q}\right)_{\max} \simeq 0,04 (F - 1)^{0,85} \text{ pour } 2 \leq F \leq 9$$

résultat similaire à celui de CAMPBELL et GUYTON.

et :

$$\left(\frac{Q_a}{Q}\right)_{\max} = 0,0025 F^2 \text{ pour } 10 \leq F \leq 18.$$

4.5.3. Emplacement de la cheminée d'aération :



La figure (1-a) montre l'aération amont sans déflecteur, dans ce cas, si le débit est proche du débit de noyade du puits, l'entrée de la cheminée peut être noyée, le coude est mis sous pression; c'est la section aval du coude qui contrôle l'écoulement.

ce type d'aération n'est pas efficace pour maintenir l'écoulement en surface libre dans la galerie.

Dans la figure (1.b), la cheminée d'aération est placée à l'aval; le déflecteur est matérialisé par le retrécissement graduel de la partie convexe du coude.

L'avantage principal de cette disposition est qu'elle permet la transition d'un écoulement en charge à un écoulement à surface libre dans la galerie.

La figure (1.c), montre le dernier type de disposition d'aération, introduction d'un déflecteur à l'amont du coude, permet de réaliser l'écoulement en surface libre à partir de la zone convexe de celui-ci, mais les résultats expérimentaux montrent que l'écoulement dans ce cas est très perturbé à l'aval.

4.5.4. Dimensionnement de la cheminée d'aération :

Pour le dimensionnement de la cheminée d'aération, MARTINS fait l'hypothèse que le volume d'air de dimensionnement de la cheminée est le même que le volume d'air entraîné par le ressaut se produisant à l'aval d'une vanne insérée dans une galerie.

Il utilise donc la formule trouvée par CAMPBELL et GUYTON

$$\frac{Q_a}{Q} = 0,04 (F - 1)^{0,85}$$

où F est le nombre de froude à la sortie du déflecteur.

$$F = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h'}}$$

V est la vitesse de l'eau à la sortie du déflecteur.

$$V = \frac{Q}{S} = \sqrt{2 g H} \dots\dots\dots (5.8).$$

H : Hauteur géométrique totale.

$$H = H_0 + Z - h'.$$

La vitesse de l'air (V_a) dans la cheminée ne doit pas dépasser 45 m/s, de façon à éviter les grandes pertes de charges ainsi que les dépansions dans la galerie.

Ainsi, la section transversale de la cheminée sera :

$$S' = \frac{Q_a}{V_a} \text{ ou bien } S' = \frac{Q_a}{45} \dots\dots (5.9).$$

Remarque : YUSUF G. MUSSALLI (7), suggère que la cheminée calculée par cette méthode est surdimensionnée.

Nous pensons pour notre part que ce point de vue est justifié car dans la majorité des cas, les tulipes étant prévues pour fonctionner en régime dénoyé; la propriété d'entraînement d'air par le déversoir peut être mise à profit pour diminuer le débit de dimensionnement de la cheminée d'aération.

APPLICATION A UN OUVRAGE EXISTANT :

L'ouvrage sur lequel portera notre application est le déversoir puits en tulipe de HAMMAM MASKHOUTINE, dans la Wilaya de GUELMA, dont voici les données principales :

$$Q_{5000}^{\text{laminé}} = 1078 \text{ m}^3/\text{s} \approx 1100 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{10000}^{\text{laminé}} = 1262 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Côte de la crête} : 371,05 \text{ m}$$

$$\text{niveau amont max} : 374,18 \text{ m } (Q_{5000}^{\text{laminé}})$$

$$374,58 \text{ m } (Q_{10000}^{\text{laminé}})$$

$$\begin{aligned} \text{Développement en hauteur } L_0 &= \text{côte de la crête} - \text{côte du radier} \\ &= 371,05 - 289,637 \end{aligned}$$

$$L_0 = 81,413 \text{ m}$$

Calcul du diamètre de la crête :

Nous utilisons le procédé itératif de WAGNER avec les données de départ suivantes :

$$Q = Q_{5000}^{\text{laminé}} = 1100 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\begin{aligned} H_0 &= \text{côte max } (Q_{5000}^{\text{laminé}}) - \text{côte du seuil} \\ &= 374,18 - 371,05 = 3,13 \text{ m.} \end{aligned}$$

soient :

$$C_d' = 0,48, \text{ et un taux de dépression } \frac{H_u}{H_s} = 30\%$$

$$\begin{aligned} E &= 0,3 \text{ m ce qui implique } H_s = H_0 + E \\ &= 3,13 + 0,3 = 3,43 \text{ m.} \end{aligned}$$

1ère approximation :

$$H_s = 3,43 \text{ m}$$

$$\frac{C_d' \sqrt{2g} H_s^{5/2}}{Q} = \frac{0,48 \sqrt{2 \cdot 9,81} (3,43)^{5/2}}{1100} = 0,0420$$

$$\begin{aligned} \text{---)} \quad \frac{H_s}{R_s} &= 2\pi \left(\frac{C_d' \sqrt{2g} H_s^{5/2}}{Q} \right) \\ &= 0,263 \end{aligned}$$

De la figure (2.9), on tire $\frac{E}{H_s} = 0,077 \rightarrow E = 0,077 \times 3,43$

$$E = 0,264 \text{ m d'où } H_s = 3,13 + 0,264 = 3,394 \text{ m}$$

et de la figure (2.4.A), on trouve que $C_d' = 0,444$.

2ème approximation :

$$\frac{C_d' \sqrt{2g} H_s^{5/2}}{Q} = \frac{0,444 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81} \cdot (3,394)^{5/2}}{1100} = 0,038 \rightarrow \frac{H_s}{R_s} = 0,239$$

$$\rightarrow \frac{E}{H_s} = 0,075 \rightarrow E = 0,075 \times 3,394 = 0,255 \text{ m d'où } H_s = 3,13 + 0,255 = 3,384 \text{ m}$$

3ème approximation :

$$\frac{C_d' \sqrt{2g} H_s^{5/2}}{Q} = \frac{0,444 \sqrt{2 \cdot 9,81} \cdot (3,384)^{5/2}}{1100} = 0,0376 \rightarrow \frac{H_s}{R_s} = 0,2365 \text{ m}$$

$$\rightarrow \frac{E}{H_s} = 0,0755 \rightarrow E = 0,0755 \times 3,384 = 0,255 \text{ m. d'où } H_s = 3,385 \text{ m}$$

et $C_d' = 0,444$

Les valeurs de H_s , E et C_d' se stabilisent donc, la solution est atteinte.

