

# CHAPITRE IV

## EXPERIMENTATION NUMÉRIQUE ET INTERPRÉTATION DES RESULTATS

### IV-1 INTRODUCTION

La conception des excavations profondes est souvent dominée par l'écoulement de l'eau autour des écrans de soutènement. L'infiltration d'eau vers le fond de fouille, liée à la mise hors d'eau, influe sur la stabilité globale de l'écran et la stabilité du fond de fouille où un soulèvement ou une boulangerie peuvent apparaître.

L'écoulement souterrain autour d'un rideau induit un écoulement sensiblement vertical devant la fiche descendant côté amont et ascendant côté aval.

L'étude et la comparaison des résultats des travaux antérieurs mettent en évidence :

- Û L'imprécision de certaines relations et certains abaques ;
- Û Une définition souvent très floue du domaine d'application.

En particulier, les recoupements entre ces méthodes, à leurs frontières sont souvent mauvais dans des zones très utiles pour les applications pratiques.

Ce chapitre présente le calcul numérique du débit d'exhaure, des pertes de charge et du gradient de sortie des fouilles protégées par un écran étanche. La modélisation est réalisée à l'aide du logiciel EAUSOL en éléments finis. Après la description du modèle numérique utilisé et des conditions aux limites, on présente les résultats obtenus sous forme de courbes et de tableaux suivis d'une interprétation et une discussion.

## IV-2 CAS ETUDIÉS

La multiplicité des cas que l'on peut rencontrer dans la pratique, suivant la géométrie de l'enceinte et l'anisotropie, ne permet pas de donner à ce problème une solution générale. Nous avons essayé d'adopter une démarche qui consiste à sélectionner quelques cas schématiques pouvant représenter correctement un grand nombre de cas réels.

On considère un écran étanche pénétrant d'une profondeur égale à  $f$  où  $f$  est la fiche du batardeau, dans un sol homogène anisotrope dans deux milieux semi infini et fini. Cet écran est soumis à une charge hydraulique  $H$  comme indiqué sur la figure IV.1.

Où :

$e$  : l'épaisseur du milieu ;

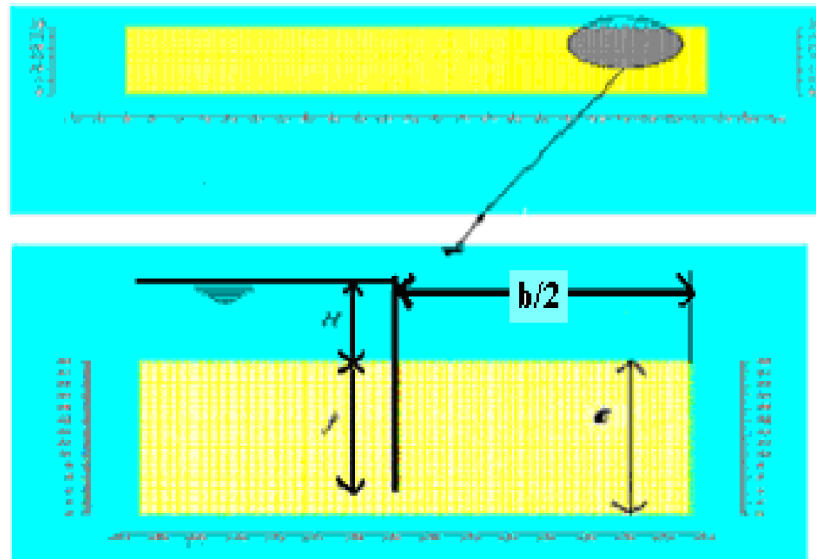
$e_1$  et  $e_2$  sont les épaisseurs du milieu dans les cotés amont et aval successivement ;

$H$  : la perte de charge totale ;

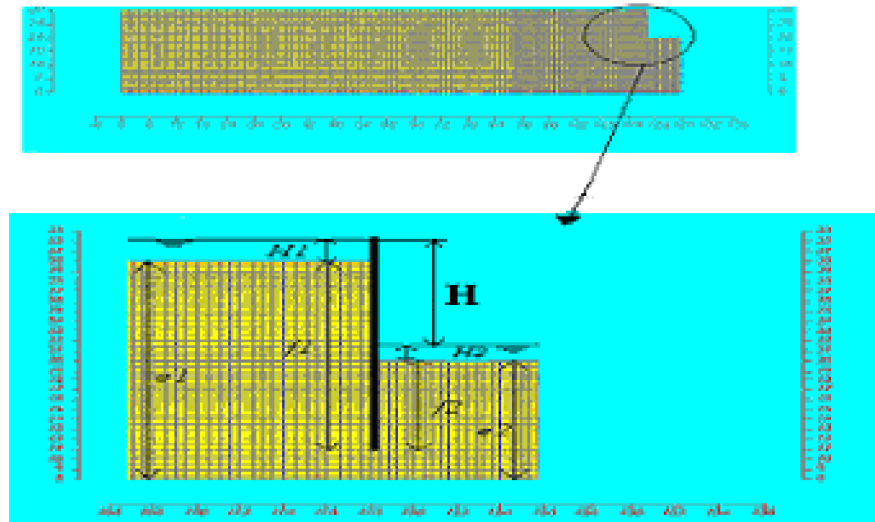
$f$  : la fiche de l'écran ;

$f_1$  et  $f_2$  : Les fiches dans les cotés amont et aval successivement ;

$b$  : la largeur de la fouille



a) Batardeau plan sans fouille



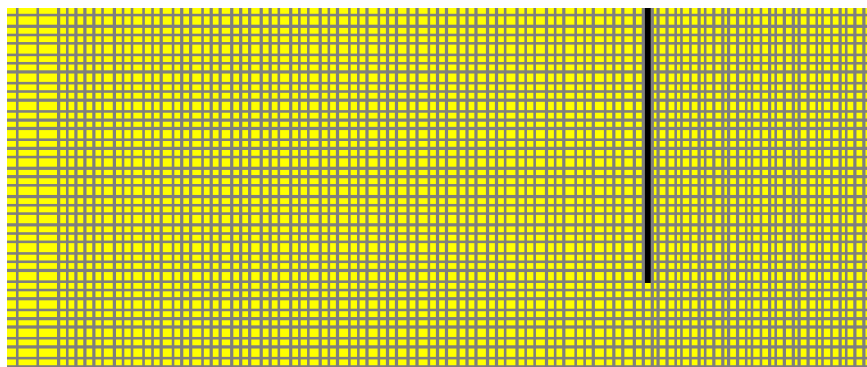
b) Batardeau plan avec fouille

**Figure IV.1** : Configurations étudiées

### IV-3 MAILLAGE ET CONDITIONS AUX LIMITES

A cause de la symétrie de l'écoulement, uniquement la moitié du massif de sol est considérée dans le calcul.

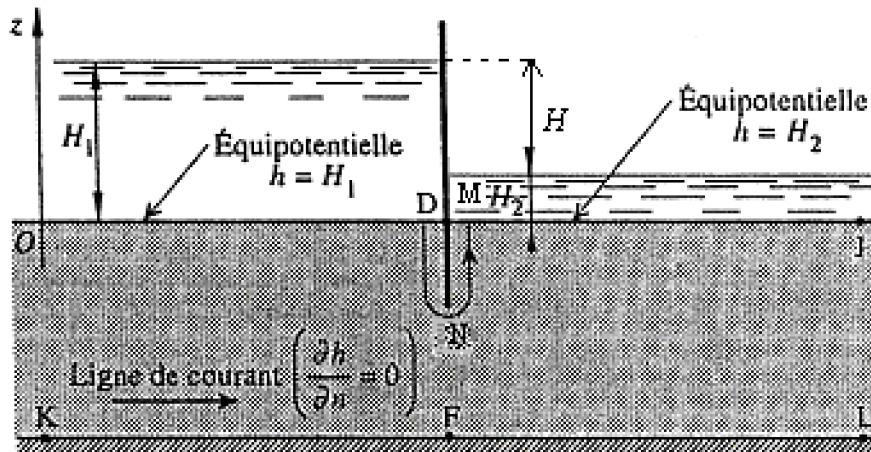
La figure IV.2 montre le maillage retenu pour notre étude, ce maillage est raffiné au voisinage de la paroi, il contient 10187 nœuds et 9954 éléments dans le cas d'un batardeau sans fouille, et 9347 nœuds et 9118 éléments dans le cas d'un batardeau avec fouille. Le maillage se fait d'une manière semi-automatique.

