

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Guide de calculs pratiques des infiltrations sous les ouvrages hydrotechniques .

The paper document Shelf mark (الشفرة) : P 627.8 HAS

APA Citation (APA توثيق):

Mihoubi, Mustapha Kamel. Hassane, Mohammed. (2000). Guide de calculs pratiques des infiltrations sous les ouvrages hydrotechniques [polycopie pédagogique]. ENSH.

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بتثمين لإنتاج العلمي لأساتذة وباحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (طروحات مطبوعات بيداغوجية، مقالات الدوريات، كتب...) بثه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا .

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

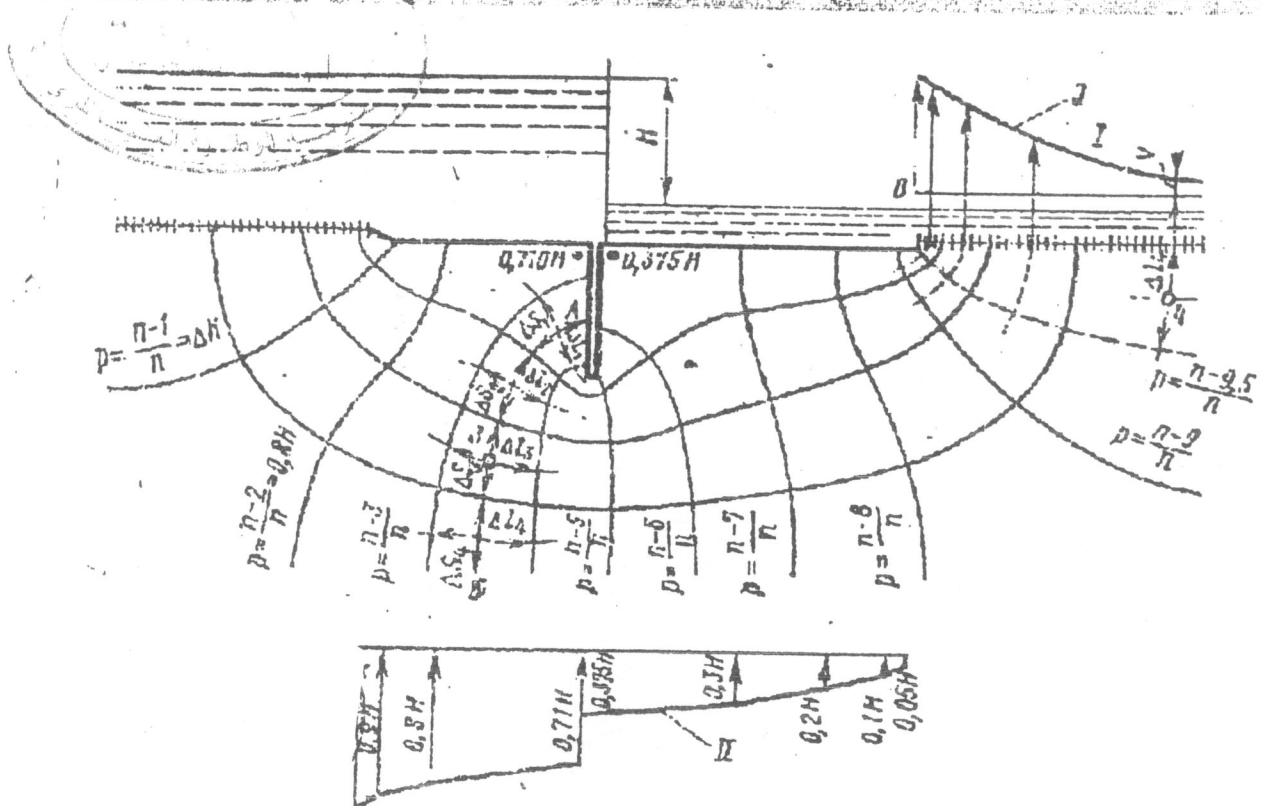
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE L'HYDRAULIQUE



GUIDE DE CALCULS PRATIQUES DES INFILTRATIONS SOUS LES OUVRAGES HYDROTECHNIQUES

(CAS SOL DE FONDATION NON ROCHEUX)



Par :

M.K. MIHOUBI (C. Cours) &

M.HASSANE (C.Cours)

AVANT-PROPOS

Cet ouvrage vient s'ajouter aux ouvrages existants à la bibliothèque de l'école comme étant une nouvelle édition entièrement revue et réécrite. Le support est riche de nouveautés que ce soit, sur l'aspect technique et méthodologique.

Ce manuel peut être utilisé comme un support pratique de résolution des problèmes d'infiltration sous les ouvrages hydrotechniques. C'est le fruit d'un travail en étroite collaboration avec mon confrère Monsieur M.HASSANE, Chef de Laboratoire d'Hydraulique et en s'appuyant aussi sur les travaux réalisés dans ce domaine, par notre confrère Russe E.BELOKONEV.

L'ouvrage présent est divisé essentiellement en quatre parties, où le lecteur trouvera décrites les différentes méthodes pratiques de résolution des problèmes d'infiltration.

Première Partie: Rappel sur la Théorie des Infiltrations.

Seconde Partie : Méthodes Approximatives de calculs d'infiltration.

Troisième Partie: Calcul de Déformation des fondations d'ouvrages Hydrotechniques.

Quatrième Partie : Applications

SOMMAIRE

| | PAGES |
|---|-------|
| AVANT PROPOS..... | 1 |
| 1. RAPPEL THEORIQUE DES INFILTRATIONS..... | 2 |
| 2. DIMENSIONNEMENT PREALABLES DU RADIER GENERAL..... | 4 |
| 3. METHODES APPROXIMATIVES DU CALCUL D'INFILTRATION | 7 |
| • Méthode du contour linéaire " dite de BLIGH "..... | 7 |
| • Méthode des coefficients de résistance " dite de TCHOUGAEV "..... | 8 |
| • Méthode du contour allongé » BLIGH- TCHOUGAEV »..... | 9 |
| • Calcul d'infiltration par le procédé graphique..... | 10 |
| 4. CALCUL DE DEFORMATIONS DES FONDATIONS D'OUVRAGES HYDROTECHNIQUES SOUS L'EFFET DES INFILTRATIONS | 14 |
| * Erosion interne | |
| * Soulèvement hydraulique | |
| * Exfoliation | |
| * Affouillement de contact | |
| 5. APPLICATIONS..... | 18 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... | 25 |

CHAPITRE I

RAPPEL SUR LA THEORIE DES INFILTRATIONS

GENERALITE :

On entend par infiltration le déplacement d'un fluide dans un milieu poreux ou fissuré (cas d'un sol rocheux). L'espace occupé par le courant d'infiltration est appelé zone d'infiltration.

Selon le caractère du régime, l'écoulement par infiltration peut être permanent ou bien permanent lorsque les paramètres d'infiltration (Vitesse; débit d'eau, pression piézométrique) sont invariables dans le temps, ou bien non permanent dans le cas contraire.

L'écoulement prend naissance suite à une différence d'énergie entre le bief amont et le bief aval dans deux sections contiguës. Selon les situations l'écoulement souterrain peut être en charge ou bien libre.

I.1 - HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES DE RESOLUTION THEORIQUES :

- Première hypothèse: Sol d'infiltration parfaitement homogène, hypothèse valable uniquement que pour les sols non rocheux et peut s'étendre aux sols rocheux à fissuration infiniment petite et uniforme.
- Deuxième hypothèse : Fluide incompressible, les vitesses d'infiltration faibles et de plus forces d'inertie négligeables
- Troisième hypothèse: Selon la loi de DARCY les vitesses sont calculées par l'expression suivante $V = - K I$ (en régime permanent).
- Quatrième hypothèse : Ecoulement plan, d'où les composantes de vitesses sont :

$$V_x = -K \frac{\partial h}{\partial x} \quad ; \quad V_y = -K \frac{\partial h}{\partial y} \quad (1.1)$$

I.2 - EQUATION FONDAMENTALE DE L'ECOULEMENT SOUTERRAIN

Equation de continuité :

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0 \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-K \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (1.3)$$

L'équation (1.3) s'exprime par l'équation de LAPLACE : $\Delta^2 h = 0$ (1.4)

I.3 - METHODES DE RESOLUTION DES PROBLEMES D'INFILTRATION :

IL existe plusieurs méthodes de résolution des problèmes d'infiltration que l'on peut subdiviser essentiellement en quatre groupes :

1. Méthode Empirique : basée sur des hypothèses de base donnant ainsi des résultats approximatifs; Utilisées souvent pour le prédimensionnement des contours souterrains des ouvrages hydrotechniques.
2. Méthode Expérimentale : pour ce type de méthode on a recours souvent à l'analogie électrique. Ce procédé est très recommandé et permet de résoudre des problèmes plans et tridimensionnels des infiltrations sous les ouvrages hydrotechniques.
3. Méthode Graphique : basée sur la construction du réseau hydrodynamique de l'écoulement souterrain (c'est le profil cinématique du mouvement). Présenté par deux systèmes deux lignes :
 - * lignes équipotentiels : lignes d'égal charge " H " = cst
 - * lignes de courants : lignes des trajectoires des particules liquide dans la zone d'infiltration.
4. Méthode Théorique : basée sur la résolution de l'équation de Laplace en utilisant les méthodes numériques de résolution telles que : méthode des éléments finis et des différences finis. Pour cette dernière, on peut utiliser un logiciel tableur tels que les logiciels Excel ou Lotus .

CHAPITRE II

DIMENSIONNEMENT PREALABLE DES ELEMENTS DU RADIER GENERAL

Le dimensionnement consiste à donner aux éléments de l'ouvrage des dimensions à préalables lesquelles doivent être confrontées aux résultats de calculs. Pour ce calcul il y a lieu de considérer ces hypothèses suivantes : nous devons tenir compte des hypothèses suivantes :

1. Le mouvement de l'écoulement souterrain est plan;
2. Le sol des fondations des ouvrages est homogène isotrope;
3. La charge d'eau "H" est constante et quasi permanente;
4. le coefficient de perméabilité et la porosité sont constantes;
5. la température de l'eau est constante;

II.1- DETRMINATION PREALABLE DES DIMENSIONS DU RADIER GENERAL :

II.1.1 - Avant Radier : IL a pour rôle la protection du lit au devant de l'ouvrage hydrotechnique contre les affouillements. C'est un dispositif qui lie le lit de la rivière ou d'un canal à l'ouvrage hydrotechnique.