soient :

$$H_s = 3,385 \text{ m}, \quad E = 0,255 \text{ m} \quad \text{et} \quad C_d' = 0,444$$

A partir de la valeur de $\frac{H_s}{R_s} = 0,2365$ et $H_s = 3,385 \text{ m}$ on a :

$$R_s = \frac{3,385}{0,2365} = 14,31 \text{ m.} \rightarrow R_s = 14,31 \text{ m.}$$

La formule du débit sera donc :

$$Q = C_d' \sqrt{2g} \cdot 2\pi R_s \cdot H_s^{3/2} \quad \text{avec } H_0 = H_s - E \text{ on obtient :}$$

$$\frac{H_0}{H_s} = 1 - \frac{E}{H_s} \rightarrow H_s = \frac{H_0}{(1 - E/H_s)} \quad \text{et avec } \frac{E}{H_s} = 0,07555 \rightarrow H_s = \frac{H_0}{0,9245}$$

Alors :

$$Q = C_d' \sqrt{2g} \cdot 2\pi R_s \left(\frac{H_0}{0,9245} \right)^{3/2}$$

$$\text{En appelant } C_d = \frac{C_d'}{(0,9245)^{3/2}}$$

On obtient :

$$Q = C_d \cdot 2 \pi R_s \sqrt{2g} H_o^{3/2}$$

où $C_d = \frac{C'_d}{(0,9245)^{3/2}} = \frac{0,444}{(0,9245)^{3/2}} = 0,495$ légèrement supérieur à la valeur adoptée pour le calcul de laminage; donc dans le sens de la sécurité.

Détermination du Profil de la crête :

Nous avons obtenu $\frac{H_s}{R_s} = 0,2365 \simeq 0,25$ et nous avons opté pour un taux de dépression de 30%, c'est à dire qu'il pourra exister une dépression tel que :

$$\frac{H_v}{H_s} = 0,30 \rightarrow H_v = 0,30 \cdot H_s = 0,30 \times 3,385 \simeq 1 \text{ m.}$$

. Les conditions d'approche :

Nous avons travaillé sur les colonnes correspondantes à $\frac{P}{R_s} = 2$ (V_{app} négligeable)

Les coordonnées du profil correspondant à $\frac{H_s}{R_s} = 0,25$ et des dépressions de 30% n'existent pas; nous avons interpolé entre les colonnes correspondantes à :

$$\frac{H_s}{R_s} = 0,25 \text{ et } \frac{H_v}{H_s} = 0 \%$$

$$\frac{H_s}{R_s} = 0,40 \text{ et } \frac{H_v}{H_s} = 30\%$$

$$\frac{H_s}{R_s} = 0,40 \text{ et } \frac{H_v}{H_s} = 0 \%$$

Pour obtenir les valeurs correspondantes à $\frac{H_s}{R_s} = 0,25$ et $\frac{H_v}{H_s} = 30\%$ voir tableau I (nous avons utilisé le tableau 1 page 34 et tableau 3 page 36).

T A B L E A U I

$P/R_s = 2,00$ $H_s/R_s = 0,25$ et $H_v/H_s = 30\%$.

| $\frac{X}{H_s}$ | Y / H_s | | | Y/H_s Interpolés | Y (m) | X (m) |
|-----------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------|------------|------------|
| | $H_s/R_s=0,25$ $H_v/H_s=0\%$ | $H_s/R_s=0,40$ $H_v/H_s=30\%$ | $H_s/R_s=0,40$ $H_v/H_s=0\%$ | | | |
| 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 0,01 | 0,0130 | 0,0130 | 0,0122 | 0,0139 | 0,0469 | 0,0339 |
| 0,02 | 0,0243 | 0,0225 | 0,0225 | 0,0243 | 0,0823 | 0,0677 |
| 0,03 | 0,0377 | 0,0295 | 0,0308 | 0,0323 | 0,1093 | 0,1016 |
| 0,04 | 0,0417 | 0,0365 | 0,0377 | 0,0404 | 0,1367 | 0,1354 |
| 0,05 | 0,0487 | 0,0420 | 0,0436 | 0,0469 | 0,1588 | 0,1693 |
| 0,06 | 0,0550 | 0,0465 | 0,0489 | 0,0523 | 0,1771 | 0,2031 |
| 0,07 | 0,0605 | 0,0505 | 0,0537 | 0,0569 | 0,1926 | 0,2370 |
| 0,08 | 0,0655 | 0,0540 | 0,0578 | 0,0612 | 0,2072 | 0,2708 |
| 0,09 | 0,0696 | 0,0565 | 0,0613 | 0,0642 | 0,2172 | 0,3047 |
| 0,10 | 0,0734 | 0,0585 | 0,0642 | 0,0669 | 0,2264 | 0,3385 |
| 0,12 | 0,0790 | 0,0620 | 0,0683 | 0,0717 | 0,2428 | 0,4062 |
| 0,14 | 0,829 | 0,0630 | 0,0705 | 0,0741 | 0,2508 | 0,4739 |
| 0,16 | 0,0855 | 0,0630 | 0,0710 | 0,0759 | 0,2568 | 0,5416 |
| 0,18 | 0,0872 | 0,0610 | 0,0705 | 0,0754 | 0,2554 | 0,6093 |
| 0,20 | 0,0877 | 0,0580 | 0,0688 | 0,0739 | 0,2503 | 0,6770 |
| 0,25 | 0,0850 | 0,0455 | 0,0596 | 0,0659 | 0,2197 | 0,8463 |
| 0,30 | 0,0764 | 0,0265 | 0,0446 | 0,0454 | 0,1537 | 1,0155 |
| 0,35 | 0,0650 | 0,0030 | 0,0280 | 0,0070 | 0,0236 | 1,1848 |
| 040 | 0,0500 | -0,0240 | 0,0060 | -0,2000 | 0,6771 | 1,3540 |