**Figure IV.2** : Maillage utilisé

La figure IV.3 présente Les conditions aux limites hydrauliques considérées dans le calcul.

Où :

OKFLI et DMN sont deux lignes de courant et OD et MI sont deux lignes équipotentiellles de valeurs respectivement  $H_1$  et  $H_2$ , avec  $H$  est la perte de charge totale.



**Figure IV.3 :** Conditions aux limites hydrauliques

#### IV-4 DEBIT D'EXHAURE DES BATARDEAUX PLANS SANS FOUILLE

##### IV-4 -1 Débit d'exhaure des batardeaux plans sans fouille dans un milieu fini

Plusieurs auteurs ont étudié ce cas, ils ont proposé des méthodes de calcul reposant sur des relations analytiques et des abaques.

Dans ce contexte, on a étudié les débits d'exhaure par une méthode de calcul numérique basée sur le logiciel EAUSOL et la méthode des fragments

Cette méthode a été proposée par PAVLOVSKI (1956) et développée par HARR (1980), le principe est basé sur le fait que certaines lignes équipotentiellles peuvent être assimilées à des droites verticales qui séparent le milieu en des zones appelées fragments.

Les conditions dans lesquelles on a travaillé :

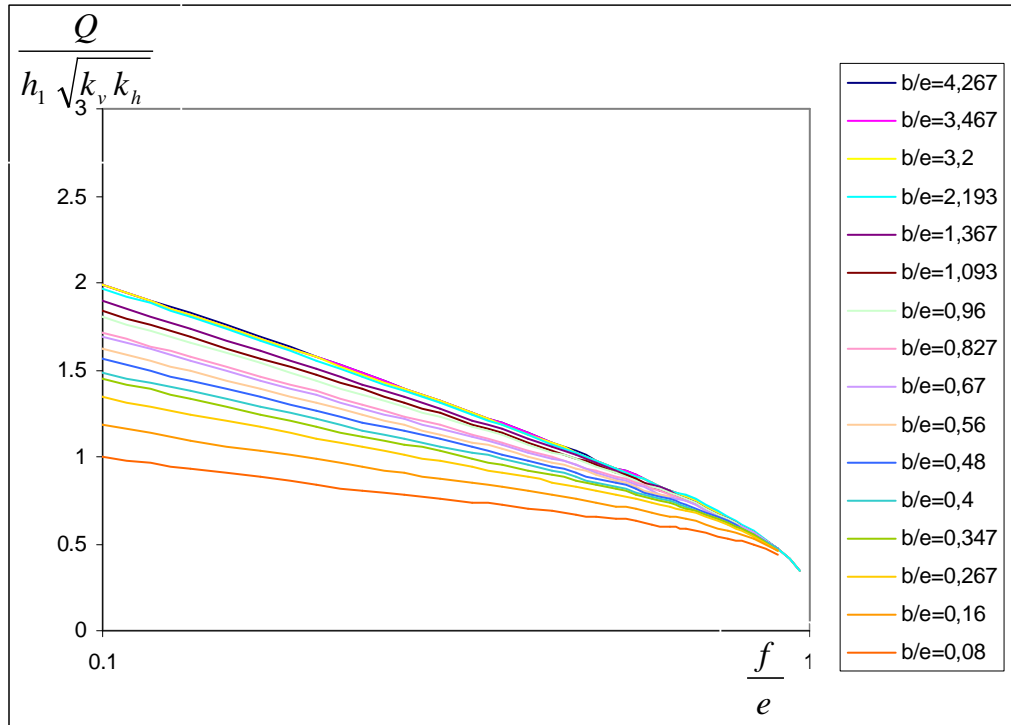
$$0.033 < \frac{f}{e} < 0.967 ;$$

$$0.067 < \frac{b}{e} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}} < 4.267.$$

Les résultats obtenus par le logiciel **EAUSOL** sont résumés dans les figures 4, 5, 6, 7 sous forme de variation du débit en fonction de la fiche et de la largeur relative du batardeau.

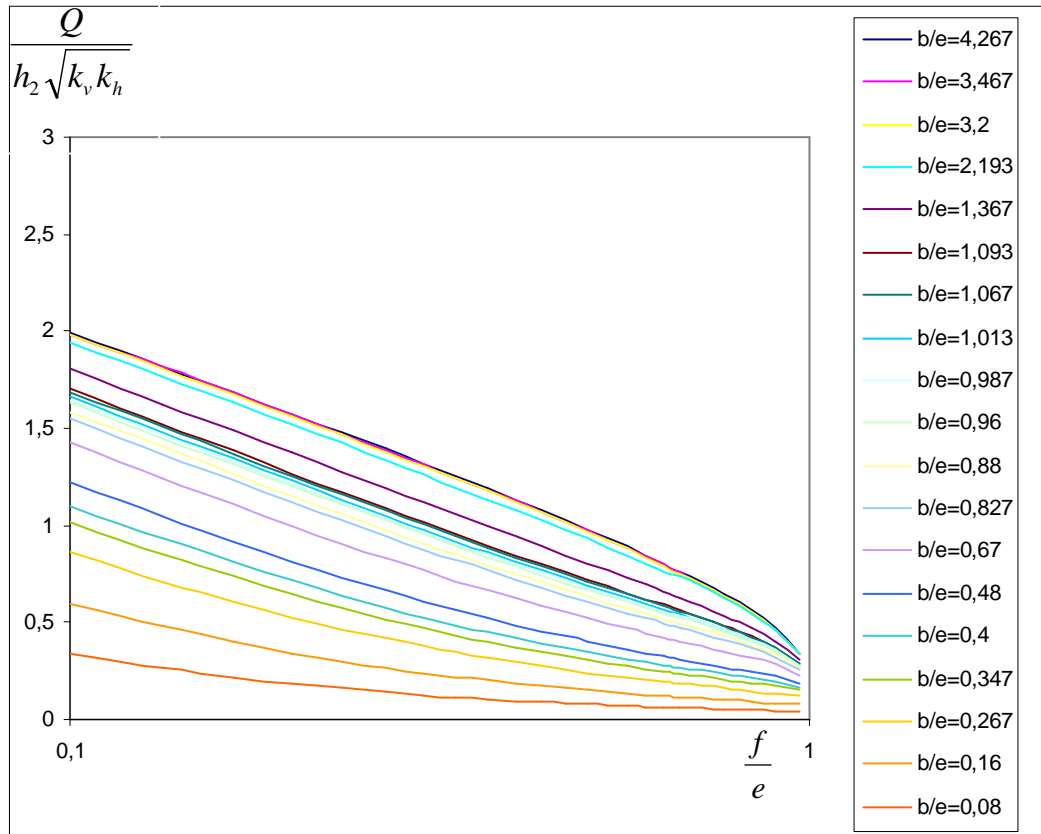
L'analyse de ces résultats nous permet de tirer quelques remarques :

- Ø Pour le coté amont le débit augmente avec l'augmentation de la largeur et la diminution de la fiche relative du batardeau (figure IV.4), dès que  $\frac{b}{e} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$  est supérieure à 1 le débit reste constant quelle que soit  $\frac{f}{e}$ , ce qui fait que la largeur n'influe que peu sur le débit.