Construit souvent en matériaux étanches tels que : l'argile, béton d'argile, béton armé, géomembrane, bois etc. En conformité de sa perméabilité l'avant radier allonge la voie de l'écoulement souterrain sous l'ouvrage. Celui ci dissipe l'énergie de l'écoulement sous la charge constante H réduisant ainsi la vitesse de filtration (figure n°1 & 2).

- La longueur préalable de l'avant radier est fixé suivant la destination de l'ouvrage :

| Type d'Ouvrage | Longueur de l'Avant Radier " l_{ar} " en (m) |
|---|--|
| * Ouvrage de vidange et de régulation de retenue d'eau. | $(0 - 2) H_1$ |
| * Ouvrage de raccordement | $(2 - 3) H_1$ |
| * Evacuateur de dégravoiment | $(1 - 4) H_1$ |
| * Barrage déversoir " | $(0 - 2) H_1$ |

H_1 : étant la charge d'eau au bief amont.

- Détermination des épaisseurs : on fixe l'épaisseur minimale qui dépend de la charge du bief amont

$$\text{Pour } \begin{cases} H_1 \leq 5 \text{ m} & \Rightarrow t_{a,r1} = (0,4 - 0,5) \text{ m} ; \\ 5 \leq H_1 \leq 10 \text{ m} & \Rightarrow t_{a,r1} = (0,5 - 0,6) \text{ m} ; \\ H_1 \geq 10 \text{ m} & \Rightarrow t_{a,r1} = 0,75 \text{ m} . \end{cases}$$

Pour les grands ouvrages on l'augmente jusqu'à $(1 - 2) \text{ m}$.

- L'épaisseur maximale $t_{a,r2}$ au bout de l'avant radier est déterminé par l'expression empirique:

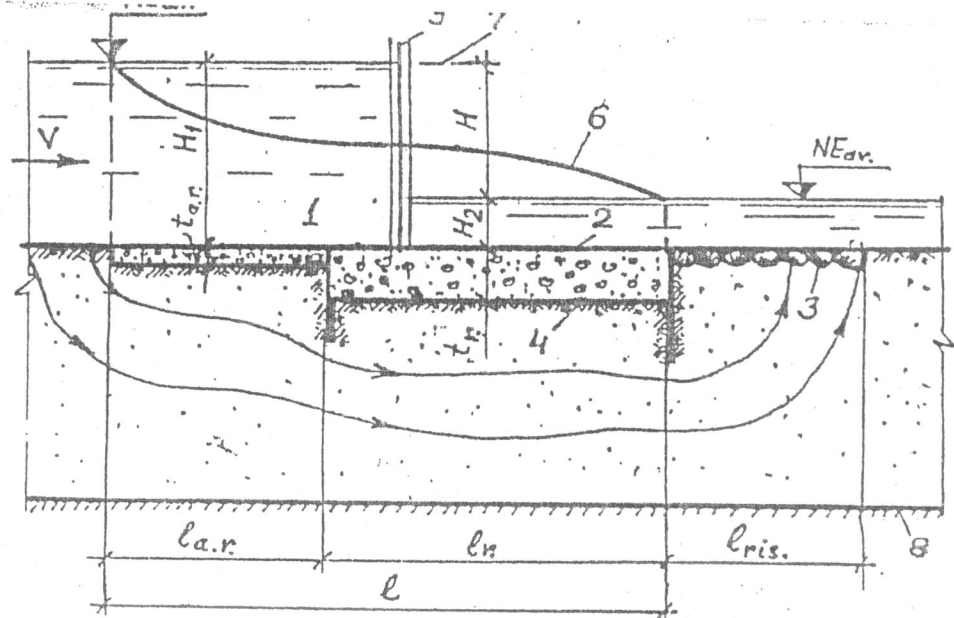


Figure n°1: Ecoulement souterrain en charge

1- avant-radier; 2- radier; 3- risberme; 4- pied du radier; 5- vanne; 6- courbe de la pression de filtration sur le pied du radier; 7- ligne d'énergie; 8- couche imperméable.

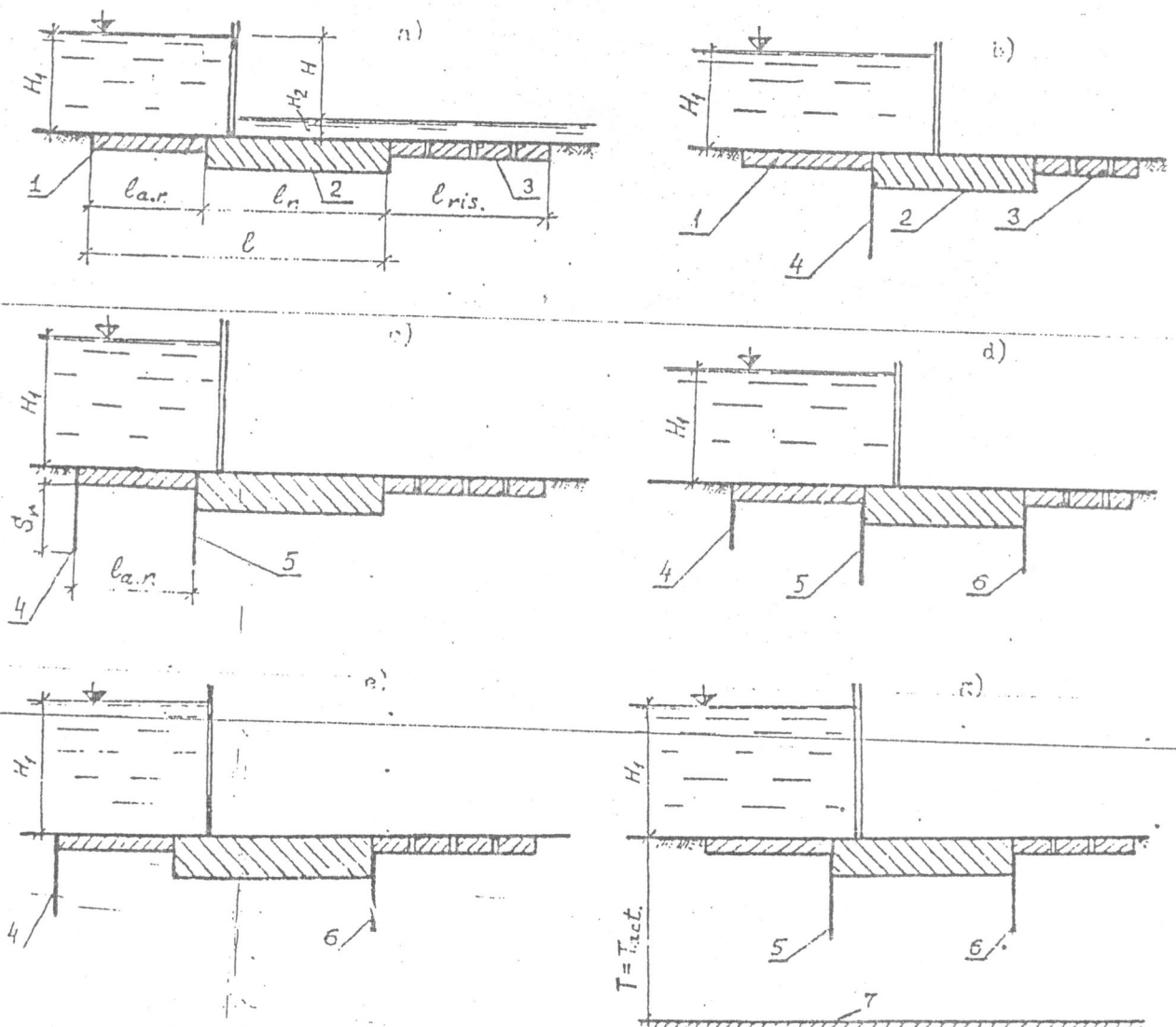


Figure n°2 : Schémas des radiers des ouvrages hydrotechniques

$$t_{a,r2} = 0,75 + 0,05 H_1$$

(II.1)

Dans le cas du radier en limon, l'épaisseur si l'avant radier est en limon, il peut être augmentée de 20 à 30% par rapport à celui de l'argile. Ainsi pour des grandes vitesses on renforce l'avant radier, par des dalles en béton armé ou en béton, installées sur des couches de sables et de gravier.

II.1.2 - Radier :

C'est un ouvrage destiné à :

- Créer des conditions de sécurité pour le passage et la chute d'eau du bief amont au bief aval .
 - Assurer les chocs dus aux coups de l'eau tombée lors du déversement (barrage déversoir)
 - Dissiper la charge de l'énergie du cours d'eau .
 - Dissiper la charge de l'écoulement souterrain .
- La longueur du radier est fixée suivants les calculs hydrauliques ainsi que des conditions de la disposition équipements hydromécaniques (vannes élévatrices, ponts, passerelles, etc.....)

*Pour les ouvrages de vidanges, régulateurs, les ouvrages de retenues:

$$l_r = (2 - 4) H_1 \quad (II.2)$$

* Pour les barrages - déversoirs et les évacuateurs de dégravoiment : $l_r = (3 - 5) H_1$

L'épaisseur du radier est déterminée par le calcul de filtration préalablement on peut la fixer (figure n° 3) :

$$\text{Au début : } t_{r1} = (0,25 - 0,30) H_1 \quad ; \quad m$$

$$\text{Au bout : } t_{r2} = (0,13 - 0,15) H_1 \quad ; \quad m$$

Dans la plus part des cas, l'épaisseur amont et la largeur amont de la prafouille sont fixés par le poids du matériel hydraulique, des ponts, des vannes et des mécanismes élévateurs.

II.1.3- Parafouilles et Palplanches : Ce sont des dispositifs qui permettent de contrôler l'écoulement souterrain en réduisant le gradient hydraulique moyen. Selon P.FILTCHAKOV la profondeur du rideau des palplanches et de parafouilles doit être égale à :

$$S_p = (0,02 - 0,05) l \quad ; \quad m \quad (II.3)$$

S_p : profondeur de la parafouille ou rideaux de palplanches

l : est la projection horizontale des parties imperméables du radier.

Pour le cas des rideaux de palplanches, la profondeur du battage peut atteindre les 20 à 30 mètres et parfois plus, pour des ouvrages conçus en béton, béton armé ou en métal. Leur profondeur minimum doit être égale à deux mètres. La distance entre les rideaux de palplanches d'avant radier et le rideau de palplanche amont est fixée égale ou supérieure à leur double profondeur S_r , c'est à dire que :

$$l_{ar} \geq 2 S_r \quad (II-4)$$

II.1.4- Risberme

La longueur de la risberme l_{ris} est fixée selon un calcul hydraulique, mais elle doit être supérieure ou égale $(3 - 5) H_1$ à l'épaisseur de la risberme $t_{ris} = (0,1 - 1) m$.