T A B L E A U I (Suite)

| $\frac{Y}{H_S}$ | X / H_S | | | $\frac{X}{H_S}$ Interpolés | X (m) | Y (m) |
|-----------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------|----------|
| | $H_S/R_S=0,25$ $H_V/H_S=0\%$ | $H_S/R_S=0,40$ $H_V/H_S=30\%$ | $H_S/R_S=0,40$ $H_V/H_S=0\%$ | | | |
| 0,000 | 0,520 | 0,356 | 0,413 | 0,448 | 1,518 | 0,000 |
| - 0,020 | 0,560 | 0,392 | 0,452 | 0,486 | 1,644 | - 0,068 |
| - 0,040 | 0,596 | 0,425 | 0,487 | 0,520 | 1,761 | - 0,135 |
| - 0,060 | 0,630 | 0,454 | 0,519 | 0,551 | 1,866 | - 0,203 |
| - 0,080 | 0,662 | 0,482 | 0,549 | 0,581 | 1,968 | - 0,271 |
| - 0,100 | 0,692 | 0,509 | 0,577 | 0,610 | 2,067 | - 0,339 |
| - 0,150 | 0,762 | 0,567 | 0,641 | 0,674 | 2,282 | - 0,508 |
| - 0,200 | 0,826 | 0,618 | 0,698 | 0,731 | 2,476 | - 0,677 |
| - 0,250 | 0,883 | 0,664 | 0,750 | 0,782 | 2,647 | - 0,846 |
| - 0,300 | 0,941 | 0,705 | 0,797 | 0,832 | 2,818 | - 1,106 |
| - 0,400 | 1,041 | 0,779 | 0,880 | 0,922 | 3,120 | - 1,354 |
| - 0,500 | 1,131 | 0,844 | 0,951 | 1,004 | 3,398 | - 1,693 |
| - 0,600 | 1,215 | 0,900 | 1,012 | 1,081 | 3,658 | - 2,031 |
| - 0,800 | 1,369 | 0,993 | 1,112 | 1,222 | 4,139 | - 2,708 |
| - 1,00 | 1,508 | 1,071 | 1,189 | 1,359 | 4,599 | - 3,386 |
| - 1,200 | 1,635 | 1,137 | 1,248 | 1,490 | 5,043 | - 4,063 |
| - 1,400 | 1,748 | 1,193 | 1,293 | 1,613 | 5,460 | - 4,740 |
| - 1,600 | 1,855 | 1,243 | 1,330 | 1,734 | 5,869 | - 5,417 |
| - 1,800 | 1,957 | 1,287 | 1,358 | 1,855 | 6,279 | - 6,098 |
| - 2,000 | 2,053 | 1,321 | 1,381 | 1,964 | 6,649 | - 6,771 |
| - 2,500 | 2,266 | 1,389 | 1,430 | 2,201 | 7,452 | - 8,464 |
| - 3,000 | 2,428 | 1,435 | 1,468 | 2,373 | 8,035 | -10,157 |
| - 3,500 | 2,541 | 1,467 | 1,489 | 2,503 | 8,476 | -11,849 |
| - 4,000 | 2,620 | 1,483 | 1,500 | 2,5903 | 8,770 | -13,542 |

Calcul de la zone de transition :

Le calcul de celle-ci est effectué en supposant que l'eau tombe sous son propre poids à partir d'un orifice horizontal, se situant au même niveau que la crête avec une charge $H = H_s$.

L'équation de continuité donne :

$$Q = V.S : \text{en n'importe quelle section}$$

avec $V = \sqrt{2.g.0,98H}$ (le coefficient 0,98 suppose une perte de charge de 2% sur la crête).

$H = H_s + y$ tel que y est l'ordonnée de la section considérée.

$S = \pi R^2$ où R est le rayon variable de la section du jet, ce qui donne :

$$R = \sqrt{\frac{Q}{\sqrt{2.g.0,98} \pi}} \cdot H^{-0,25}$$

Le débit à prendre en compte ici est le débit $Q_{10000}^{\text{laminé}}$ pour éviter que la zone de transition ne contrôle le débit pour $Q > Q_{5000}^{\text{laminé}}$.

$$Q_{10000}^{\text{laminé}} = 1262 \text{ m}^3/\text{s}$$

A.N

$$R = \frac{1}{\sqrt{13,774}} \cdot 1262^{0,5} \cdot H^{-0,25} \rightarrow R = 9,5714 \cdot H^{-0,25}$$

Le profil de la zone de transition commence là où le rayon déterminé à partir des tableaux adimensionnels, devient égal au rayon déterminé à partir de l'équation de continuité. Ceci pour la même ordonnée.

Graphiquement nous obtenons : (après extrapolation de la courbe du profil de la crête) :

$$D_t = 4,425 \text{ m}$$

| y (m) | $H = y+H_s$ (m) | R (m) | $x = R_s-R$ (m) | y (m) | $H = y+H_s$ (m) | R (m) | $x = R_s-R$ (m) |
|--------------|--------------------|--------------|--------------------|--------------|--------------------|--------------|--------------------|
| - 0,000 | 3,385 | 7,058 | 7,252 | - 4,063 | 7,443 | 5,794 | 8,516 |
| - 0,068 | 3,448 | 7,023 | 7,282 | - 4,740 | 8,120 | 5,669 | 8,641 |
| - 0,135 | 3,515 | 6,989 | 7,321 | - 5,417 | 8,797 | 5,557 | 8,753 |
| - 0,203 | 3,583 | 6,956 | 7,354 | - 6,094 | 9,474 | 5,455 | 8,855 |
| - 0,271 | 3,651 | 6,923 | 7,387 | - 6,771 | 10,151 | 5,361 | 8,949 |
| - 0,339 | 3,719 | 6,891 | 7,419 | - 8,464 | 11,844 | 5,159 | 9,151 |
| - 0,508 | 3,888 | 6,815 | 7,495 | -10,157 | 13,537 | 4,989 | 9,321 |
| - 0,677 | 4,057 | 6,743 | 7,567 | -11,849 | 15,229 | 4,844 | 9,466 |
| - 0,846 | 4,226 | 6,675 | 7,635 | -13,542 | 16,922 | 4,718 | 9,592 |
| - 1,106 | 4,486 | 6,577 | 7,733 | -14,00 | 17,380 | 4,687 | 9,623 |
| - 1,354 | 4,734 | 6,488 | 7,822 | -15,00 | 18,380 | 4,622 | 9,688 |
| - 1,693 | 5,073 | 6,377 | 7,933 | -16,00 | 19,380 | 4,561 | 9,749 |
| - 2,031 | 5,411 | 6,275 | 8,035 | -17,00 | 20,380 | 4,504 | 9,806 |
| - 2,708 | 6,088 | 6,092 | 8,218 | -18,00 | 21,380 | 4,451 | 9,859 |
| - 3,386 | 6,766 | 5,934 | 8,376 | -19,00 | 22,380 | 4,400 | 9,910 |

Calcul du diamètre constant du puits et du coude :

Dans le tronçon de transition, l'eau tombe sous son propre poids, son mouvement est uniformément accéléré, la pression en son sein est égale à la pression atmosphérique; ceci jusqu'à une section où l'écoulement se met en charge.