**Figure IV.4** : Variations du débit en fonction de  $\frac{f}{e}$  dans le coté amont

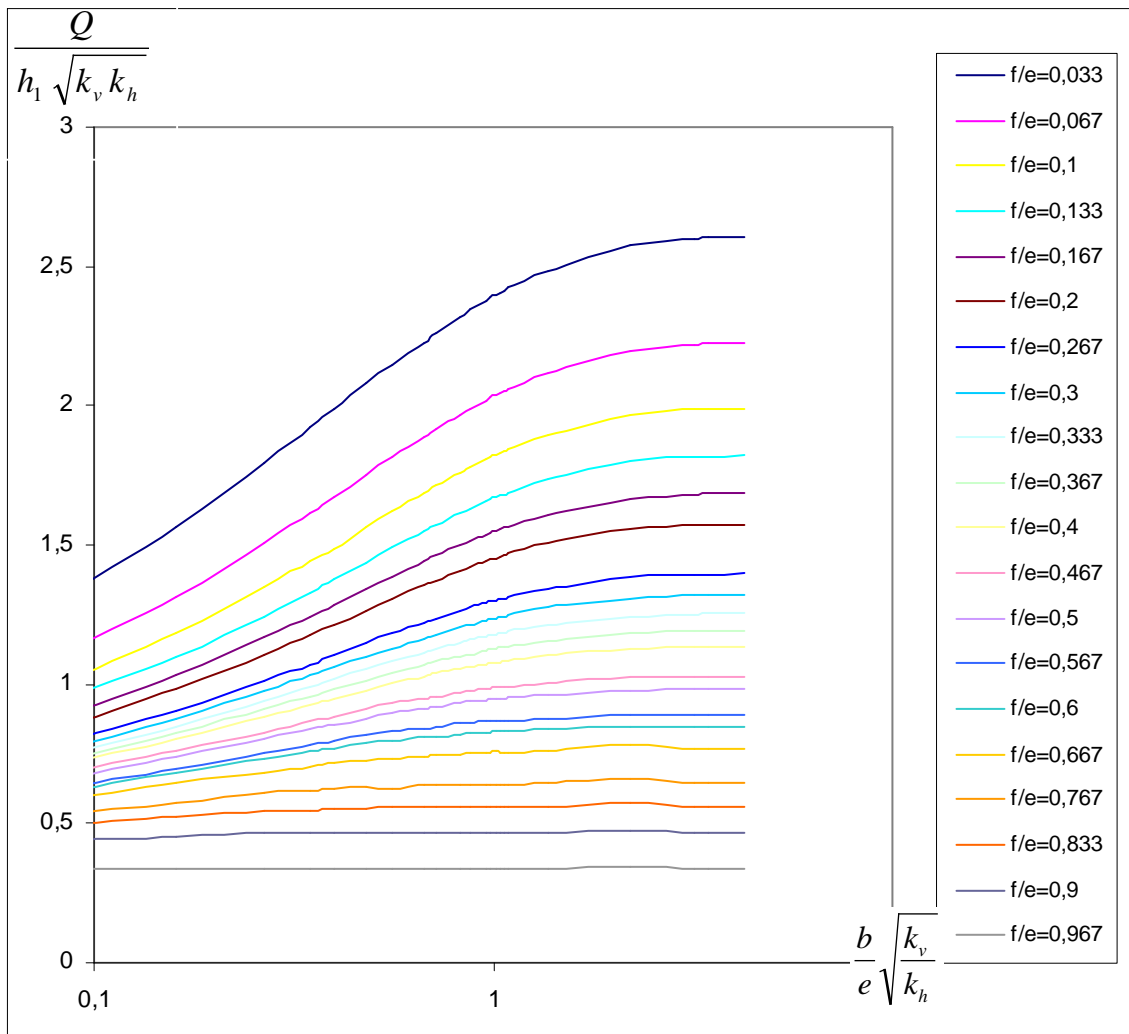
- ∅ Pour le coté aval, on constate que pour des valeurs de la largeur relative supérieures à 2.5 le débit reste constant quelle que soit  $\frac{f}{e}$ . (Figure IV.7) et (figure IV.5).
- ∅ Pour les batardeaux larges, la majorité du débit est concentrée au voisinage de l'écran et dépend de la perméabilité du sol.



**Figure IV. 5:** Variations du débit en fonction de  $\frac{f}{e}$  dans le coté aval

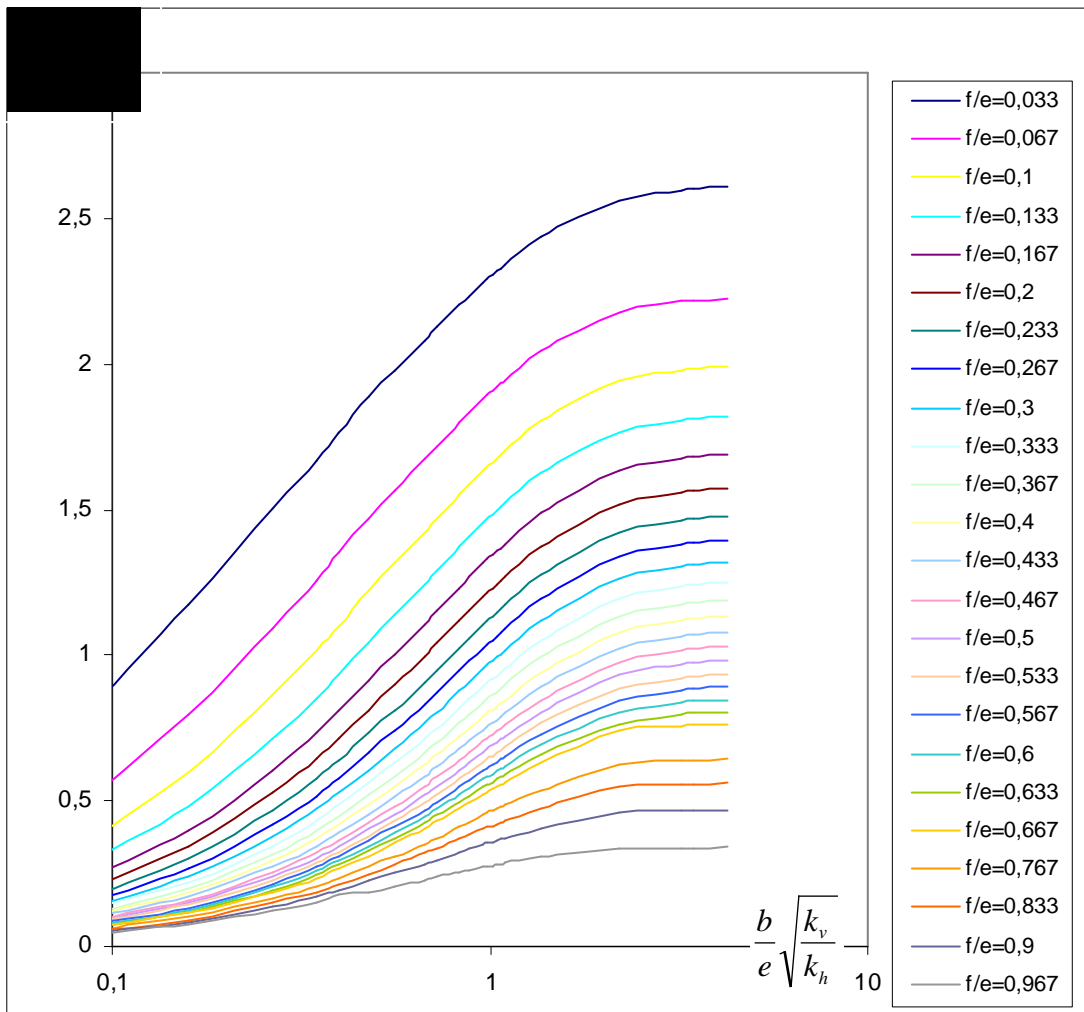
- ∅ Généralement on peut dire que pour des valeurs de  $\frac{f}{e}$  égales ou supérieures à 0.833

et quelle que soit  $\frac{b}{e} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$  l'influence du coté aval sur le coté amont est faible voire nulle (Figure IV.6).



**Figure IV.6 :** Variations du débit en fonction de  $\frac{b}{e} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$  dans le coté amont

Ø Pour les faibles valeurs de la largeur relative, les pertes de charges dues à l'écoulement sont très fortes et le débit dans ce cas dépend de la perméabilité verticale.