Pour des profondeurs infinies, on suppose que la filtration s'étend presque à la profondeur et aux côtés de l'ouvrage. C'est pourquoi on adopte la notion de la zone active dont la longueur T_{act} est égale à :

$$T_{act} = K_{act} * (l_{ar} + l_r) \quad (11.5)$$

où :

K_{act} : Coefficient qui dépend de la profondeur de la palplanche ; $0.50 \leq K_{act} \leq 1.25$.

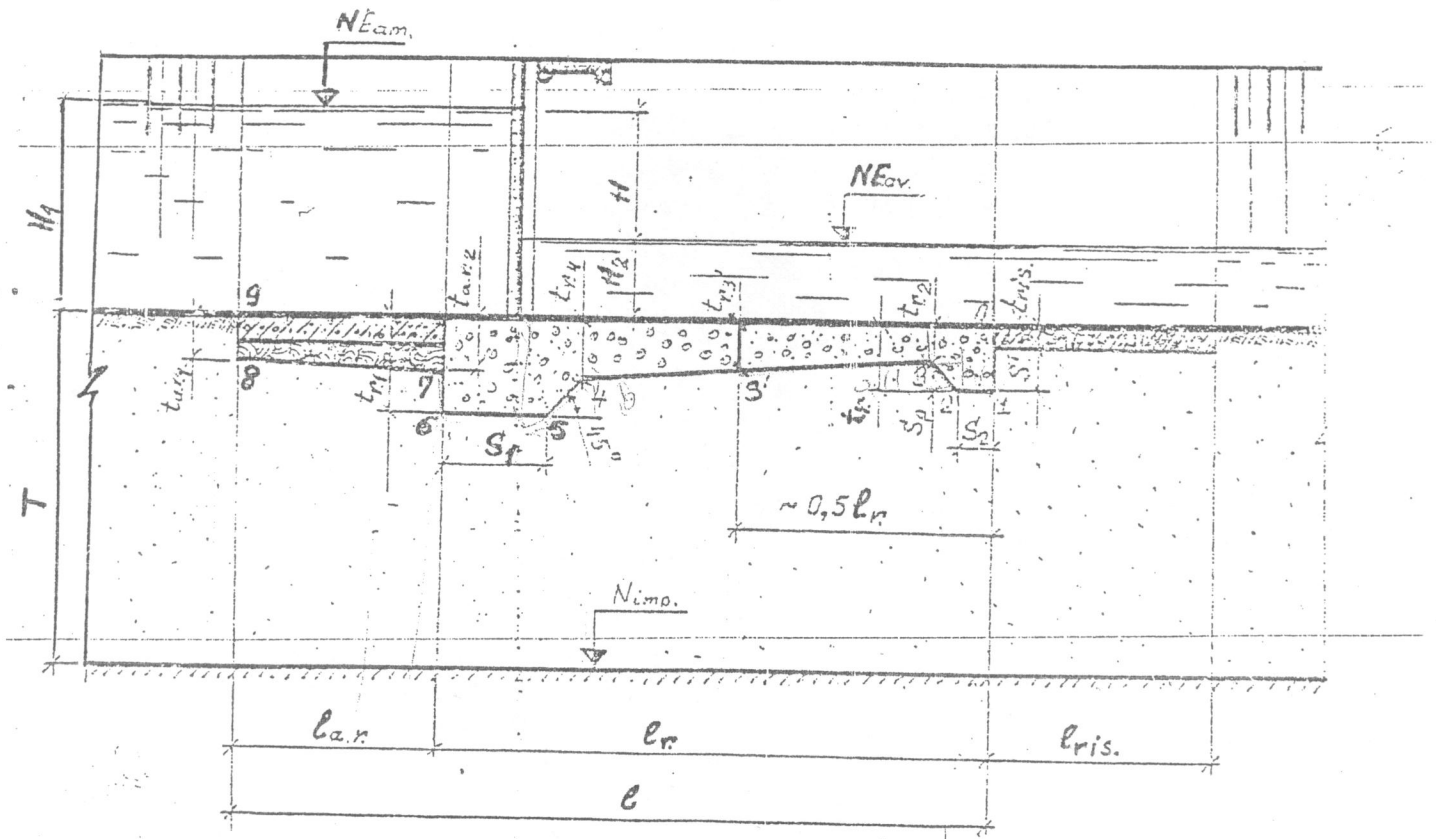


Figure n° 3 : Coupe longitudinale d'un ouvrage régulateur

CHAPITRE III

METHODES APPROXIMATIVES DU CALCUL D'INFILTRATION

III.- OBJECTIF : La résolution du problème de l'infiltration consiste à déterminer les paramètres de résolution suivants :

- * Détermination de l'épure des sous pressions de filtration le long du contour souterrain;
- * Calcul des gradients moyen et maximal de sortie ;
- * Calcul du débit d'infiltration;

III.1- METHODE DU CONTOUR LINEAIRE DITE « Méthode de BLIGH ».

III.1.1 - Détermination de l'Epaisseur du Radier

Cette méthode est utilisée souvent, pour le prédimensionnement des éléments du contour souterrain et permet la détermination de l'épure des sous pressions sous les éléments horizontaux (Radier général).

Tout d'abord, on désigne tous les points angulaires en commençant à numéroter à partir du bout aval qui "0" jusqu'au début de l'avant radier point "9" puis on calcule la longueur réelle déployée comme étant la somme des fragments numérotés au par avant noté L_r .

Selon Bligh la longueur nécessaire du contour souterrain pour laquelle il n'y a pas avoir lieu d'infiltration dans sol de fondation doit correspondre à :

$$L_{c,d} = C * H \quad (III-1)$$

où :

C: Coefficient de proportionnalité qui dépend de la granulométrie et la nature du sol de fondation ;
H : Charge hydraulique;

Tableau n° 1 : Différentes valeurs du coefficient " C »

| DENOMINATION DU SOL | C | DENOMINATION DU SOL | C |
|---------------------|-----|---------------------------------|-----------|
| Sols limoneux | 8,0 | Sols graveleux | 3,5 |
| Sables fins | 6,0 | Tourbe décomposé | 8,0 |
| Sables moyens | 5,0 | Tourbe nature | 5 |
| Sables grossiers | 4,0 | Sols loessiques | 4,0 - 3,5 |
| Galets | 3,0 | Sables argileux, limon argileux | 3,5 - 3,0 |

Etant donné que la chute de sous pression est linéaire de H à 0, le long du contour souterrain ; le calcul des sous pressions aux points caractéristiques le long du radier peuvent être exprimés par :

$$h_x = \frac{H}{L_r} l_x \quad (III-2)$$

ou :

h_x : sous pression au point considéré;

l_x : distance du point considéré par rapport à l'extrémité de l'avant radier.
L'épaisseur du radier est déterminée par l'expression suivante :

$$t_x = n \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_b - \gamma_w} \right) h_x \quad (I \dots)$$

n : coefficient de sécurité varie entre (0,85 à 1,25) selon la classe de l'ouvrage.
 γ_w : poids spécifique de l'eau 1000 Kgf/m³
 γ_b : poids spécifique du béton 2400 Kgf/m³

III.1.2 - Gradient Hydraulique Moyen:

$$I_{\text{moy}} = \frac{\Delta H}{L} \leq I_{\text{adm}} \quad (III-5)$$

où
 ΔH : différence de charge entre bief amont et aval $H_1 - H_2$
 L : longueur du contour souterrain
 I_{adm} : gradient admissible.

III.1.3- Gradient Hydraulique Maximal à la Sortie:

$$(I_{\text{max}})^{\text{Sor}} = \frac{h_{\text{Sor2}}}{l_{\text{Sor}}} \quad (III-6)$$

Nous devons aussi contrôler le gradient max à la sortie par rapport au gradient admissible.

III.1.4 - Débit d'Infiltration:

Le débit d'infiltration totale est donné par $Q = q \cdot B$; m³/s
où :

$$q = K \cdot I_{\text{moy}} \cdot T \quad ; \text{ m}^3/\text{s.m} \quad (III-7)$$

q : débit spécifique
 K : coefficient de perméabilité en m/s;
 I_{moy} : gradient hydraulique moyen;
 T : profondeur du substratum en m;
 B : largeur de l'ouvrage en m;

III.2- METHODE DES COEFFICIENTS DE RESISTANCE DE TCHOUGAEV C-301

Dans cette méthode on considère l'écoulement souterrain similaire à un écoulement dans une conduite en charge, où on tiendra compte des pertes de charges singulières et linéaires le long du contour souterrain. Celles-ci, sont déterminées par les coefficients de résistance du sol ; On introduisant la notion de profondeur de calcul du substratum qui dépend de la profondeur active qui fonction du rapport des projections horizontale et verticale du contour du radier générale.

La profondeur active substratum est fonction du rapport $T'_{ac} = f\left(\frac{l_0}{s_0}\right)$ (voir tableau n°2).

où:

l_0 : projection horizontale du contour souterrain;

s_0 : projection verticale du contour souterrain ;

Tableau n°2 : Différentes valeurs de $T'_{ac} = f\left(\frac{l_0}{s_0}\right)$

| $\frac{l_0}{s_0}$ | > 5 | $5 < \frac{l_0}{s_0} \leq 3,4$ | $3,4 < \frac{l_0}{s_0} \leq 1$ | $\frac{l_0}{s_0} < 1$ |
|-------------------|-----------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| T'_{ac} | $0,5 l_0$ | $2,5 l_0$ | $0,8 S_0 + 0,5 l_0$ | $S_0 + 0,3 l_0$ |

Notons que :

$$T''_{ac} = 2 T'_{ac} \quad \text{et} \quad T''' = T_r$$

III.2.1- Pertes de charges :

$$h_i = \left(\frac{H}{\sum \xi'_i} \right) \xi'_{ip} \quad (\text{III-6})$$

ξ'_{ip} : valeur du coefficient de résistance au point considéré;

h_i : perte de charge , en m .

III.2.2 - Gradient de contrôle:

Le contrôle de la résistance générale des fondations à l'infiltration doit satisfaire la condition suivante :

$$I_{cont} \leq I_{adm}$$

$$I_{cont} = \left(\frac{H}{\sum \xi'_i T'_c} \right) \quad (\text{III-7})$$

I_{adm} : gradient admissible fonction de la classe de l'ouvrage et du sol de fondation

I_{cont} : gradient de contrôle.