Nous avons adopté un rapport $\frac{r_c}{\phi} = 4,00$ pour minimiser les pertes de charge par courbure.

La détermination du diamètre se fait par l'application du théorème de Bernoulli donnée par l'équation (3.14) page 45.

$$h_{1-B} = \frac{v_B^2 - v_1^2}{2.g} + \sum h_{1-B} \text{ où } h_{1-B} \text{ est la perte de charge le long du puits vertical de diamètre } \phi \text{ et du coude à } 90^\circ.$$

$$h_{1-B} = \left(\frac{\lambda l}{\phi} + \zeta_c \right) \frac{v^2}{2.g} \text{ avec } l = h_{1-B} + \frac{\phi}{2} - r_c.$$

$$h_{1-B} = \left(\frac{\lambda h_{1-B}}{\phi} + \frac{\lambda (\phi/2 - r_c)}{\phi} + \zeta_c \right) \frac{v^2}{2.g}$$

$$\text{d'où } h_{1-B} = \frac{(\lambda(\phi/2 - r_c) + \phi \zeta_c) v^2 / 2.g}{\phi (1 - \lambda v^2 / 2.g)}$$

Nous appellerons cette valeur de h_{1-B} par h_{1-B} calculée ($h_{1-B.c}$).

Cette même grandeur peut être déterminée géométriquement :

$$h_{1-B.g} = L_0 - y - \phi \text{ où } L_0 = 81,413 \text{ m.}$$

y : ordonnée du début du puits à diamètre constant

ϕ : diamètre du puits lié à y par l'équation de continuité.

ζ_c : coefficient de perte de charge globale dans le coude;

λ : coefficient de perte de charge linéaire dans le puits et dans le coude

$$\zeta_c = \zeta_s + \frac{\lambda l_c}{\phi} \quad l_c = r_c \cdot \theta \text{ où } \theta \text{ est angle non radiant } = \pi/2.$$

$$\zeta_c = \zeta_s + \frac{\lambda r_c \cdot \theta}{\phi} \quad \text{d'où } \zeta_c = \zeta_s + 6,3 \lambda$$

$$\zeta_s = K_\Delta \cdot K_{Re} \cdot \zeta_m \quad \left(\zeta_m = A_1 \cdot B_1 \cdot C_1 \right) \quad (\text{IDEL'CIK Page : 194}).$$

$$K_{\Delta}, K_{Re} = f(Re, \bar{\Delta}) \quad \text{où } \bar{\Delta} = \frac{\Delta}{\phi}; \quad \Delta = 2,5 \text{ mm pour le béton}$$

On trouve :

$$\text{pour } Re \geq 2.10^5$$

$$\bar{\Delta} \geq 0,001$$

$$K_{\Delta} = 1,0 \quad , \quad K_{Re} = 1,0$$

donc :

$$\xi_s = 1 \cdot A_1 \cdot B_1 \cdot C_1$$

$$A_1 = f(\theta = 90^\circ) = 1$$

$$B_1 = f(r_c/\phi = 4) = 0,11$$

$$C_1 = f(\text{forme}) = 1$$

$$\xi_s = 0,11$$

$$\xi_c = 0,11 + 6,3 \lambda$$

Le calcul a été effectué par approximations successives à l'aide du programme n° 1

Nous présentons ci-après quelques résultats obtenus et la solution retenue.

| y (m) | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | | 67 | 66 | 66,10 |
|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--|---------|---------|---------|
| R (m) | 3,98 | 3,845 | 3,729 | 3,629 | 3,541 | 3,462 | 3,390 | 3,328 | 3,27 | | 3,305 | 3,316 | 3,315 |
| \bar{r}_c (m) | 31,856 | 30,764 | 29,836 | 29,033 | 28,328 | 27,701 | 27,141 | 26,627 | 26,162 | | 26,436 | 26,531 | 26,521 |
| A (m ²) | 49,814 | 46,457 | 43,697 | 41,378 | 39,392 | 37,667 | 36,153 | 34,804 | 33,597 | | 34,306 | 34,553 | 34,528 |
| v (m/s) | 22,082 | 23,678 | 25,173 | 26,584 | 27,924 | 29,202 | 30,435 | 31,604 | 32,740 | | 32,0638 | 31,835 | 31,858 |
| R_e 10^6 | 175,860 | 182,105 | 187,766 | 192,958 | 197,761 | 202,238 | 206,001 | 210,390 | 214,136 | | 211,913 | 211,157 | 211,233 |
| $\bar{\Delta}$ 10^{-4} | 3,139 | 3,251 | 3,351 | 3,444 | 3,530 | 3,610 | 3,680 | 3,755 | 3,822 | | 3,783 | 3,769 | 3,770 |
| λ | 0,0150 | 0,0150 | 0,0155 | 0,0155 | 0,0155 | 0,0155 | 0,0155 | 0,0155 | 0,016 | | 0,0157 | 0,0157 | 0,0157 |
| l_c (m) | 50,039 | 48,323 | 46,866 | 45,606 | 44,498 | 43,513 | 42,623 | 41,827 | 41,095 | | 41,526 | 41,675 | 41,660 |
| γ_c | 0,1997 | 0,1995 | 0,2027 | 0,2027 | 0,2027 | 0,2027 | 0,1995 | 0,2026 | 0,2058 | | 0,2039 | 0,2039 | 0,2039 |
| h_{1Bg} (m) | 43,449 | 38,722 | 33,954 | 29,155 | 24,331 | 19,488 | 14,628 | 9,756 | 4,8724 | | 7,803 | 8,780 | 8,682 |
| $h_{1.B.C}$ | 3,833 | 4,448 | 5,138 | 5,791 | 6,4597 | 7,145 | 7,744 | 8,571 | 9,4466 | | 8,915 | 8,766 | 8,781 |
| $\Delta h_{1.B}$ | 39,616 | 34,273 | 28,816 | 23,364 | 17,871 | 12,342 | 6,884 | 1,184 | -4,574 | | -1,111 | 0,014 | -0,099 |

La solution retenue est :

- Diamètre du puits et du coude:

$$R = 3,316 \text{ m.}$$

$$\varnothing = 2.R \quad \text{---)} \quad \varnothing = 6,63 \text{ m}$$

- Ordonnée du début de tronçon à diamètre constant:

$$y = 66\text{m.}$$

- Longueur du tronçon à diamètre constant :

$$l = h_{1.B} + \frac{\varnothing}{2} - r_c \quad \text{---)} \quad l = 8,77 + 3,316 - 26,531 \quad \text{---)} \quad l = -14,45\text{m}$$

négligé, donc le puits est entièrement convergent; le diamètre du puits pourra être soit constant soit convergent (à déterminer par des essais sur modèle réduit).