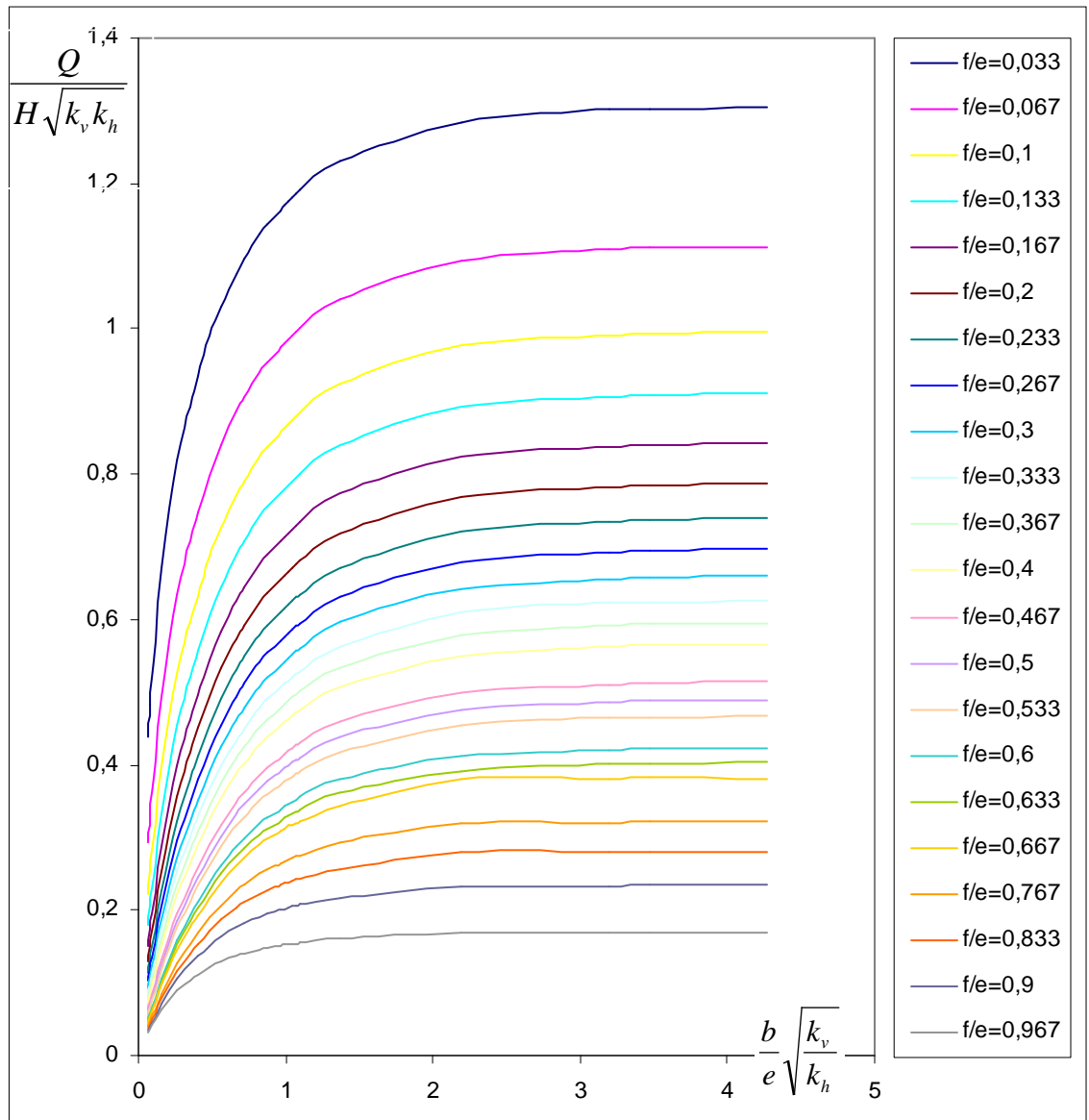


**FigureIV.7 :** Variations du débit en fonction de  $\frac{b}{e} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$  dans le coté aval

Ø La figure IV.8 qui présente la variation de débit total en fonction de  $\frac{b}{e} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$  montre

qu'à partir de  $\frac{b}{e} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}} > 2.5$  le débit total reste constant quelles que soient les valeurs de  $\frac{f}{e}$  ;

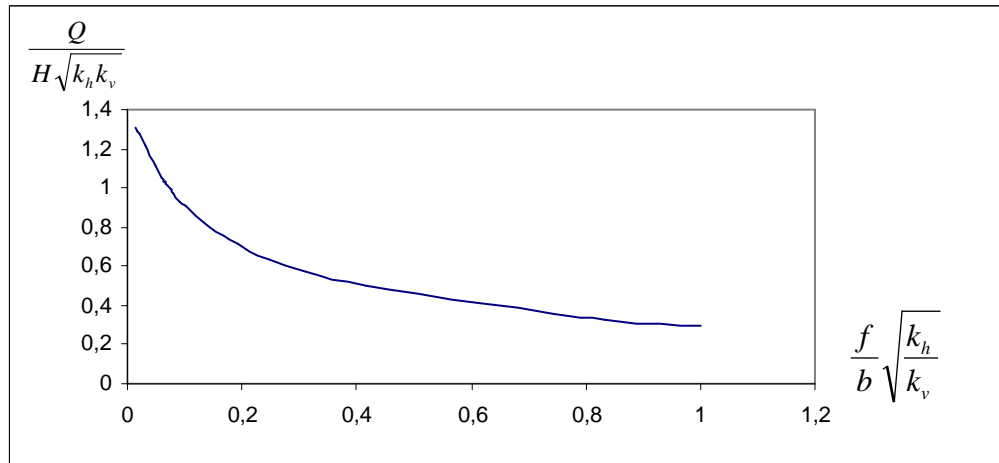




**Figure IV.8 :** Variations du débit total en fonction de  $\frac{b}{e} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$

**IV-4-2 Débit d'exhaure des batardeaux plans sans fouille dans un milieu semi infini**

On remarque que lorsque les valeurs de  $\frac{f}{b} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$  augmentent le débit diminue (figures IV.9), ce qui nous permet de dire que le débit ne dépend pas de l'épaisseur de la couche mais il dépend d'une part du rapport  $\frac{f}{b} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$  et d'autre part de la perméabilité.



**Figure IV.9 :** Variations des débits en fonction de  $\frac{f}{b} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$  dans un milieu semi infini

**IV-4-3 Comparaison avec les résultats existants**

IV-4-3-1 milieu fini

KASTNER propose un abaque (voir figure II.11 page 47) pour les écrans fichés dans un milieu fini l’erreur, comparée à nos résultats, est comprise entre 0.16% et 2%. (Tableau IV.1)

**Tableau V.1 :** Comparaisons avec KASTNER

Pour  $\frac{f}{e} = 0.5$

| $\frac{b}{e} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$ | Le débit d’après EAUSOL | Le débit d’après KASTNER | ERREUR |
|--------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------|
| 4,267                                | 0,49                    | 5,00E-01                 | 0,02   |
| 3,467                                | 0,48862                 | 4,90E-01                 | 0,004  |
| 3,2                                  | 0,48675                 | 4,80E-01                 | 0,013  |
| 2,193                                | 0,47635                 | 4,70E-01                 | 0,012  |
| 1,367                                | 0,43834                 | 4,40E-01                 | 0,0045 |

Tableau V.1 : Comparaisons avec KASTNER (suite)

|       |          |          |        |
|-------|----------|----------|--------|
| 1,04  | 0,40294  | 4,02E-01 | 0,0023 |
| 0,987 | 0,3952   | 3,90E-01 | 0,013  |
| 0,96  | 0,39107  | 3,85E-01 | 0,015  |
| 0,88  | 0,37758  | 3,70E-01 | 0,018  |
| 0,827 | 0,36756  | 3,60E-01 | 0,02   |
| 0,72  | 0,34472  | 3,50E-01 | 0,015  |
| 0,67  | 0,3317   | 3,25E-01 | 0,02   |
| 0,56  | 0,30196  | 3,00E-01 | 0,006  |
| 0,48  | 0,27589  | 2,70E-01 | 0,021  |
| 0,4   | 0,24597  | 2,50E-01 | 0,016  |
| 0,347 | 0,22355  | 2,20E-01 | 0,017  |
| 0,267 | 0,18556  | 1,85E-01 | 0,005  |
| 0,16  | 0,12482  | 1,25E-01 | 0,0016 |
| 0,08  | 0,069143 | 7,00E-02 | 0,014  |

MANDEL propose deux relations :

$$\frac{f}{e} < 0.5$$

$$\frac{Q}{\sqrt{kv/khH}} = \frac{1}{\pi} \ln 2 \cot g \frac{\pi f}{4 e}$$

(IV.1)

$$\frac{f}{e} > 0.5$$

$$\frac{Q}{\sqrt{kv/khH}} = \frac{\pi}{4} \frac{1}{\ln 2 \cot g \left( \frac{\pi}{4} (1 - f/e) \right)}$$

Elles sont applicables pour les batardeaux larges, l'écart avec nos résultats est inférieur à 5.8%.