III.2.3 - Gradient Maximal à la Sortie:

Selon V.NOUMEROV et pour un radier sans palplanche, le gradient max à la sortie est de la forme :

$$(I_{max})^s = \frac{H}{\alpha (T'_1 \sum \xi'_i)} \quad \text{avec} \quad \alpha = \text{Erreur !}; \quad S = 0 \quad (\text{III-8})$$

$(I_{max})^s > (0,5 - 0,7)$ le sol de fondation à la sortie doit être contrôlé à l'érosion interne.

III.2.4 -Débit d'infiltration :

$$q = \left(\frac{H}{\sum \xi'_i} \right) K \quad (\text{III-9})$$

le débit total est :

$$Q = q . B \quad (\text{III-10})$$

III.3- METHODE DU CONTOUR ALLONGE « BLIGH- TCHOUGAEV »

Cette méthode permet de construire l'épure des sous pressions pour chaque fragment du contour souterrain. La sous pression est déterminée selon la profondeur T'_c en utilisant la notion de la longueur virtuelle (figure n°4), déterminée par :

$$L_{vir} = L_{r.c.d} + 2 \times 0,44 T'_c \quad (\text{III-11})$$

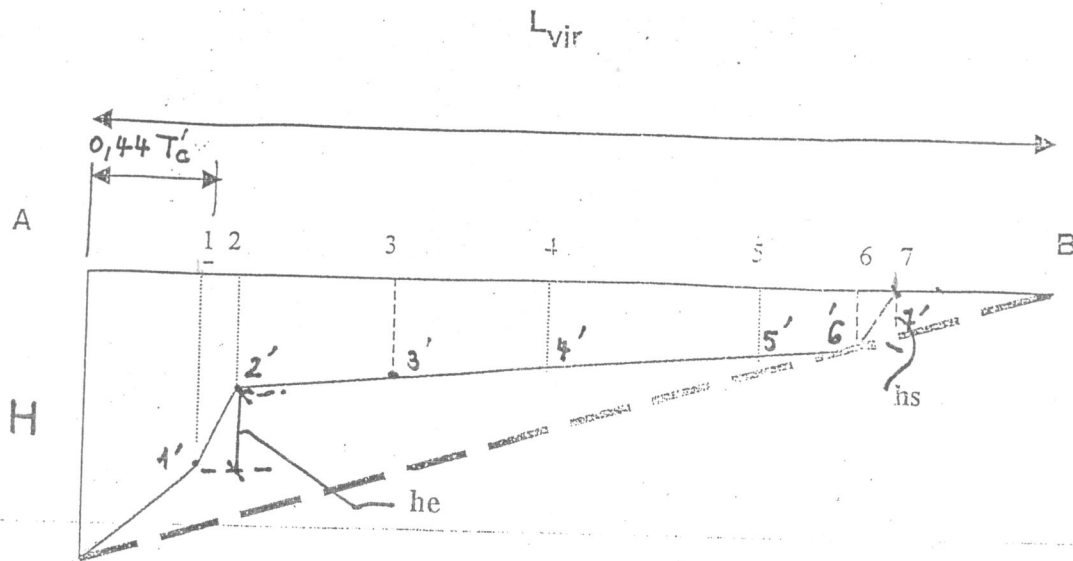


Figure n° 4 : Epure des sous pressions

III.3.1- Pertes de Charges :

Pertes de charges à l'entrée :

$$h_e = \frac{2 \lambda_e}{\lambda_e + \lambda_s + L_d} \quad (\text{III-12})$$

Pertes de charges à la sortie :

$$h_s = \frac{2 \lambda_s}{\lambda_e + \lambda_s + L_d} \quad (\text{III-13})$$

où

$$\lambda_e = \lambda_o + I_e = 0,44 T'_c + I_e \quad \text{et} \quad \lambda_s = \lambda_o + I_s = 0,44 T'_c + I_s$$

Les sous pressions sont déterminées par l'expression :

$$h_x = \frac{H}{L_{vir}} I_x \quad \text{avec} \quad I_x = x + 0,44 T'_{moy} \quad (\text{III-14})$$

III.3.1 - Gradient Hydraulique Moyen :

$$I_c = \frac{H}{L_{rcd} + 0,88 T'_c} = \frac{H}{L_{vir}} \quad (\text{III-15})$$

III.3- DETERMINATION DES PARAMETRES DE L'INFILTRATION PAR LE PROCÉDE GRAPHIQUE :

III.3.1- Méthodologie

La construction du réseau hydrodynamique s'avère, parmi les méthodes les plus faciles et pratiques a déterminé les paramètres de l'écoulement souterrain. Ce procédé graphique est fondé sur le principe du tracé du réseau, en le divisant figures géométriques (carrés curvilignes).

Les éléments constituant le réseau d'écoulement souterrain sont :

* Les lignes qui partent du contour souterrain de l'ouvrage à la couche imperméable s'appellent **lignes de d'égale pression "isobare"**. Les niveaux disposés sur ces lignes se trouvent sur la même altitude.

* Les lignes qui partent de la surface du fond du bief amont au fond du bief aval s'appellent **lignes de courant de l'écoulement souterrain**.

* La bande entre deux lignes de courants voisins s'appelle **bande de débit**.

* La bande entre deux lignes de pression égale (ligne d'équipotentielle) s'appelle **bande de pression (bande de charge)**.

IL y a lieu à noter que le contour souterrain de l'ouvrage est la première ligne de courant et le toit du substratum constitue la dernière ligne de courant. On dessine le contour du radier général (figure n°5) suivant une échelle adéquate suivant les dimensions déterminées précédemment par la méthode de BLIGH.

En construisant le réseau de l'écoulement on doit utiliser les conditions d'orthogonalité, pour les lignes de courant et équipotentielle. Ainsi que la propriété de conservation du module des mailles et la forme des mailles, c'est à dire réaliser des carrés curvilignes.

Généralement on fixe trois ou quatre bandes de débit, puis on choisit le point près du milieu du radier et on trace une ligne de ce point qui s'approche de la ligne verticale et inclinée vers le bief aval. Puis on divise cette ligne de pression en nombre de bandes de débit. Pour obtenir par la suite des carrés curvilignes (mailles) définissant ainsi le réseau hydrodynamique.

Ces mailles ont la forme de carrés rectilignes près du radier général et deviennent carrés curvilignes en s'éloignant du radier général. Notons que les lignes moyennes des carrés doivent être égales ($\Delta H = \Delta S$)

III.3.2- Calcul des Paramètres de l'Écoulement Souterrain

☞ Le rapport entre la quantité des bandes de débits N_d et le nombre des bandes de pression N_p s'appelle module du réseau, c'est à dire :

$$M = \frac{N_d}{N_p} \quad (III-16)$$

☞ La perte de charge (pression) dans chaque bande de pression est :

$$\Delta H = \left(\frac{1}{N_p} \right) H \quad (III-17)$$

☞ La pression à n'importe quel point, de la zone de filtration est égale à :

$$h_x = n_p * \Delta H = n_p \left(\frac{1}{N_p} \right) H \quad (III-18)$$

n_p : étant le nombre de bandes de pression y compter à partir du bief aval

☞ Le gradient moyen de l'écoulement à n'importe quelle maille est en conformité avec de la chute de pression entre les équipotentielles, égale à ΔH et la distance entre celles ci est Δl et on définit le gradient égale à :

$$J = \frac{\Delta H}{\Delta l} = \frac{H}{N_p \Delta l} \quad (III-19)$$

A travers l'expression (III-19) on constate que la variation du gradient dans le réseau est strictement liée à la grandeur Δl .

☞ La vitesse d'infiltration est déterminée selon la loi de DARCY :

$$V_f = K_f J = K_f \frac{H}{N_p \Delta l} \quad (III-20)$$

Le débit d'infiltration est évalué pour une bande de débit pour un mètre du courant de la largeur de l'ouvrage (perpendiculairement au profil longitudinal de l'ouvrage), s'appelle débit spécifique par l'expression suivante:

$$\Delta q = V_x \Delta \omega = K_f \frac{H \Delta S}{N_p \Delta l} = \frac{H}{N_p} \quad (III-21)$$

où :

$\Delta \omega$: étant l'aire de la section transversale de l'écoulement souterrain d'un carré, correspondant au produit de la distance entre les lignes voisines de courant de l'écoulement souterrain, $\Delta \omega = \Delta S \times l$.

En conformité du nombre de bandes, le débit de filtration par unité de la largeur est défini par la formule.

$$q = \sum_{i=1}^{N_d} \Delta q = K_f H \frac{N_d}{N_p} \quad (III-22)$$

Le débit d'infiltration total provoqué par l'écoulement souterrain est donné par :