Calcul de la galerie d'évacuation :

Nous avons opté pour une galerie circulaire de diamètre supérieur au diamètre du coude.

Critère de dimensionnement :

Nous essayerons de maintenir le ressaut à l'intérieur de la galerie, avec un taux de remplissage compris entre 0,5 et 0,81 pour la 2ème hauteur conjuguée du ressaut.

Nous avons utilisé une méthode d'approximations successives basée sur les équations adimensionnelles développées par SINNIGER et HAGER (3), dont voici le principe :

Soit une conduite à section circulaire

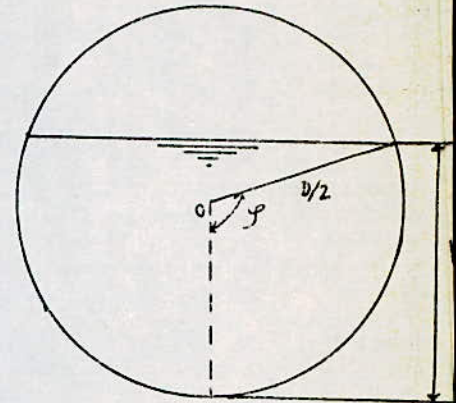
On a : $h = \frac{D}{2} (1 - \cos \varphi) \rightarrow h_o = \frac{h}{D} = 1 - \cos \varphi$

$$h_{cg} = \frac{D^3}{12A} \sin^3 \varphi - \frac{D}{2} \cos \varphi \rightarrow h_{cg_o} = \frac{h_{cg}}{D}$$

$$P = D \cdot \varphi$$

$$A = \frac{D^2}{4} (\varphi - \sin \varphi \cdot \cos \varphi)$$

$$A_o = \frac{A}{D^2} = \frac{\varphi - \sin \varphi \cdot \cos \varphi}{4}$$



où h_o , P_o et A_o sont des termes adimensionnels représentant respectivement la profondeur du courant d'eau, le périmètre mouillé et la section mouillée.

En écrivant la fonction du ressaut $\theta(h)$ pour les sections torrentielles et fluviales et en supposant que les pertes de charge par frottement entre les deux sections sont négligeables.

On a : $\theta(h) = h_{cg1} \cdot A_1 + \frac{Q^2}{g \cdot A_1} = h_{cg2} \cdot A_2 + \frac{Q^2}{g \cdot A_2}$

qui peut également s'écrire :

$$\frac{F_1}{\rho g} + \frac{Q \cdot v_1}{g} = \frac{F_2}{\rho g} + \frac{Q \cdot v_2}{g} \dots \dots \dots (1)$$

où F est la force due à la pression hydrostatique $F = \rho \cdot g \cdot h_{cg} \cdot A$

On peut aussi définir $F_o = \frac{F}{\rho \cdot g D^3}$

$$F = \int g (D \cdot h_{cgo}) \cdot D^2 \cdot A_0$$

$$F_0 = \frac{F}{\int g D^3} = h_{cgo} \cdot A_0$$

$$F_0 = \left(\frac{\sin^3 \varphi}{12 \cdot A_0} - \frac{1}{2} \cos \varphi \right) A_0$$

$$= \frac{\sin^3 \varphi}{12} - \frac{A_0}{2} \cos \varphi$$

$$= \frac{\sin^3 \varphi}{12} - \frac{1}{8} (\varphi - \sin \varphi \cdot \cos \varphi) \cdot \cos \varphi$$

$$= \frac{1}{8} \left(\frac{2}{3} \sin^3 \varphi - \cos \varphi + \sin \varphi \cdot \cos^2 \varphi \right)$$

$$= \frac{1}{8} (\sin \varphi \left(\frac{2}{3} \sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi \right) - \varphi \cos \varphi)$$

$$= \frac{1}{8} (\sin \varphi \cdot \left(\frac{2}{3} \sin^2 \varphi + 1 - \sin^2 \varphi \right) - \varphi \cos \varphi)$$

$$\Rightarrow F_0 = \frac{1}{8} (\sin \varphi - \frac{1}{3} \sin^3 \varphi - \varphi \cos \varphi)$$

$$\frac{Q^2}{g D^5} = \frac{F_{02} - F_{01}}{A_{01}^{-1} - A_{02}^{-1}}$$

Cette dernière équation est la forme adimensionnelle de l'équation (1)

La détermination de la hauteur critique s'effectue en posant le nombre de Froude est égal à l'unité; c'est à dire :

$$F_r^2 = 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{Q^2}{g \cdot A^3} \cdot \frac{\partial A}{\partial h} = 1.$$

En remplaçant par les grandeurs adimensionnelles :

$$\frac{Q^2}{g \cdot A_0^3 D^5} \frac{\partial A_0}{\partial h_0} = 1$$

d'où

$$\frac{Q^2}{g \cdot D^5} = \frac{A_0^3}{\partial A_0 / \partial h_0}$$

Un programme permet de calculer les différentes caractéristiques géométrique de la galerie en utilisant les formules établies ci-avant (programme 2).

En faisant varier le diamètre de la galerie et le taux de remplissage, le programme permet de calculer les trois hauteurs d'eau h_2 , h_{cr} , h_1 .

Pour tous les cas possibles, sans ressaut et avec ressaut, nous présentons ci-après les différents résultats.