Pour les valeurs de  $\frac{f}{e}$  supérieures à 0.5, le domaine d'application des relations de MANDEL (IV.1) est valable avec  $\frac{b}{e} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}} > 2.193$  (Tableau IV.2) c'est à dire pour les fouilles larges.

**Tableau V.2 :** Comparaisons avec MANDEL

| $\frac{f}{e}$ | Le débit d'après MANDEL | Le débit d'après EAUSOL | ERREUR     |
|---------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| 0,033         | 1,3036                  | 1,3841537               | 0,058      |
| 0,067         | 1,1129                  | 1,15839                 | 0,04       |
| 0,1           | 0,99564                 | 1,03049                 | 0,03       |
| 0,133         | 0,91031                 | 0,9391663               | 0,03       |
| 0,167         | 0,84295                 | 0,865996                | 0,026      |
| 0,2           | 0,78714                 | 0,8077684               | 0,012      |
| 0,3           | 0,66002                 | 0,6753063               | 0,014      |
| 0,4           | 0,56625                 | 0,57893835              | 0,022      |
| 0,5           | 0,49                    | 0,5016191               | 0,02       |
| 0,53          | 0,46705                 | 0,47767759              | 0,016      |
| 0,6           | 0,42366                 | 0,43182491              | 0,018      |
| 0,633         | 0,40289                 | 0,41112449              | 0,019      |
| 0,667         | 0,39022039              | 3,82E-01                | 0,02229609 |
| 0,833         | 0,288684                | 2,81E-01                | 0,0272755  |
| 0,967         | 0,180615                | 1,70E-01                | 0,05832849 |

CAMBFORT propose de calculer la perte de charge extérieure par la relation Suivante :

$$\frac{h_2 k}{Q} = \left( 0.14 + \frac{0.8}{\cot g \frac{b}{e}} \right) \ln \left( \frac{e}{e-f} + \sqrt{\left( \frac{e}{e-f} \right)^2 - 1} \right) \quad \text{IV.2)}$$

Dans ce cas l'erreur atteint des valeurs importantes :

Ø Pour les valeurs de  $\frac{f}{e}$  comprises entre 0.2 et 0.333, et supérieures à 0.8, l'erreur est assez grande, elle dépasse 30% pour les fouilles étroites ;

Ø Pour les valeurs de  $\frac{f}{e}$  entre 0.4 et 0.8, l'erreur oscille entre 1.20% et 8.6%, on peut dire que la relation de CAMBFORT (IV.2) est valable dans cette gamme (Tableau IV.3).

**Tableaux IV.3 :** Comparaisons avec CAMBFORT

$$\blacktriangleright \frac{f}{e} = 0.2$$

| $\frac{b}{e} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$ | La perte de charge d'après EAUSOL | La perte de charge d'après CAMBFORT | ERREUR     |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|------------|
| 4,267                                | 0,63521102                        | 0,51067643                          | 0,19605231 |
| 3,2                                  | 0,64128768                        | 0,53438798                          | 0,16669539 |
| 1,04                                 | 0,8054421                         | 0,78587953                          | 0,02428799 |
| 0,4                                  | 1,3956997                         | 1,55435585                          | 0,10207196 |
| 0,067                                | 6,4502496                         | 8,385794                            | 0,2308123  |

$$\rightarrow \frac{f}{e} = 0.333$$

| $\frac{b}{e} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$ | La perte de charge d'après EAUSOL | La perte de charge d'après CAMBFORT | ERREUR     |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|------------|
| 4,267                                | 0,7575528                         | 0,70906596                          | 0,06400457 |
| 3,2                                  | 0,76529056                        | 0,7419891                           | 0,03044786 |
| 1,04                                 | 1,00701557                        | 1,091181                            | 0,07713242 |
| 0,4                                  | 1,8930263                         | 2,1581979                           | 0,12286714 |
| 0,067                                | 9,447729                          | 11,6435398                          | 0,18858619 |

$$\rightarrow \frac{f}{e} = 0.4$$

| $\frac{b}{e} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$ | La perte de charge d'après EAUSOL | La perte de charge d'après CAMBFORT | ERREUR     |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|------------|
| 4,267                                | 0,88388521                        | 0,8094                              | 0,08427023 |
| 3,467                                | 0,88809789                        | 0,835                               | 0,05978833 |
| 3,2                                  | 0,89412685                        | 0,846                               | 0,05382553 |
| 0,4                                  | 2,39408459                        | 2,463                               | 0,02798027 |
| 0,16                                 | 5,40729402                        | 5,69                                | 0,04968471 |
| 0,067                                | 12,4488546                        | 13,29                               | 0,0632916  |

$$\rightarrow \frac{f}{e} = 0.433$$

| $\frac{b}{e} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$ | La perte de charge d'après EAUSOL | La perte de charge d'après COMBFORT | ERREUR     |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|------------|
| 4,267                                | 0,92795165                        | 0,8613                              | 0,07182664 |
| 3,467                                | 0,9324161                         | 0,8886                              | 0,046992   |
| 3,2                                  | 0,93878313                        | 0,90124                             | 0,03999127 |
| 0,4                                  | 2,56180842                        | 2,621                               | 0,02258359 |
| 0,16                                 | 5,82403525                        | 6,058                               | 0,03862079 |
| 0,067                                | 13,4411817                        | 14,14                               | 0,04942138 |

$$\rightarrow \frac{f}{e} = 0.5$$

| $\frac{b}{e} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$ | La perte de charge d'après EAUSOL | La perte de charge d'après COMBFORT | ERREUR     |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|------------|
| 4,267                                | 1,02142857                        | 0,97027                             | 0,05008531 |
| 3,467                                | 1,02635995                        | 1,0011                              | 0,0246112  |
| 3,2                                  | 1,03441192                        | 1,015                               | 0,01876614 |
| 0,4                                  | 2,89669472                        | 2,953                               | 0,01906715 |
| 0,16                                 | 6,65758693                        | 6,83                                | 0,0252435  |
| 0,067                                | 15,4540039                        | 15,93                               | 0,02988048 |

$$\rightarrow \frac{f}{e} = 0.667$$

| $\frac{b}{e} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$ | La perte de charge d'après EAUSOL | La perte de charge d'après COMBFORT | ERREUR     |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|------------|
| 4,267                                | 1,314479                          | 1,2987                              | 0,012004   |
| 3,2                                  | 1,32451203                        | 1,359                               | 0,02537746 |
| 1,04                                 | 1,82757756                        | 1,9985                              | 0,08552536 |
| 0,4                                  | 3,75496115                        | 3,9528                              | 0,05005031 |
| 0,067                                | 20,446469                         | 21,3259                             | 0,0412377  |

$$\rightarrow \frac{f}{e} = 0.833$$

| $\frac{b}{e} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$ | La perte de charge d'après EAUSOL | La perte de charge d'après COMBFORT | ERREUR     |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|------------|
| 4,267                                | 1,7805634                         | 1,82558                             | 0,02465879 |
| 3,2                                  | 1,8004152                         | 1,91035                             | 0,05754694 |
| 1,04                                 | 3,567712                          | 2,80939                             | 0,21255135 |
| 0,4                                  | 6,704723                          | 5,5566                              | 0,17124093 |
| 0,067                                | 25,475338                         | 29,97785                            | 0,15019463 |



$$\rightarrow \frac{f}{e} = 0.967$$

| $\frac{B}{e} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$ | La perte de charge d'après EAUSOL | La perte de charge d'après COMBFORT | ERREUR     |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|------------|
| 4,267                                | 2,94273283                        | 2,62746                             | 0,10713607 |
| 3,2                                  | 2,9609532                         | 2,74947                             | 0,07142403 |
| 1,04                                 | 3,567712                          | 4,04341                             | 0,11764773 |
| 0,4                                  | 5,58196                           | 7,99727                             | 0,30201681 |
| 0,067                                | 29,631324                         | 43,1455                             | 0,3132233  |