$$Q = q B = K_f H \frac{N_d}{N_p} B \quad (III-23)$$

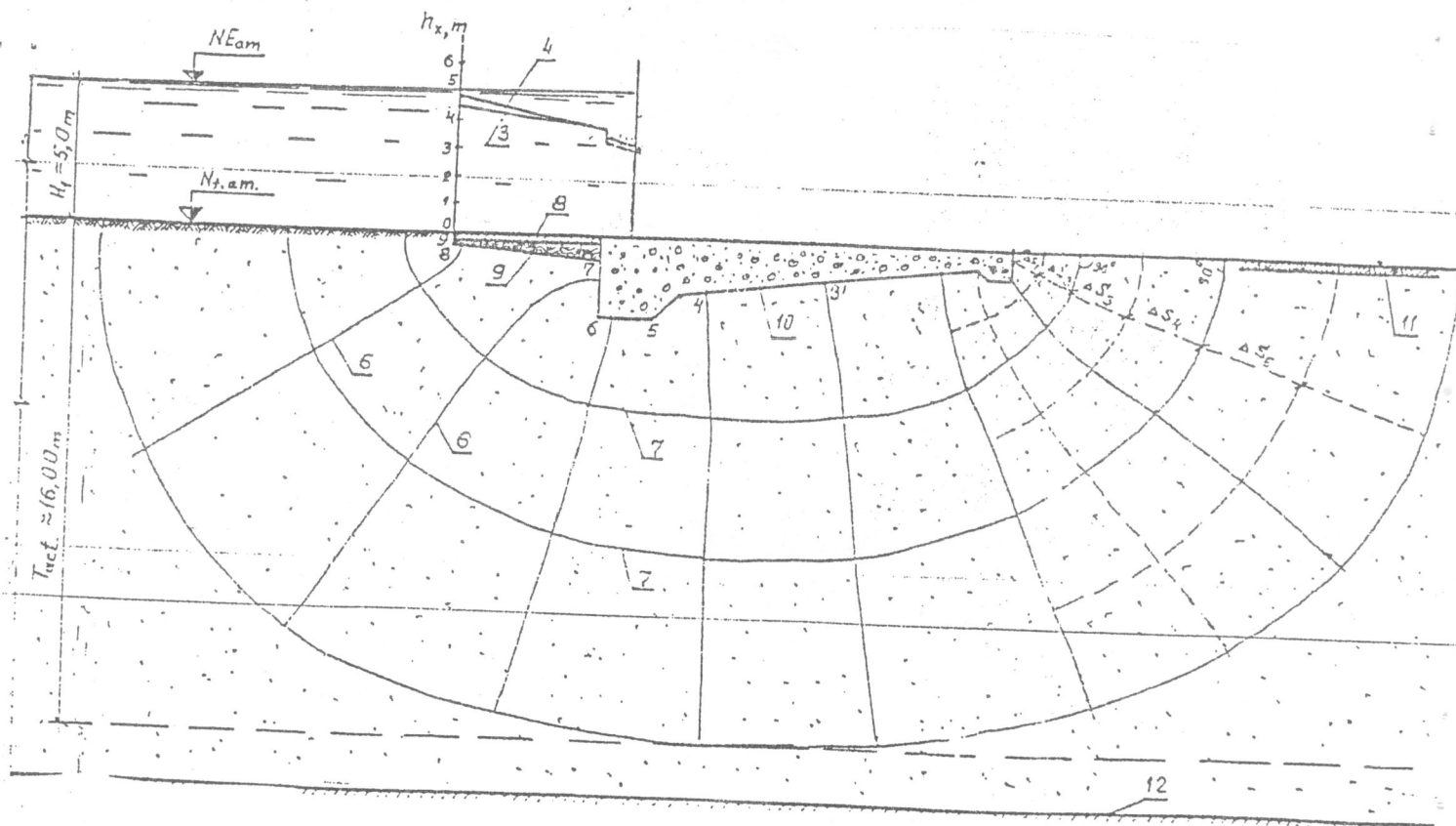


Figure 5 : Réseau hydrodynamique par la méthode graphique

CHAPITRE IV

CALCUL DE DEFORMATION DES FONDATIONS D'OUVRAGES HYDROTECHNIQUES SOUS L'EFFET DES INFILTRATIONS

GENERALITES :

L'écoulement souterrain sous l'ouvrage peut être siège des déformations sous l'assise d'ouvrages hydrotechniques telles que :

- * l'érosion mécanique ;
- * l'érosion interne ;
- * le soulèvement hydraulique;
- * l'exfoliation (l'érosion de contact);
- * l'affouillement de contact.

IV.1- EROSION MECANIQUE :

L'érosion mécanique interne est dite aussi, renard mécanique; C'est l'entraînement de petites particules des sols à granulométrie hétérogène non cohérente par l'écoulement souterrain en cas où son gradient d'écoulement I est supérieure au gradient critique $(I_{er})^{cr}$, qui dépend du coefficient d'homogénéité (uniformité) [1].

| Coefficient d'Homogénéité η | Gradient Admissible I_{adm} |
|-------------------------------------|----------------------------------|
| $\eta \leq 10$ | 0,30 - 0,40 |
| $10 \leq \eta \leq 20$ | 0,20 |
| $\eta > 20$ | $\leq 0,10$ |

où :

$\eta = \frac{d_{60}}{d_{10}}$: Coefficient d'homogénéité

d_{60} : diamètre des particules, inférieures aux quelles forment respectivement 60 % de la masse de ce sol;

d_{10} : diamètre des particules, inférieures aux quelles forment respectivement 10 % de la masse de ce sol;

$(I_{er})^{adm}$: gradient admissible de l'écoulement souterrain;

I : gradient moyen de l'écoulement souterrain;

IV.2- SOULEVEMENT HYDRAULIQUE

Le soulèvement hydraulique c'est l'affouillement sol au contact de deux couches ayant des composantes granulométriques différentes. (Cas d'un sol cohérent avec un sol non cohérent) . Cet affouillement est provoqué par l'écoulement souterrain avec un gradient égal ou supérieur au gradient critique $(I_{sh})^{cr}$ [1]. Ce gradient est déterminé par :

$$(I_{sh})^{cr} = \frac{\gamma_h}{\gamma_w} - (1 - n) \quad (IV-1)$$

où :

γ_h : poids volumique du sol humide en (Kgf/m^3) ;

γ_w : poids volumique de l'eau en (Kgf/m^3) ;

n : porosité du sol;

Pour des sables fins dont le diamètre médian des particules d_{50} varie de (0,07 - 0,2) le gradient critique doit être déterminé par :

$$(I_{sh})^{cr} = \alpha * \left[\frac{\gamma_h}{\gamma_w} - (1 - n) \right] \quad v \quad (IV-2)$$

où :

α : coefficient de correction, $0,90 \leq \alpha \leq 0,95$.

Mais pour le calcul on doit comparer en utilisant le gradient admissible, qui est égale à :

$$(I_{sh})^{adm} = \frac{(I_{sh})^{cr}}{n_{sh}} \quad (IV-3)$$

n_{sh} : étant le coefficient de sécurité dépendant de la résistance au feu et de la durabilité de l'ouvrage, il varie (1,2 - 1,5). La condition du nom soulèvement dans ce cas doit satisfaire la condition suivante :

$$(I_m)^{sh} \leq (I_{sh})^{adm} \quad (IV-4)$$

$(I_m)^{sh}$: étant le gradient moyen de l'écoulement souterrain sur la voie verticale d'infiltration), souvent il est exprimé par :

$$(I_m)^{sh} = \frac{h'_p}{S'} \quad (IV-5)$$

où :

h'_p : étant la sous pression d'infiltration à la pointe du rideau de la palplanche ou le mur parafeuille;

S' : étant la profondeur du rideau de palplanche ou de la parafeuille;

Dans le cas où le gradient moyen d'écoulement est supérieur au gradient admissible, on doit conforter les fondations aval de l'ouvrage par des pierres afin d'augmenter la longueur S' . L'épaisseur totale sera déterminée par :

$$t = S' [(I_m)^{sh} - (I_{sh})^{adm}] * \frac{\gamma}{\gamma_{Rech}} * n^{sh} \quad (IV-6)$$

γ_{Rech} : poids volumique de la recharge aval ;

t : épaisseur aval de protection.

IV.3- EXFOLIATION :

C'est la séparation des sols cohérents et non cohérents; Pour les sols non cohérents on détermine le gradient d'après le graphique (figure n°7,a). Le graphe donne les différentes plages d'évaluation de l'exfoliation en du coefficient d'homogénéité η , partant des corrélations en abscisses de :

Erreur ! et du gradient admissible en ordonnées.

γ' : étant le poids volumique du sol saturé (immergé dans l'eau)

$tg\phi$: étant l'angle de frottement interne du sol avec d_{50} .

Pour des sols cohérents quand il y a un filtre inversé ou bien des recharges placées à l'aval ; On se réfère au graphe donné par la figure n°7,b . Où le coefficient d'homogénéité η est donné en fonction du diamètre médian du sol D_{50}^I .

Pour un gradient inférieur ou égal à 3,à, le coefficient de saturation en eau sera supérieur ou égal à 0,95 et la dimension minimum des pores du sol plus gros $D_{min} \leq 3$ mm.

IV.4- AFFOUILLEMENT DE CONTACT

Il ressemble dans son métabolisme le soulèvement de contact, le calcul du gradient doit se faire en considérant la condition suivante :

$$(I) = \frac{(I_{a.f.c})^{cr}}{n_{a.f.c}} \quad (IV-7)$$

où :

$n_{a.f.c}$: coefficient de sécurité pour l'affouillement de contact.

I : gradient de l'écoulement souterrain à la sortie du bief aval;

$I_{a.f.c}$: gradient critique à l'affouillement;

- Dans le cas des sols non cohérents : pour un rapport $\frac{D_{10}}{d_{10} \operatorname{tg} \varphi} \leq 10$, le gradient admissible d'après le contact des couches voisines est supérieur à 3

- Quand le $\frac{D_{10}}{d_{10} \operatorname{tg} \varphi} > 10$, le gradient admissible est réduit aux valeurs de (0,10 - 0,02).

Généralement, on considère un sol non affouillable si :

$$0,77 d_{\text{omax}} < d_{\text{min}} \quad (IV-8)$$

où :

d_{omax} : diamètre maximum des pores dans le sol de la zone de filtration ;

d_{min} : diamètre minimum des particules du sol ;

$$d_{\text{omax}} = 0,445 \sqrt[6]{\eta} (1 + 0,05) \frac{\eta}{1 - \eta} d_{17} \quad (IV-9)$$