1 - Sans ressaut :

| | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|----------------|------------------------|------------------------|---------------------------|
| $D = 9,90 \text{ m}$ | $\mathcal{S} = 2,000$ | $h_2/D = 0,71$ | $h_2 = 7,01 \text{ m}$ | $h_1 = 2,28 \text{ m}$ | $h_{cr} = 9,564$ |
| $D = 10,10 \text{ m}$ | $\mathcal{S} = 2,251$ | $h_2/D = 0,91$ | $h_2 = 8,23 \text{ m}$ | $h_1 = 2,32 \text{ m}$ | $h_{cr} = 8,23 \text{ m}$ |
| $D = 10,50 \text{ m}$ | $\mathcal{S} = 2,251$ | $h_2/D = 0,81$ | $h_2 = 8,55 \text{ m}$ | $h_1 = 2,41 \text{ m}$ | $h_{cr} = 0,892$ |

2 - Avec ressaut :

| | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|----------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------|
| $D = 12,50 \text{ m}$ | $\mathcal{S} = 2,251$ | $h_2/D = 0,81$ | $h_2 = 10,18 \text{ m}$ | $h_1 = 2,87 \text{ m}$ | $h_{rc} = 10,13 \text{ m}$ |
| $D = 12,70 \text{ m}$ | $\mathcal{S} = 2,251$ | $h_2/D = 0,81$ | $h_2 = 10,35 \text{ m}$ | $h_1 = 2,92 \text{ m}$ | $h_{rc} = 10,106 \text{ m}$ |
| $D = 14,90 \text{ m}$ | $\mathcal{S} = 2,251$ | $h_2/D = 0,81$ | $h_2 = 10,51 \text{ m}$ | $h_1 = 2,97 \text{ m}$ | $h_{rc} = 10,08 \text{ m}$ |
| $D = 13,30 \text{ m}$ | $\mathcal{S} = 2,126$ | $h_2/D = 0,76$ | $h_2 = 10,15 \text{ m}$ | $h_1 = 3,06 \text{ m}$ | $h_{rc} = 10,017 \text{ m}$ |
| $D = 13,50 \text{ m}$ | $\mathcal{S} = 2,126$ | $h_2/D = 0,76$ | $h_2 = 10,31 \text{ m}$ | $h_1 = 3,10 \text{ m}$ | $h_{rc} = 9,983 \text{ m}$ |
| | | | | | |
| | | | | | |
| $D = 26,10 \text{ m}$ | $\mathcal{S} = 2,126$ | $h_2/D = 0,76$ | $h_2 = 19,93 \text{ m}$ | $h_1 = 6,00 \text{ m}$ | $h_{rc} = 8,206 \text{ m}$ |
| $D = 27,50 \text{ m}$ | $\mathcal{S} = 2,251$ | $h_2/D = 0,81$ | $h_2 = 22,40 \text{ m}$ | $h_1 = 6,32 \text{ m}$ | $h_{rc} = 8,083 \text{ m}$ |

Comme nous avons opté pour la localisation du ressaut à l'intérieur de la galerie, nous choisissons la valeur du diamètre $D = 12,50$ m avec un taux de remplissage $h_2/D = 0,81$

Calculons avec ces conditions la pente critique :

$$i_{cr} = \frac{g.A}{e.C^2.R_h} \quad \text{avec } C = K.R_h^{1/6} \text{ coefficient de chezy.}$$

K : coefficient de rugosité

$K = 70$ pour le béton.

R_h = rayon hydraulique.

$$R_h = \frac{A}{P}$$

$$e = D \cdot \sin \mathcal{J} \quad \rightarrow e = 12,50 \cdot \sin 2,251 = 9,718 \text{ m}$$

$$A = \frac{D^2}{4} (\mathcal{J} - \sin \mathcal{J} \cdot \cos \mathcal{J}) \quad \rightarrow A = 107,03 \text{ m}^2$$

$$P = D \cdot \mathcal{J} \quad \rightarrow P = 12,50 \cdot 2,251 = 28,1375 \text{ m.}$$

$$\text{d'où } R_h = \frac{107,03}{28,1375} = 3,80 \text{ m} \quad \rightarrow C = 70 \cdot 3,80^{1/6} = 87,44 \frac{\text{m}^{0,5}}{\text{s}}$$

$$\rightarrow i_{cr} = \frac{9,81 \cdot 107,03}{9,72 \cdot 87,44 \cdot 87,44 \cdot 3,80} = 0,00372$$

$$i_{cr} = 0,00372.$$

Calcul de la pente de la galerie

$$Q = A \cdot C \sqrt{R_h \cdot i} \quad \rightarrow i = \frac{Q^2}{A^2 C^2 R_h} \quad \rightarrow i = \frac{1100^2}{107,83^2 \cdot 87,44^2 \cdot 3,80} = 0,00384$$

Pour cette solution, on remarque que la hauteur $h_1 = 2,87$ m, est faible devant le diamètre de la section transversale du coude; c'est à dire un diamètre de 6,63 m, ce qui indique qu'il y a un décollement de la lame d'eau dans le coude; d'où augmentation des pertes de charges et nécessité de recalculer le diamètre du puits et du coude avec un rétrécissement.

Si on voulait obtenir h_1 de l'ordre du diamètre du coude, il aurait fallu avoir une galerie avec un diamètre de plus de 27 m (voir résultat ci-avant), ce qui est excessif et que nous avons rejeté.

- Dimensionnement de la cheminée d'aération :

La cheminée d'aération est dimensionnée selon les formules (5.2) et (5.8).

Connaissant le débit d'eau évacué, on peut déterminer le débit d'air Q_a écoulé

$$\text{alors : } \frac{Q_a}{Q} = 0,04 (F-1)^{0,85}$$

où

$$F = \frac{v}{\sqrt{g h'}}$$

h' : hauteur d'eau sans décollement à la sortie du coude

$v = 31,835 \text{ m/s}$ (vitesse pour $y = 66 \text{ m}$).

$$F = \frac{31,835}{\sqrt{9,81 \cdot 6,63}} = 3,95 \quad \text{--} \rightarrow F-1 = 2,95$$

$$\text{--} \rightarrow Q_a = 0,004 (2,95)^{0,85} \cdot 100 = 110,28 \text{ m}^3/\text{s}$$

d'où la section de la cheminée d'aération $S' = \frac{110,28}{45} = 2,45 \text{ m}^2$ équivalent à une section circulaire avec diamètre $d_a = 1,70 \text{ m}$, ou bien une section rectangulaire de largeur $l = 1,20 \text{ m}$ et de longueur $L = 2,04 \text{ m}$.

- CONCLUSION GÉNÉRALE -

Nous avons tenté dans notre modeste travail d'exposer les méthodes de dimensionnement des évacuateurs en tulipe et la conclusion que nous pouvons faire c'est que toutes les méthodes reposent en général sur les mêmes principes, elles ne varient que dans la forme, c'est à dire :

Pour la crête : Reproduire le profil de la surface intérieure de la lame déversante dans le but de diminuer les dépressions et d'obtenir ainsi un ouvrage peu sollicité.