#### IV-4-3-2 milieu semi infini

SCHNEEBILI propose deux relations :

$$e) \sqrt{f^2 + b^2} \quad \frac{q}{kh} = \frac{2}{\pi} \ln \left[ \frac{b}{f} + \sqrt{\left(\frac{b}{f}\right)^2 + 1} \right]$$

(IV.3)

$$b) \sqrt{\frac{e^2}{f^2}} \quad \frac{q}{kh} = \frac{2}{\pi} \ln \left[ \frac{e}{f} + \sqrt{\left(\frac{e}{f}\right)^2 - 1} \right]$$

A partir des résultats théoriques concernant l'écoulement autour d'un écran fiché dans un milieu semi infini, on trouve que l'erreur est inférieure à 4% (tableau IV.4).

**Tableau IV.4 :** Comparaisons avec SCHNEEBILI

| $\frac{f}{b} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$ | Le débit d'après SCHNEEBILI | Le débit d'après EAUSOL | ERREUR |
|--------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------|
| 10,4                                 | 0,7487                      | 0,71396                 | 0,035  |
| 8                                    | 0,6671                      | 0,63773                 | 0,04   |
| 4,8                                  | 0,5125598                   | 0,49625                 | 0,026  |
| 2,4                                  | 0,32355                     | 0,33059                 | 0,021  |
| 2                                    | 0,29333                     | 0,29333                 | 0      |

BRILLANT propose une relation applicable pour les batardeaux larges dans un milieu semi infini.

$$\frac{Q}{H \cdot \sqrt{K_v \cdot K_h}} = \frac{1}{\pi} \ln \frac{2b}{f} \quad (\text{IV.4})$$

L'erreur oscille entre 4% et 14% (tableau IV.5).

L'erreur diminue lorsque la valeur de  $\frac{f}{b} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$  est supérieure à 0.067, c'est à dire que dans ce cas le domaine d'application est valable.

**Tableau IV.5 :** Comparaisons avec BRILLANT

| $\frac{f}{b} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$ | Le débit d'après BRILLANT | Le débit d'après EAUSOL | ERREUR |
|--------------------------------------|---------------------------|-------------------------|--------|
| 0.0156                               | 1,545                     | 1,3113                  | 0,14   |
| 0.0192                               | 1,479                     | 1,292                   | 0,11   |
| 0.02222                              | 1,43                      | 1,2752                  | 0,1    |
| 0.0609                               | 1,11                      | 1,2201                  | 0,09   |
| 0.0676                               | 1,078                     | 1,1101                  | 0,036  |

A partir des résultats expérimentaux obtenus par la méthode d'analogie électrique concernant l'écoulement autour d'un écran fiché dans un milieu semi infini KASTNER propose un abaque ( voir figure II.14 page50 ) qui nous a permis de faire la comparaison.

L'écart avec nos résultats ne dépasse pas 0.9% (tableau IV.6)

**Tableau IV.6:** Comparaisons avec KASTNER

| $\frac{f}{b} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$ | Le débit d'après EAUSOL | Le débit d'après KASTNER | ERREUR     |
|--------------------------------------|-------------------------|--------------------------|------------|
| 0,19                                 | 0,71396                 | 0,72                     | 0,00838889 |
| 0,25                                 | 0,63773                 | 0,64                     | 0,00354687 |
| 0,41                                 | 0,49625                 | 0,495                    | 0,00252525 |
| 0,83                                 | 0,33059                 | 0,3298                   | 0,00238967 |
| 1                                    | 0,29333                 | 0.294                    | 0,00227891 |

## IV-5 DEBIT D'EXHAURE DES BATARDEAUX PLANS AVEC FOUILLE

### IV-5-1 Débit d'exhaure des batardeaux plans avec fouille dans un milieu fini

Le problème qui se pose dans le cas des batardeaux avec fouille, c'est l'introduction d'un paramètre géométrique supplémentaire ( $e_2$ ). Dans ce cas il est évident de découper l'écoulement global en écoulements partiels, la méthode utilisée est aussi celle des fragments, vu sa simplicité et le large champ de ses applications.

Les conditions dans lesquelles on a travaillé :

$$0.367 < \frac{f_1}{e_1} < 0.967 ;$$

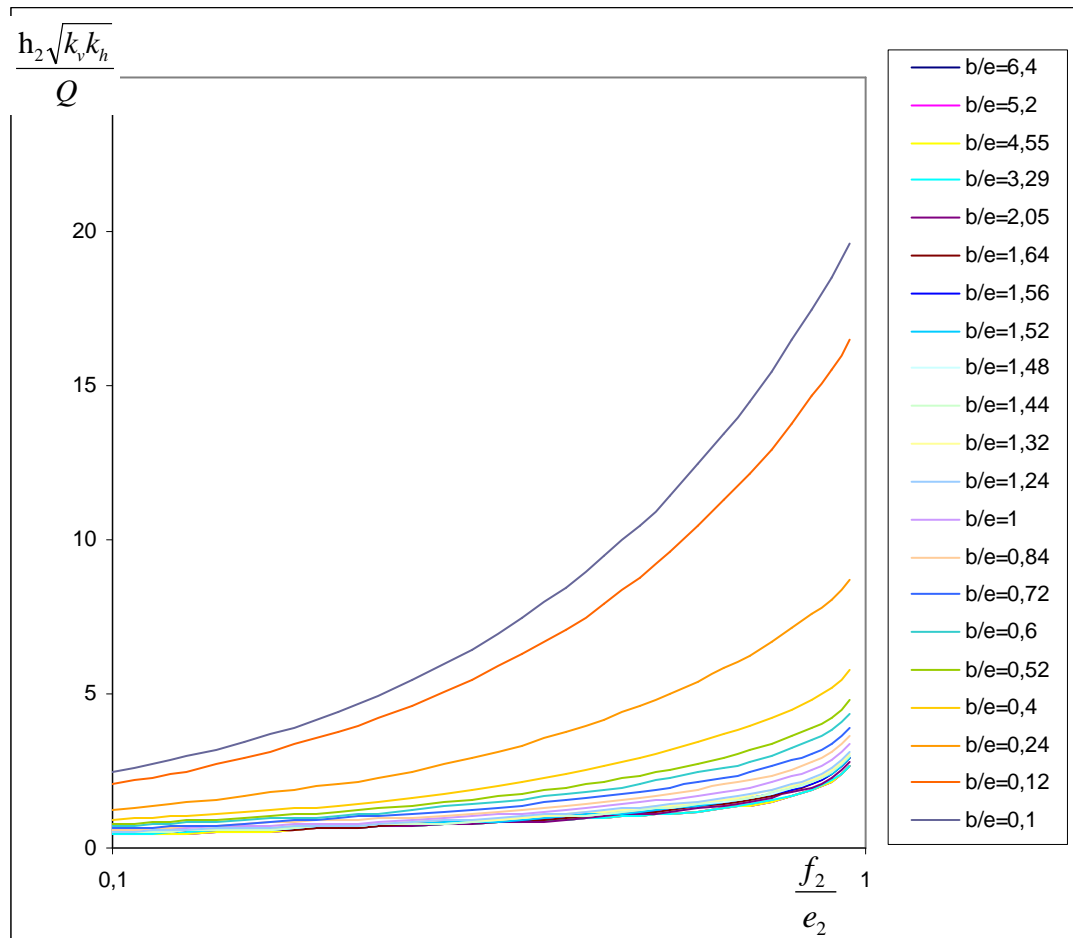
$$0.05 < \frac{f_2}{e_2} < 0.95 ;$$

$$0.05 < \frac{b}{e_2} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}} < 6.4.$$