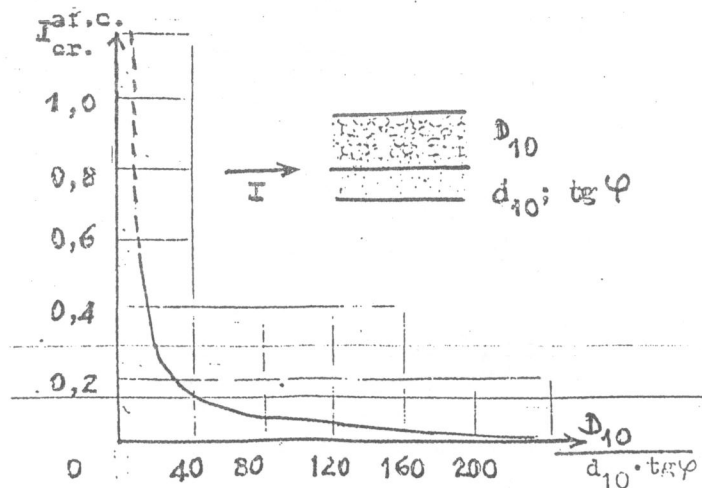


Figure n° 6 : Courbe représentative du gradient d'affouillement critique

En fonction du rapport $\frac{D_{10}}{d_{10} \operatorname{tg} \varphi}$

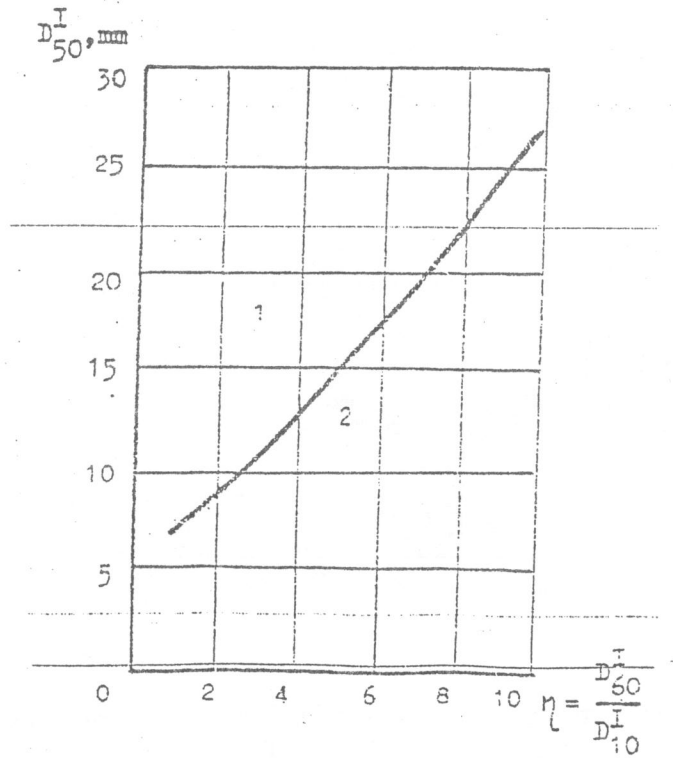
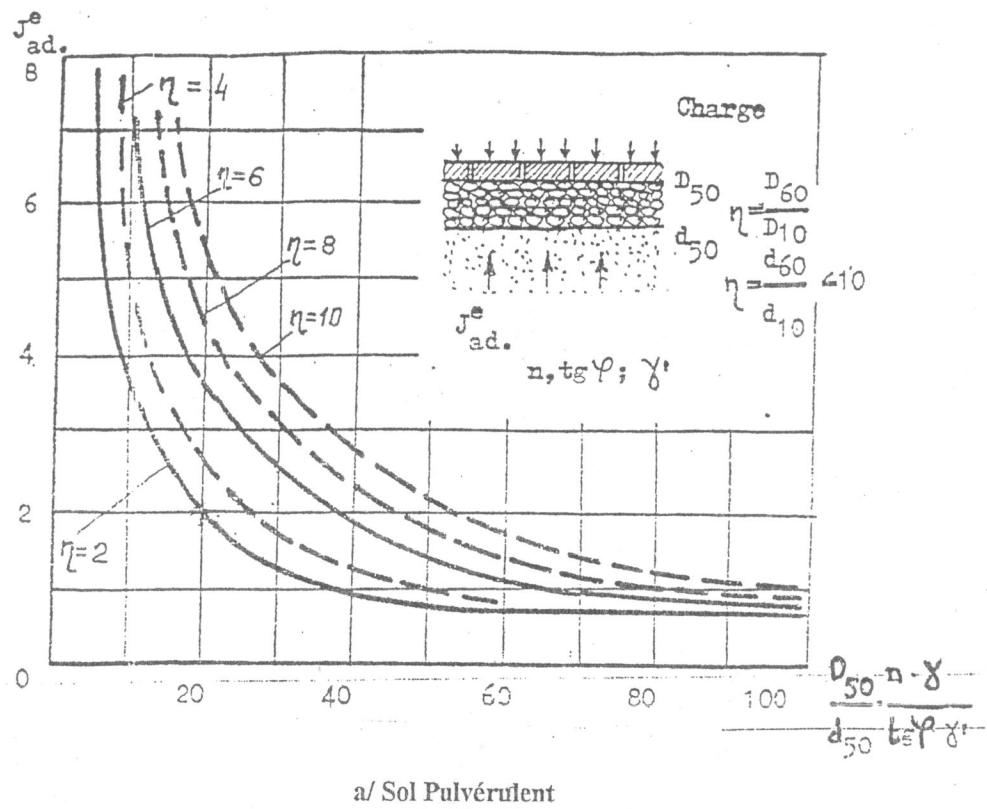


Figure n° 7 : Evaluation des conditions d'exfoliations (soulèvement de contact)

CHAPITRE V

APPLICATIONS

Pour faciliter l'application du calcul d'infiltration par les méthodes abordées précédemment, nous allons traiter un exemple numérique (figure n°8).

DONNEES DE DEPART :

- Charge au bief amont " H_1 " : 5,00 m
- Charge au bief aval " H_2 " : 0,00 m
- Largeur de l'ouvrage hydraulique " B " : 16,00 m
- Profondeur du substratum (couche imperméable) : ∞
- Coefficient de sécurité " n_1 " : 1,0
- Caractéristiques des fondations :
 - Coefficient de perméabilité " K " : 12 m/j
 - Poids volumique du sol " γ " : 1900 Kg/m³
 - Coefficient d'uniformité " η " : 8,57 ($\eta < 10$)
 - Porosité " n " : 0,40

1 - DIMENSIONNEMENT PREALABLE DES ELEMENTS DU RADIER GENERAL :

1.1- Avant radier :

$$l_{ar} = 1 H_1 = 5,0 \text{ m}$$

$$ta.r_1 = 0,5 \text{ m}$$

$$ta.r_2 = 0,75 + 0,05 \cdot 5 = 1,0 \text{ m}$$

1.2- Radier :

$$l_r : 3 H_1 = 3 \cdot 5 = 15 \text{ m}$$

$$S_1 = 5,0 \text{ m}$$

$$tr_1 = 0,30 H_1 = 1,50 \text{ m}$$

$$tr_2 = 0,14 H_1 = 0,70 \text{ m}$$

$$tr_4 = tr_1 - 0,50 = 1,0 \text{ m}$$

$$S_2 = tr_2 = 0,70 \text{ m}$$

$$S_p = 0,02 (5,0 + 15,0) = 0,4 \text{ m}$$

1.3- Risberme

$$l_{ris} : 3 \cdot H_1 = 3,0 \cdot 5,0 = 15,0 \text{ m}$$

$$t_{ris} : 0,3 \text{ m}$$

2 - APPLICATION AU CALCUL D'INFILTRATION PAR LA METHODE DE BLIGH

Conformément à la méthode de BLIGH expliquée précédemment, nous allons déterminer la longueur réelle du contour déployé $L_{r,d}$, qui représente la somme des tronçons

du radier général " du point n°0 au point n° 9 ". La longueur déployée nécessaire du contour déployé $L_{c,d}$ pour laquelle l'ouvrage ne subira pas de déformation est :

$$L_{c,d} = C.H = 3,5 \cdot 5 = 17,50 \text{ m.}$$

$$L_{r,c,d} = \Sigma(h_v, h_H)_i = 1,10 + 0,70 + \frac{0,40}{\sin 45^\circ} + 8,40 + \frac{0,50}{\sin 45^\circ} + 5,00 + 0,50 + 5,80 + 0,50 = 22,50 \text{ m.}$$

d'où :

$$L_{r,c,d} > L_{c,d}$$

La condition de BLIGH est vérifiée d'où on doit calculer les sous pressions et l'épaisseur des éléments du radier . Les résultats de calcul des paramètres du radier seront résumés dans le tableau ci dessous.

| N° des points | l_x, m | h_x, m | $t_r^n; \text{m}$ | $t_r^p; \text{m}$ | $t_r^d; \text{m}$ |
|---------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1,10 | 0,24 | 0,17 | 1,10 | 0,90 |
| 2 | 1,80 | 0,40 | 0,29 | 1,10 | 0,90 |
| 3 | 2,36 | 0,50 | 0,37 | 0,70 | 0,50 |
| 3' | 8,60 | 1,92 | 1,37 | 0,90 | 1,50 |
| 4 | 10,76 | 2,39 | 1,71 | 1,00 | 1,80 |
| 5 | 11,47 | 2,54 | 1,82 | 1,50 | 1,90 |
| 5' | 14,47 | 3,22 | 2,30 | 1,50 | 1,90 |
| 6 | 16,47 | 3,66 | ----- | 1,50 | 1,90 |
| 7 | 16,97 | 3,77 | ----- | 1,00 | 1,00 |
| 8 | 22,05 | 4,90 | ----- | 0,50 | 0,50 |
| 9 | 22,50 | 5,00 | ----- | 0 | 0 |

où :

t_r^n : épaisseur du radier déterminé d'après la méthode de BLIGH;

t_r^p : épaisseur préalable du radier;

t_r^d : épaisseur définitive du radier;

Concernant les tronçons du contour du radier (6-7-8), où la charge d'eau est supérieure à la pression de filtration (sous pression). C'est pourquoi, les épaisseurs ne sont pas déterminées par la pression de filtration, dans ce cas les dimensions sont définies par des conditions constructives. Pour cela, il faut augmenter l'épaisseur du radier au point 3' jusqu'à 1,50 m, au point 4 jusqu'à 1,80 m; au point 5 jusqu'à 1,90 m et au point 5' jusqu'à 1,90 par mesures de construction.

2. APPLICATION DE LA METHODE DES COEFFICIENTS DE RESISTANCE " TCHOUGAEV "

* CALCUL DES SOUS PRESSIONS

En utilisant les mêmes données de départ , on calcul la profondeur active T'_{ac} .

$$T'_{ac} = f\left(\frac{l_0}{s_0}\right) \Rightarrow \frac{20}{1,50} = 13,33 > 5 \text{ d'où } T'_{ac} = 0,5 l_0 = 10,0 \text{ m ;}$$

calcul des épaisseurs moyens de l'avant radier et du radier (figure n°9)

$$(t_{\text{moy}})_{\text{ar}} = \frac{tr_1 + tr_2}{2} = \frac{1,50 + 0,75}{2} = 1,04 \text{ m.}$$