Pour le puits : Trouver le diamètre en chaque section du puits pour éviter tout décollement ou mise en pression prématurée du puits ou de la tulipe, cela en se basant sur le principe de conservation de l'énergie mécanique totale c'est à dire $E_M = cte$.

Pour le coude : Celui-ci soumis aux plus grandes contraintes et provoquant les plus grandes pertes de charge, on cherche toujours à trouver les formes optimales qui provoqueraient les plus petites pertes et cela en combinaison avec l'aération qui peut aider grandement.

Pour la galerie d'évacuation : Elle est en général prévue pour fonctionner en surface libre, vu les autres rôles qui peuvent lui être dévolus (vidange de fond, prise d'eau etc...); le diamètre ou les dimensions de celle-ci sont choisis de telle sorte à minimiser les coûts de réalisation (diamètre minimum rendant possible l'établissement du ressaut à l'intérieur de la galerie (ressaut qui permet de dissiper une partie de l'énergie); écoulement fluvial à l'intérieur moins sollicitant pour le revêtement intérieur de la galerie).

Pour la cheminée d'aération : Nécessaire pour stabiliser l'écoulement dans la galerie, son dimensionnement repose sur le phénomène de l'entraînement d'air qui est peu connu et qui peut donc mener à un surdimensionnement.

Pour la partie application, nous avons vu que le travail accompli ne représentait qu'une première ébauche et qu'il était nécessaire d'affiner les résultats à l'aide d'essais sur modèles réduits (nous le répétons : toujours nécessaires pour les grands ouvrages).

REMARQUE :

Pour la partie Génie-Civil, une attention particulière devra être portée à l'état de surface qui devra être le plus uniforme possible surtout le long du parcours crête-aval du coude et plus particulièrement la zone convexe du coude.

- Le long de la galerie, des dispositions constructives devront être prises pour prévenir tout risque d'infiltration.

- Une singularité intéressante à préciser est que la tulipe et le puits devront être vérifiés à la poussée d'Archimède pour le cas le plus défavorable (niveau de la retenue à N.N.R.).

Notre mémoire pourra éventuellement servir de base de travail dans le cadre d'un autre projet de fin d'études en vue de la réalisation d'un logiciel de calcul Hydraulique, Génie-Civil, qui nous le pensons devra être très utile pour le bureau d'études.

P R O G R A M M E 1

```
5 CLS
10 INPUT "y="; Y
20 R=9.57174/SQR(SQR(Y+3.38))
30 RC=8XR
40 A=3.14159XRXR
50 V=1100/A
60 REY=2XVXR
70 DELBAR=.0025/(2XR)
80 PRINT "delbar="; DELBAR: PRINT "rey"; REY
90 INPUT "lambda="; W
100 LC=3.14159RC/2
110 HBGO=81.413-Y-(2XR)
120 XF=.105+6.3XW
130 HCL: (((R-RC)XWVXV)/(4X9.810001XR)+(XFVXV)/(2X9.810001))/(1-(WVXV)/(4X9.810001XR))
150 PRINT "y="; Y: PRINT "r="; R: PRINT "rc="; RC: PRINT "a="; A: PRINT "v="; V: PRINT " REY="; REY: PRINT "DELbar="; DELBAR
160 PRINT "lambda="; W: PRINT "lc="; LC: PRINT "xf="; XF: PRINT " HBGO="; HBGO: PRINT "HBCL="; HCL: PRINT "delta hb="; HBGO-HCL
170 INPUT S$: GOTO 5
```


PROGRAMME 2

```

0 Aβ="d2###.## PHI=#.### h2/d2==.== h2=##.## h1/d2=#.### hc=##.###
h1=##.##"
1 FOR D2=9.899999 TO 50 STEP .2:GOSUB 600
2 PI=3.1416
5 FOR PHI=2 TO 2.3 STEP PI/50
6 HD2=.5*(1-COS(PHI)):YY=PHI:H2=D2*HD2
7 FO=(1/8)*(SIN(YY)^3/3-YY*COS(YY)+SIN(YY))
20 AO=(PHI-SIN(PHI)*COS(PHI))/4:GOSUB 700:PRINT USING Aβ;D2,PHI,HD2,H2,H1D2,HC,H
1:NEXT:NEXT
600 REM -----chercher la hauteur critique -----
610 DEF FNF(YY)=((YY-SIN(YY)*COS(YY))/4^3/SIN(YY)-1100^2/(D2^5*9.810001)
620 YMAX=3.1416
630 YMIN=0
640 YCR=.5*(YMAX+YMIN)
650 FOR I=1 TO 75
660 X=FNF(YCR)
670 IF X>0 THEN YMAX=YCR
680 IF X<0 THEN YMIN=YCR
690 YCR=.5*(YMAX+YMIN):NEXT:HC=.5*D2*(1-COS(YCR)):RETURN
700 REM -----chercher le rapport h1/d2 -----
710 DEF FNF(YY)=((-1/8)*(SIN(YY)-(SIN(YY))^3/3-YY*COS(YY))+FO)/(-AO^-1+((YY-SIN(YY)*COS(YY))/4))-1100^2/(9.810001*D2^5)
720 YMAX=1
730 YMIN=0
740 YCR=.5*(YMAX+YMIN)
750 FOR I=1 TO 50
760 X=FNF(YCR)
770 IF X>0 THEN YMAX=YCR
780 IF X<0 THEN YMIN=YCR
790 YCR=.5*(YMAX+YMIN):NEXT:H1=.5*D2*(1-COS(YCR)):H1D2=H1/D2:RETURN