Ø Dans le coté aval on voit bien que la perte de charge augmente lorsque  $\frac{b}{e_2} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$  diminue

et le  $\frac{f_2}{e_2}$  augmente, cela est dû généralement à la longueur du trajet d'écoulement autour

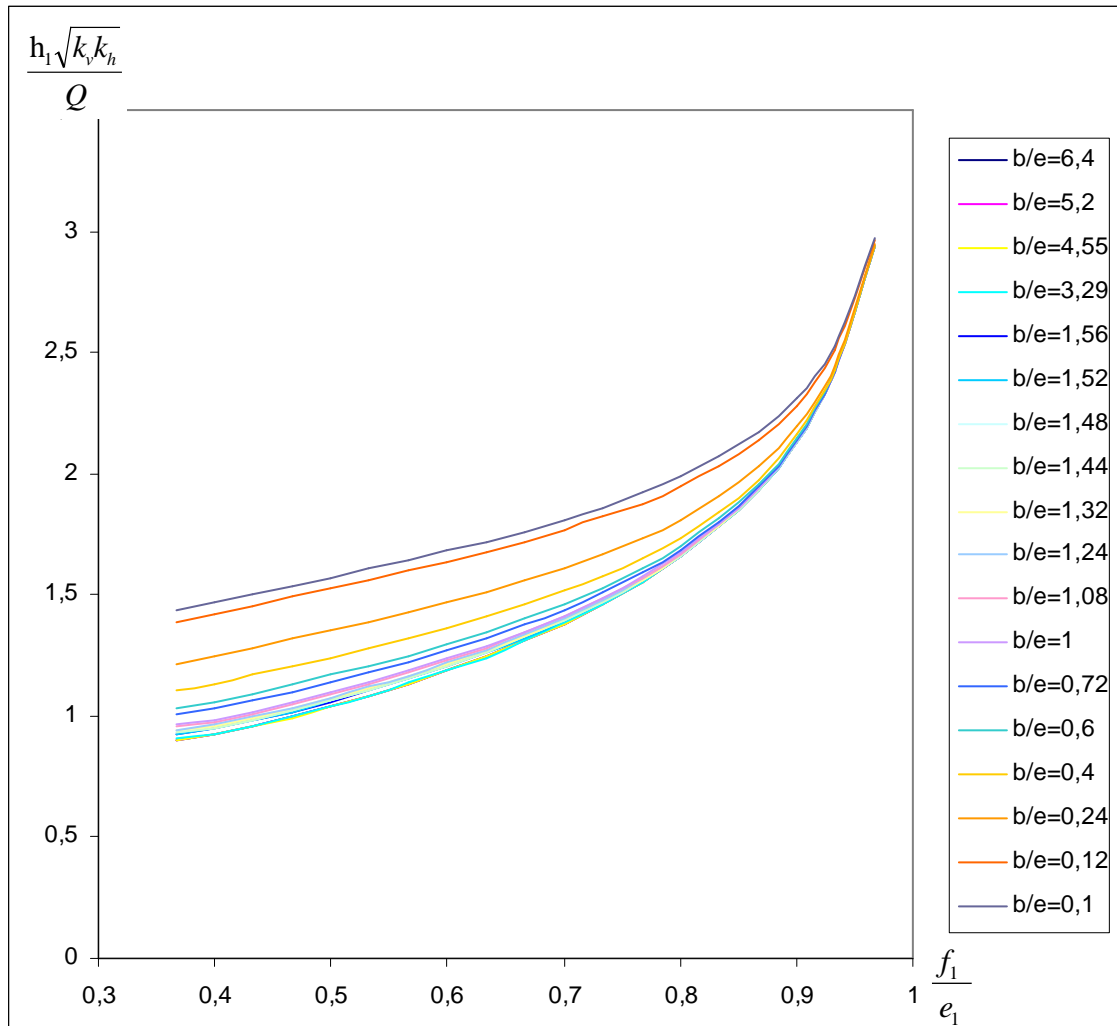
de l'écran (figure IV.10).



**Figure IV.10 :** Variations des pertes de charges en fonction de  $\frac{f_2}{e_2}$  dans le coté aval

Ø Dans le coté amont la perte de charge augmente avec l'augmentation de  $\frac{f_1}{e_1}$  c'est à dire

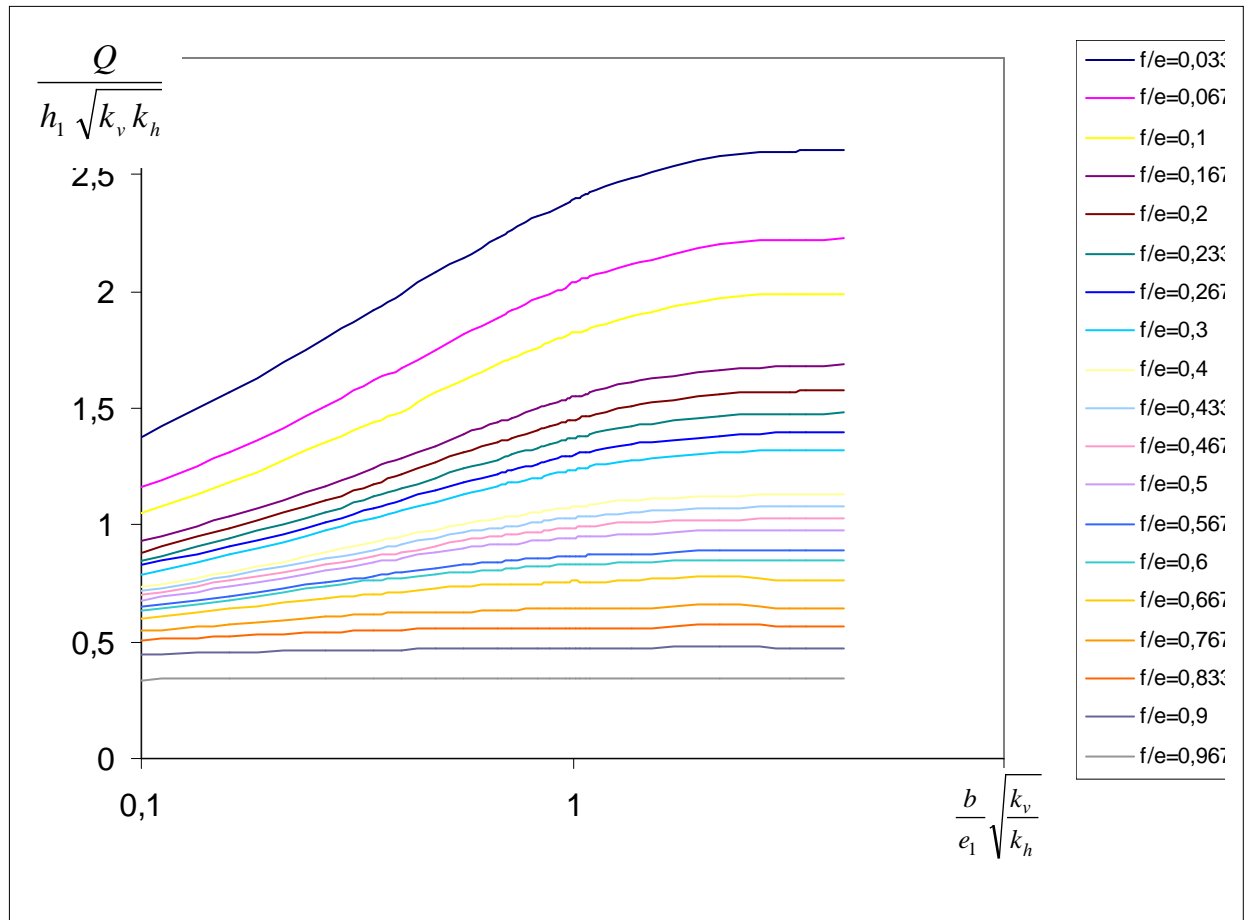
avec la longueur du trajet d'écoulement (figure IV.11), mais la perte de charge diminue avec la largeur de la fouille, et enfin elle se stabilise après une certaine valeur qui représente les fouilles larges dont les caractéristiques hydrauliques ne changent pas avec la largeur de la fouille.