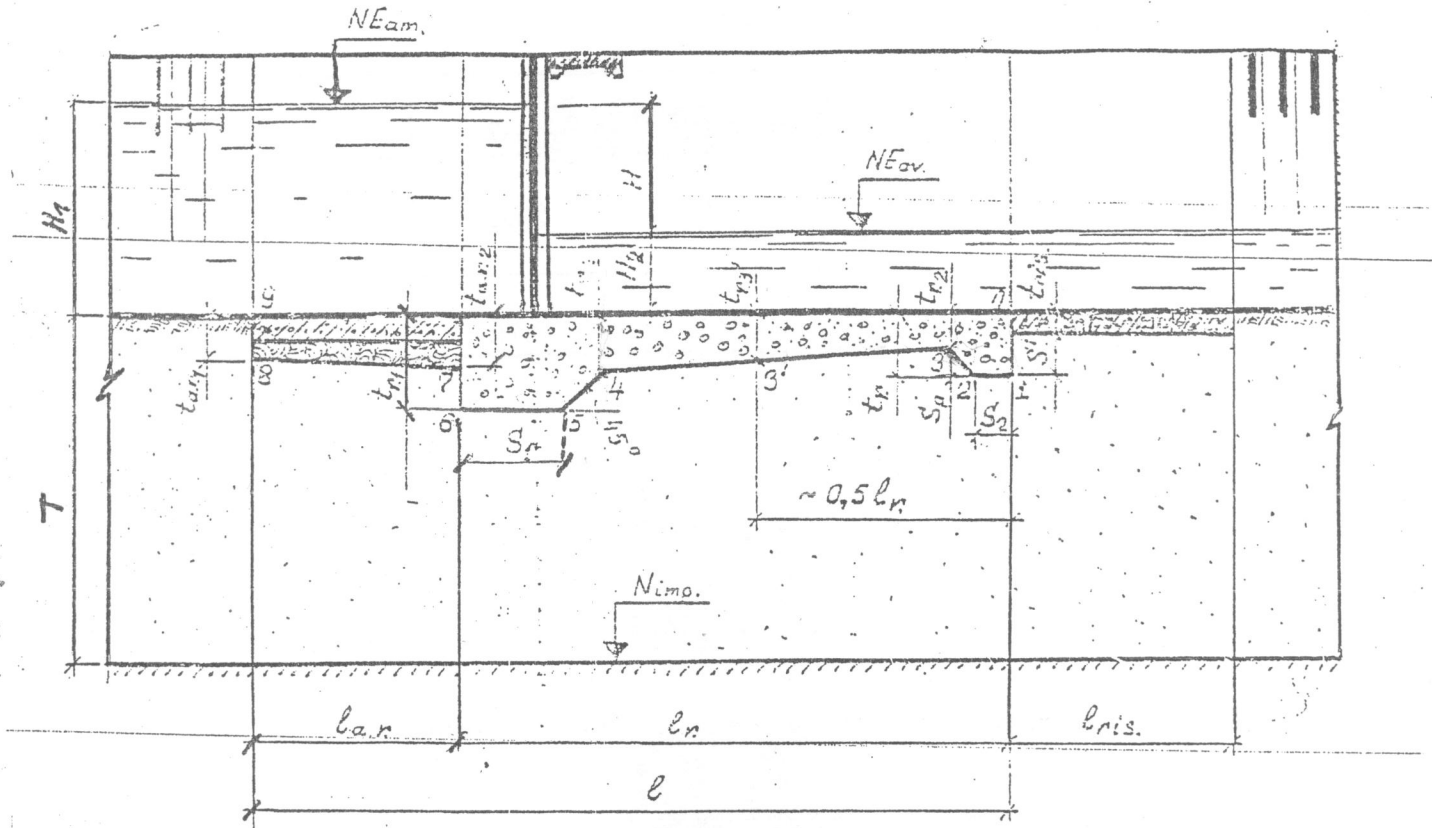


Figure n°8: Coupe longitudinale d'un ouvrage régulateur

C-301

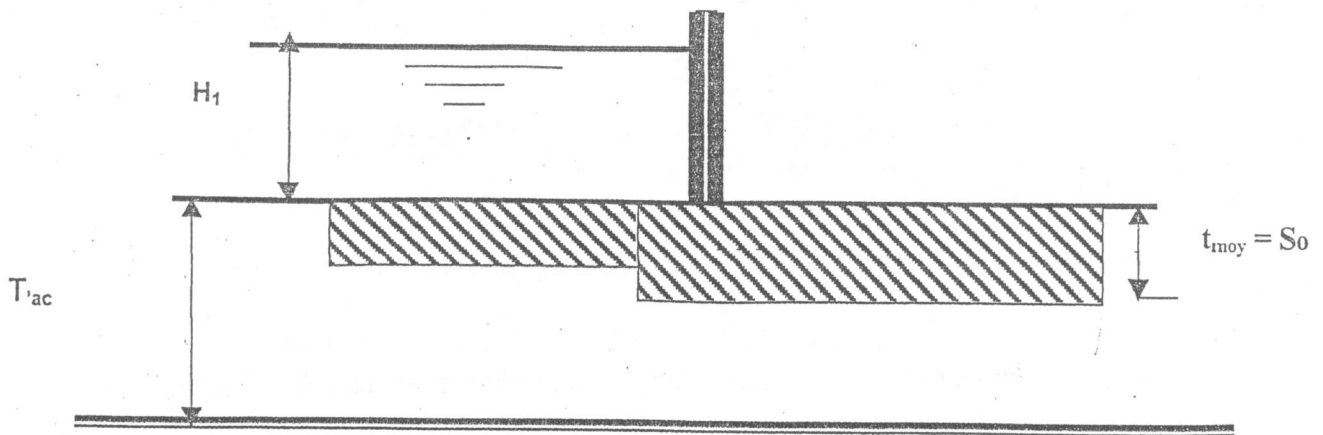


Figure n°9: Schéma équivalent

Calcul des coefficients de résistance, en faisant référencer à chaque fragment correspondant Voir les résultats dans le tableau ci-dessous, puis on doit calculer les pertes de charge pour chaque fragment afin de tracer la ligne piezométrique.

$$h_i = \frac{H}{\sum \xi_i'} \xi_i' \quad ; \text{ m}$$

Tableau n°3 : Calcul des coefficients de Résistance .

| | | | | | |
|-------------------|------|------|-------|------|------|
| $\xi = \xi'_{ip}$ | 0,52 | 0,54 | 0,026 | 1,67 | 0,54 |
| hi | 0,79 | 0,82 | 0,04 | 2,53 | 0,82 |
| ξ'_{ip} | 0,48 | 0,26 | 0,012 | 0,79 | 0,49 |

$$\sum \xi_i = 3,30 \quad \text{où} \quad \sum h_i = 5,00 \text{ m.}$$

☞ Pour un ouvrage de classe IV et une fondation en matériaux grossiers ; $I_{adm} = 0,48$. le gradient de contrôle sera égal à :

$$I_{cont} = \frac{H}{\sum \xi_i T_c} = \frac{5,00}{3,3 \times 10,0} = 0,15 < 0,48 \quad (\text{Absence d'une érosion mécanique}).$$

☞ Calcul du gradient à la sortie de l'ouvrage " gradient de sortie maximal " .

$$(I_{max})^s = \frac{H}{T_c \alpha \sum \xi_i} = \frac{5}{20 \times 0,36 \times 2,30} = 0,30 < I_{adm} = 0,48.$$

* CALCUL DU DEBIT D'INFILTRATION

$$\text{Le débit d'infiltration unitaire : } q = \frac{H}{\sum \xi_i^m} \times K = \frac{60}{3,50} = 17,14 \text{ m}^3/\text{J.ml.}$$

$$\text{Le débit total pour une largeur B , nous aurons : } Q = q \times B = 17,14 \times 16,00 = 274,3 \text{ m}^3/\text{j.}$$

$$Q = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s.}$$

3. APPLICATION DE LA METHODE DU CONTOUR ALLONGE " BLIGH-TCHOUGAEV.

Nous reprenons toujours les données de l'exemple précédent pour déterminer les paramètres suivants :

- Longueur virtuelle : $L_{vir} = L_{r.c.d} + 2 \times 0,44 T_c = 22,50 + 0,88 \times 10,0 = 31,30 \text{ m.}$
- Pour tracer l'épure nous devons déterminer les pertes de charges singulières à l'entrée et à la sortie du contour souterrain :
 - Pertes de charge à l'entrée :

$$h_e = \frac{2\lambda_e}{\lambda_e + \lambda_s + L_{r.c.d}} = \frac{2(\lambda_o + l_{o-1})}{2\lambda_o + l_{s-9} + l_{o-1} + L_{r.c.d}} = \frac{5,5 \times 2}{8,80 + 22,5 + 1,6} = 0,33 \text{ m}$$

- Pertes de charge à la sortie : $h_s = \frac{2\lambda_s}{\lambda_e + \lambda_s + L_{r.c.d}} = \frac{2(\lambda_o + l_{8.9})}{2\lambda_o + l_{8.9} + l_{0-1} + L_{r.c.d}} = \frac{4,9 \times 2}{8,80 + 22,5 + 1,6} = 0,29 \text{ m}$

- Calcul des Sous pressions et des épaisseurs.

- $h_x = \frac{H \cdot l_x}{L_r + 0,88 T_{moy}} = \frac{H}{L_{vir}} l_x$ avec $l_x = 0,44 T_{moy} + x$.

- $t_x = f(h_x) = n \frac{\gamma_w}{\gamma_b - \gamma_w} h_x$

4. APPLICATION DE LA METHODE GRAPHIQUE " TRACE DU RESEAU HYDRODYNAMIQUE ".

Tout d'abord on construit graphiquement le réseau hydrodynamique pour le radier général de l'application précédente (voir figure N°10).

- Etant donnée que la profondeur du substratum est infinie $T_{act} = K_{act} (L_{r.c.d})$ avec :

$0,5 \leq K_{act} \leq 1,25$ (selon la dissipation d'énergie en profondeur) d'où :

$T_{act} = 0,80 \times 20 = 16,0 \text{ m}$

1. Module du réseaux d'écoulement souterrain :

$M = \frac{Nd}{Np} = \frac{3}{8} = 0,375$

2. Perte de pression par bande de pression :

$\Delta H = \frac{H}{Np} = \frac{5}{8} = 0,625 \text{ m}$

3. Débit spécifique a travers une bande de débit :

$\Delta q = K_f \frac{H}{Np} = 12 \times \frac{5}{8} = 12 \times 0,625 = 7,5 \text{ m}^2/\text{j}$

4. Débit spécifique passé a travers toutes les bandes de débit :

$q = \Sigma \Delta q_i = \Delta q \times N_d = 7,50 \times 3 = 22,50 \text{ m}^3/\text{j} \cdot \text{ml}$.

Le courbe sommaire (cumulé) des débit spécifique est représenté sur la figure citée ci dessus.

5. Débit total d'infiltration serait égal à :

$Q = q \cdot B = 22,50 \times 16,00 = 360,0 \text{ m}^3/\text{j} = 4,16 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$.

La vitesse moyenne dans chaque bande de débit est déterminée par le rapport suivant :

$V = \frac{\Delta q}{\Delta S \cdot l}$ où ΔS : étant la longueur moyenne de chaque bande de débit,

déterminée graphiquement.(figure .10).

Pour mener une construction rigoureuse du graphique des débits spécifiques on devra calculer le débit par demi- bande (voir tableau ci dessous) :

$q' = \frac{\Delta q}{2} = \frac{7,50}{2} = 3,75 \text{ m}^3/\text{j} \cdot \text{ml}$.

| N° de la demi-bande de débit | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|------|------|-------|-------|-------|
| Vitesse (m/j) | 3,75 | 2,68 | 1,89 | 1,34 | 0,94 |
| Débit spécifique (m ³ /j/ml) | 3,75 | 7,50 | 11,25 | 15,00 | 18,80 |

5. CALCUL DES DEFORMATIONS SOUS L'ASSISE DE L'OUVRAGE.

Partant des données de notre exemple, nous calculerons dans premier temps l'érosion mécanique interne puis le gradient de soulèvement hydraulique.