```

valeurs de λ

| Re $\bar{\Delta} = \Delta/D_H$ | $2 \cdot 10^3$ | $4 \cdot 10^3$ | $6 \cdot 10^3$ | 10^4 | $2 \cdot 10^4$ | $4 \cdot 10^4$ | $6 \cdot 10^4$ | 10^5 | $2 \cdot 10^5$ |
|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------|--------|----------------|----------------|----------------|--------|----------------|
| 0,05 | 0,056 | 0,060 | 0,063 | 0,069 | 0,072 | 0,072 | 0,072 | 0,072 | 0,072 |
| 0,04 | 0,053 | 0,053 | 0,055 | 0,060 | 0,065 | 0,065 | 0,065 | 0,065 | 0,065 |
| 0,03 | 0,048 | 0,046 | 0,046 | 0,050 | 0,056 | 0,057 | 0,057 | 0,057 | 0,057 |
| 0,02 | 0,048 | 0,042 | 0,041 | 0,042 | 0,044 | 0,048 | 0,049 | 0,049 | 0,049 |
| 0,015 | 0,048 | 0,042 | 0,038 | 0,037 | 0,039 | 0,042 | 0,044 | 0,044 | 0,044 |
| 0,010 | 0,048 | 0,042 | 0,038 | 0,033 | 0,032 | 0,035 | 0,036 | 0,038 | 0,038 |
| 0,008 | 0,048 | 0,042 | 0,038 | 0,033 | 0,030 | 0,032 | 0,033 | 0,035 | 0,035 |
| 0,006 | 0,048 | 0,042 | 0,038 | 0,033 | 0,028 | 0,028 | 0,029 | 0,030 | 0,032 |
| 0,004 | 0,048 | 0,042 | 0,038 | 0,033 | 0,027 | 0,025 | 0,025 | 0,026 | 0,028 |
| 0,002 | 0,048 | 0,042 | 0,038 | 0,033 | 0,027 | 0,023 | 0,021 | 0,021 | 0,021 |
| 0,001 | 0,048 | 0,042 | 0,038 | 0,033 | 0,027 | 0,023 | 0,021 | 0,018 | 0,017 |
| 0,0008 | 0,048 | 0,042 | 0,038 | 0,033 | 0,027 | 0,023 | 0,021 | 0,018 | 0,016 |
| 0,0006 | 0,048 | 0,042 | 0,038 | 0,033 | 0,027 | 0,023 | 0,021 | 0,018 | 0,016 |
| 0,0004 | 0,048 | 0,042 | 0,038 | 0,033 | 0,027 | 0,023 | 0,021 | 0,018 | 0,016 |
| 0,0002 | 0,048 | 0,042 | 0,038 | 0,033 | 0,027 | 0,023 | 0,021 | 0,018 | 0,016 |
| 0,0001 | 0,048 | 0,042 | 0,038 | 0,033 | 0,027 | 0,023 | 0,021 | 0,018 | 0,016 |
| 0,00005 | 0,048 | 0,042 | 0,038 | 0,033 | 0,027 | 0,023 | 0,021 | 0,018 | 0,016 |

valeurs de λ

| Re $\bar{\Delta} = \Delta/D_H$ | $4 \cdot 10^5$ | $6 \cdot 10^5$ | 10^6 | $2 \cdot 10^6$ | $4 \cdot 10^6$ | $6 \cdot 10^6$ | 10^7 | $2 \cdot 10^7$ | $> 10^8$ |
|-----------------------------------|----------------|----------------|--------|----------------|----------------|----------------|--------|----------------|----------|
| 0,05 | 0,072 | 0,072 | 0,072 | 0,072 | 0,072 | 0,072 | 0,072 | 0,072 | 0,072 |
| 0,04 | 0,065 | 0,065 | 0,065 | 0,065 | 0,065 | 0,065 | 0,065 | 0,065 | 0,065 |
| 0,03 | 0,057 | 0,057 | 0,057 | 0,057 | 0,057 | 0,057 | 0,057 | 0,057 | 0,057 |
| 0,02 | 0,049 | 0,049 | 0,049 | 0,049 | 0,049 | 0,049 | 0,049 | 0,049 | 0,049 |
| 0,015 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 |
| 0,010 | 0,038 | 0,038 | 0,038 | 0,038 | 0,038 | 0,038 | 0,038 | 0,038 | 0,038 |
| 0,008 | 0,035 | 0,035 | 0,035 | 0,035 | 0,035 | 0,035 | 0,035 | 0,035 | 0,035 |
| 0,006 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 |
| 0,004 | 0,028 | 0,028 | 0,028 | 0,028 | 0,028 | 0,028 | 0,028 | 0,028 | 0,028 |
| 0,002 | 0,022 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,023 |
| 0,001 | 0,018 | 0,018 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 |
| 0,0008 | 0,016 | 0,017 | 0,018 | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,019 |
| 0,0006 | 0,015 | 0,016 | 0,017 | 0,017 | 0,017 | 0,017 | 0,017 | 0,017 | 0,017 |
| 0,0004 | 0,014 | 0,014 | 0,014 | 0,015 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,016 |
| 0,0002 | 0,014 | 0,013 | 0,012 | 0,012 | 0,013 | 0,014 | 0,014 | 0,014 | 0,014 |
| 0,0001 | 0,014 | 0,013 | 0,012 | 0,011 | 0,011 | 0,011 | 0,012 | 0,012 | 0,012 |
| 0,00005 | 0,014 | 0,013 | 0,012 | 0,011 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,011 |

Bibliographie

- (1) AHMED, A.A., ERVINE, D.A., Mc KEOCH, E.J., "The process of aeration in closed conduit hydraulic structures", symposium on scale effects in modelling hydraulic structures, September 3-6, 1984.
- (2) GARDEL, A., "Les évacuateurs de crues en déversoir circulaire", bulletin technique de la suisse romande, n° 27, 31 Décembre 1949.
- (3) HAGER, W.H., SINNIGER, R., "constructions hydrauliques" traité de Génie-Civil, volume 15, Presse Polytechnique, romande 1989.
- (4) IDEL'CIK, I.E., "Memento des pertes de charge". Eyrolles, Paris 1979.
- (5) LENCASTRE, A., "Shaft spillways, theoretic experimental design" International congress hydraulic research department 1955
- (6) MARTINS, N., "l'aération dans les évacuateurs en puits" Laboratorio nacional de engenharia civil, LISBOA 1960.
- (7) MUSSALI Y.G., "Size determination of partly full conduits", proc. ASCE, Journal of the hydraulics division, July 1978.
- (8) WAGNER, W.E., "Morning glory shaft spillways - Determination of pressure-controlled profiles", proc. ASCE, Design and construction division, DENVER, COLORADO. 1954
- (9) 4ème congrés des grands barrages, new delhi volume II; question n° 12, 1951
- (10) Les évacuateurs de crues en puits vertical URSS.

**** E R R A T U M ****

Page ... 70

Calcul De : ξ_s

$$\xi_s = K_{\Delta} \cdot K_{Re} \cdot \xi_m$$

$K_{\Delta} = 2$ au lieu de $K_{\Delta} = 1$