- Calcul d'après l'érosion interne :

On Calcul le gradient dans la première maille du réseau d'écoulement souterrain situé au bout du radier :

$\Delta L = \Delta S$ (cas d'un quadratique composé mailles carrées).

ΔH : sous pression au début de la maille.

$$I = \frac{\Delta H}{\Delta L} = \frac{0,625}{2,40} = 0,26 .$$

Pour un sol de fondation donné avec $\eta < 10$ l'érosion est exclue étant donnée que le gradient est inférieur au gradient admissible d'érosion interne $(I_{er})^{adm} = (0,30 - 0,40)$.

- Calcul au soulèvement hydraulique.

Calcul du gradient critique :

$$(I_{sh})^{cr} = \frac{\gamma}{\gamma_w} \cdot (1-n) = \frac{1,9}{1} (1-0,4) = 1,30 .$$

On détermine le gradient admissible : $(I_{sh})^{adm} = \frac{(I_{s,h})^{adm}}{n_{s,h}} = \frac{1,30}{1,30} = 1,00$.

On doit comparer par la suite le gradient admissible moyen de l'écoulement souterrain sur la voie verticale de l'écoulement souterrain $(I_{sh})^{moy}$, qui est égal à :

$$(I_{sh})^{moy} = \frac{h'_p}{S'} = \frac{0,625}{0,60} = 1,04 .$$

où

h'_p est la sous pression au bout du radier général.

$S' : t_r - t_{ris} = 1,10 - 0,50 = 0,60$ m.

Pour le cas considéré $(I_{sh})^{moy} = (I_{sh})^{adm}$ d'ou on peut dire qu'il n'y a pas de soulèvement hydraulique.

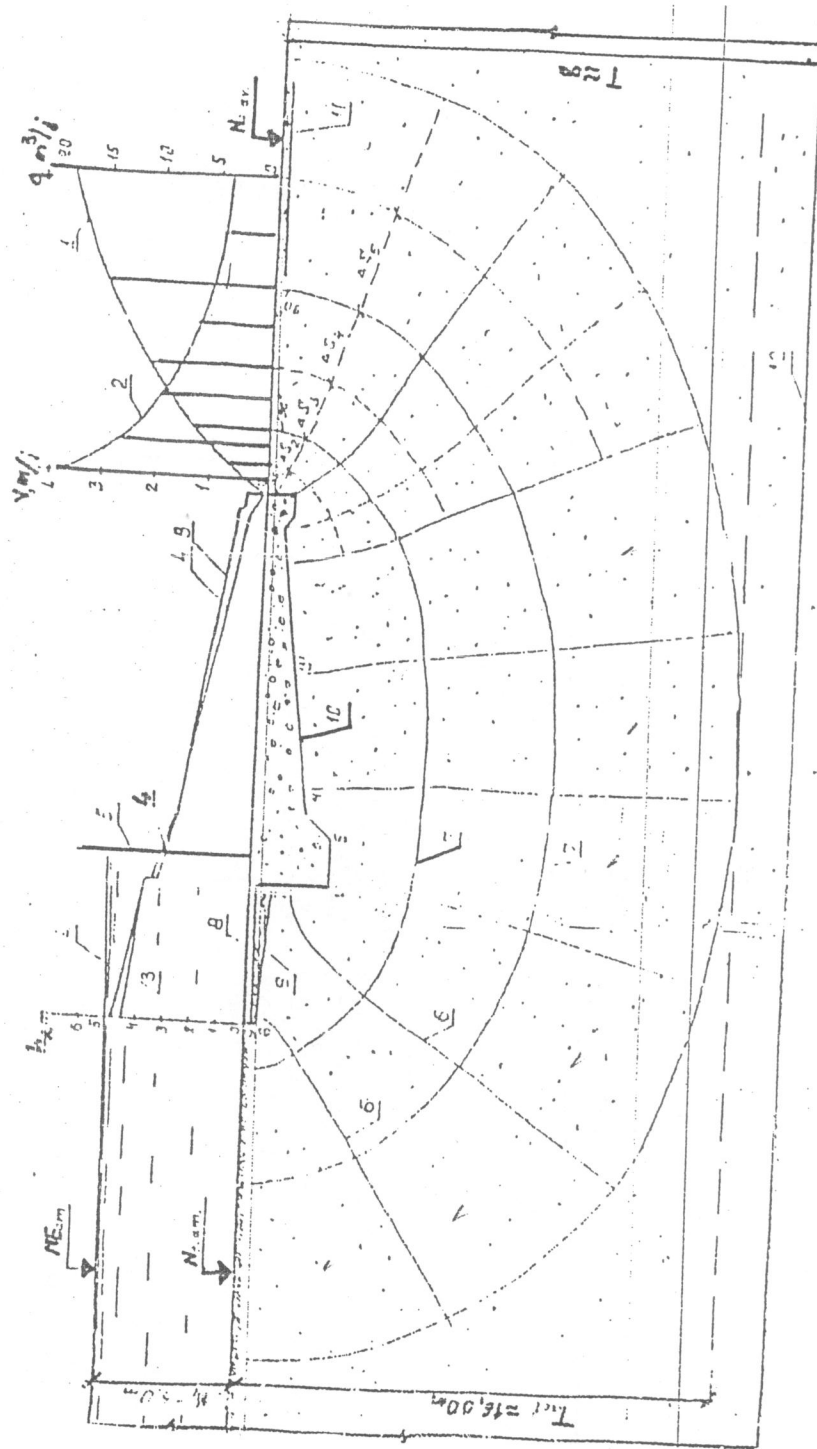


Figure 10 : Coupe transversale de l'ouvrage régulateur et tracé du réseau hydrodynamique.
 1- graphique sommaire des débits spécifiques ; 2- graphique des vitesses moyennes de l'écoulement
 souterrain ; 3- Diagramme des sous pressions (procédé graphique) ; 4- graphique des sous pression
 d'après la méthode de Bligh.

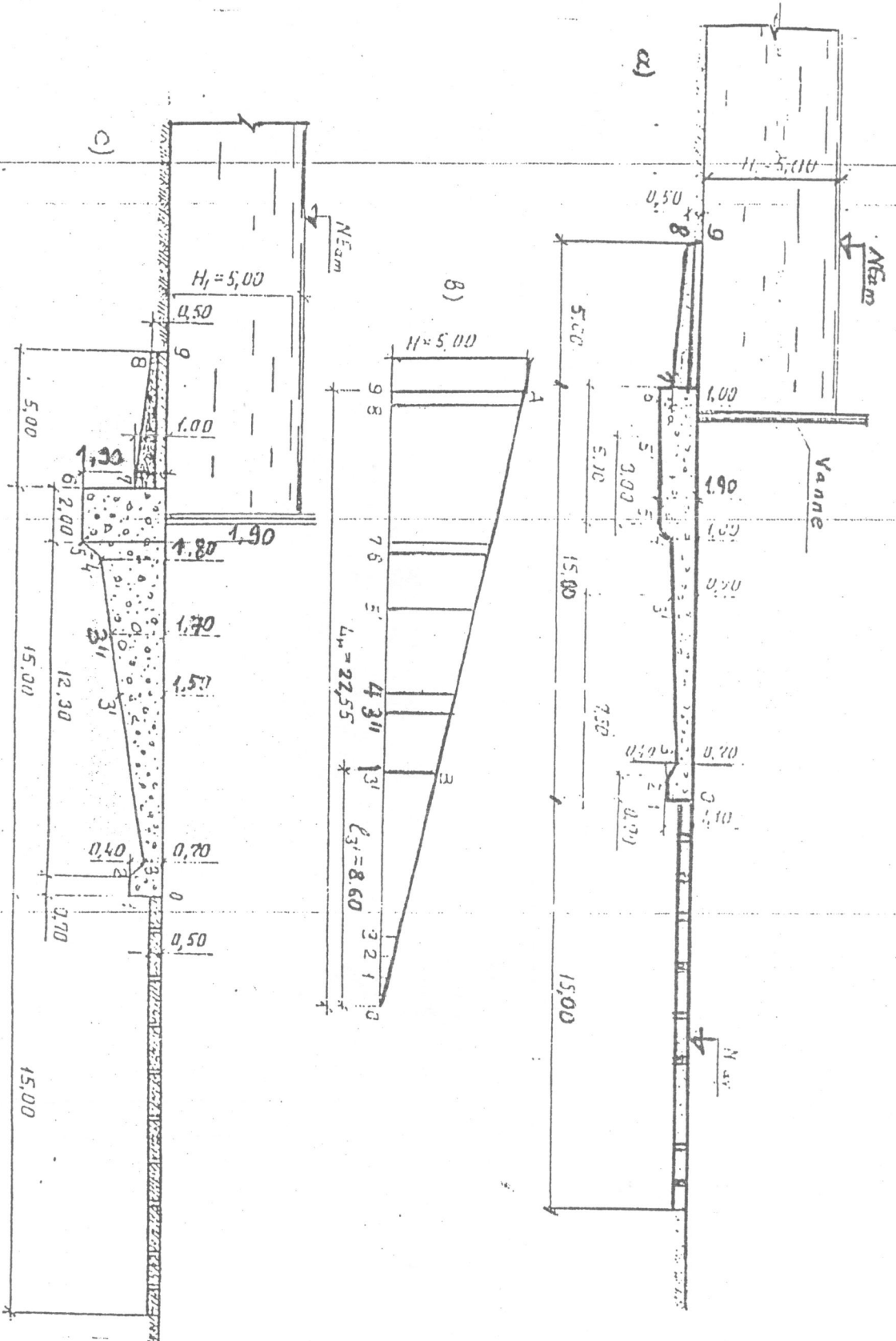


Figure 11 : Schéma de calcul selon la théorie approximative de Blieth
 a)- ouvrage avec les dimensions préables ; b) courbes piezométrique de pression de l'écoulement souterrain ; c) ouvrage avec les dimensions préables des ferrigées)

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **E.BELOKONEV.** Filtration sous les ouvrages hydrauliques, Edition I.H.B, TIPASA 1982.
- **M.BOUVARD.** Barrages mobiles et prises d'eau en rivière, Edition Eyrolles, Paris, 1960.
- **J.ESTIENNE.** Calcul et construction de barrages, ENSEIHT de Toulouse, Edition 1969.
- **M.DUNGLAS.** Cours d'ouvrage d'art ; Les Barrages "1^{ere} & 2^{eme} partie" , ENITRTS, Strasbourg 1986.