**Figure IV.11 :** Variations des pertes de charges en fonction de  $\frac{f_1}{e_1}$  dans le coté amont

Ø Pour les valeurs des débits, on voit que pour les grandes valeurs de  $\frac{f_1}{e_1}$  et des valeurs du

$$\frac{b}{e_1} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}} > 1 \text{ le débit devient quasi constant (figure IV.12).}$$

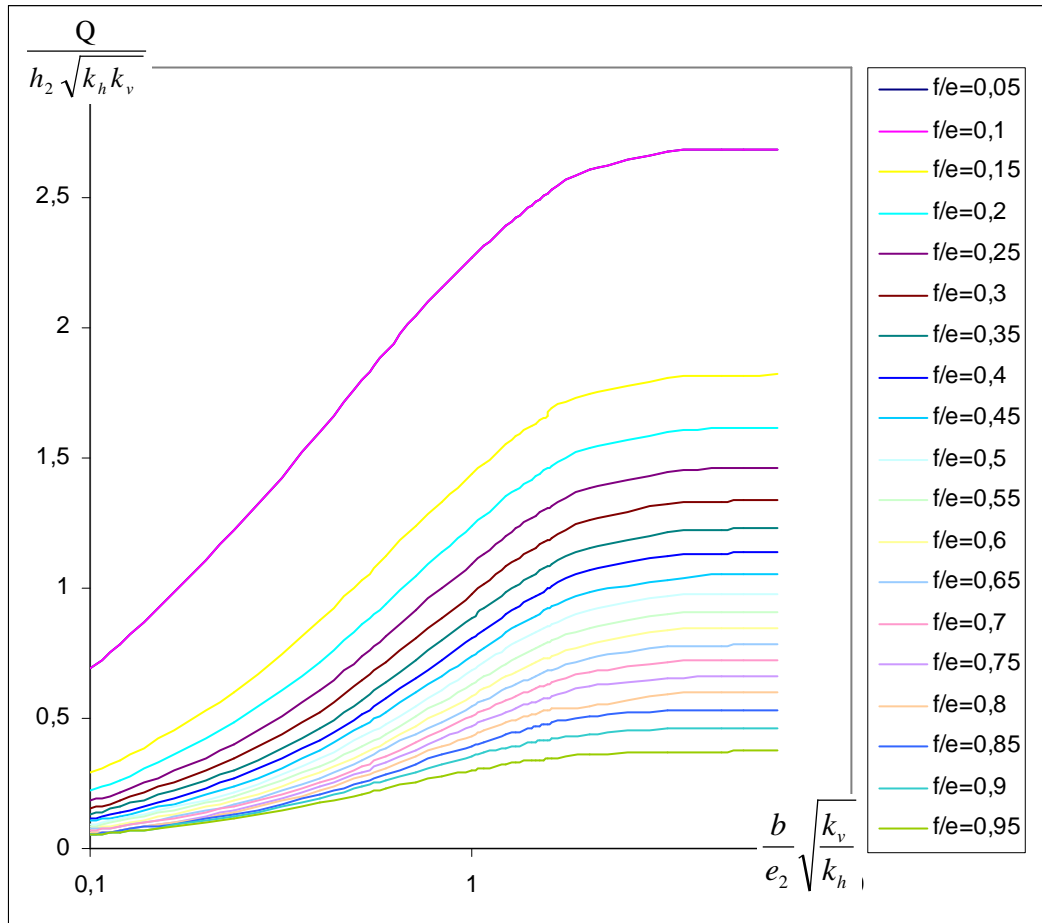


**Figure IV.12 :** Variations du débit en fonction de  $\frac{b}{e_1} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$  dans le coté amont

Ø Pour les faibles valeurs de  $\frac{b}{e_2} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$  et les fortes valeurs de  $\frac{f_2}{e_2}$ , le débit est faible, il

commence à augmenter jusqu'à la stabilité pour les valeurs de  $\frac{b}{e_2} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}} > 2.5$  (figure

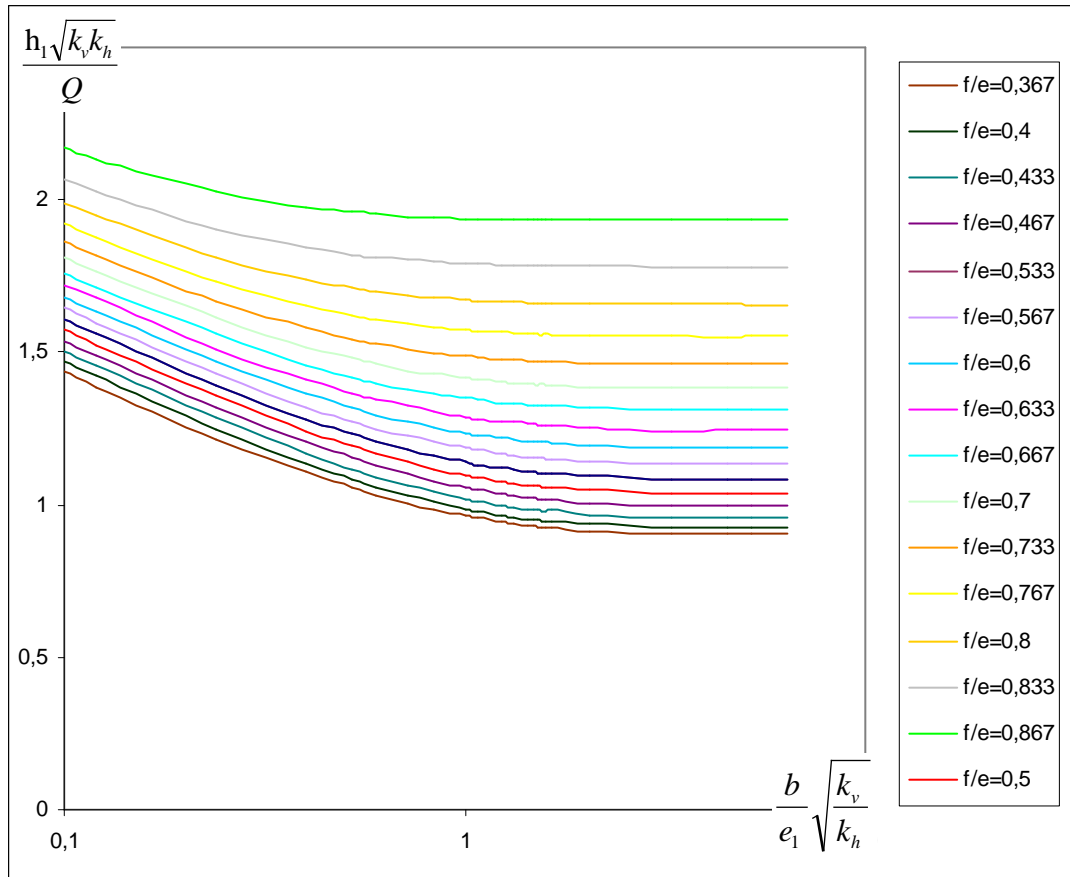
IV.13) quelle que soit  $\frac{f_2}{e_2}$ .



**Figure IV.13 :** variations du débit en fonction de  $\frac{b}{e_2} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$  dans le coté aval

Ø Les courbes qui présentent la variation de la perte de charge en fonction de la largeur relative dans le coté amont, montrent que la perte de charge augmente lorsque  $\frac{b}{e_1} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$  diminuent et  $\frac{f_1}{e_1}$  augmentent. La perte de charge devient constante pour une valeur de  $\frac{b}{e_1} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}} > 1$  (figure IV.14).





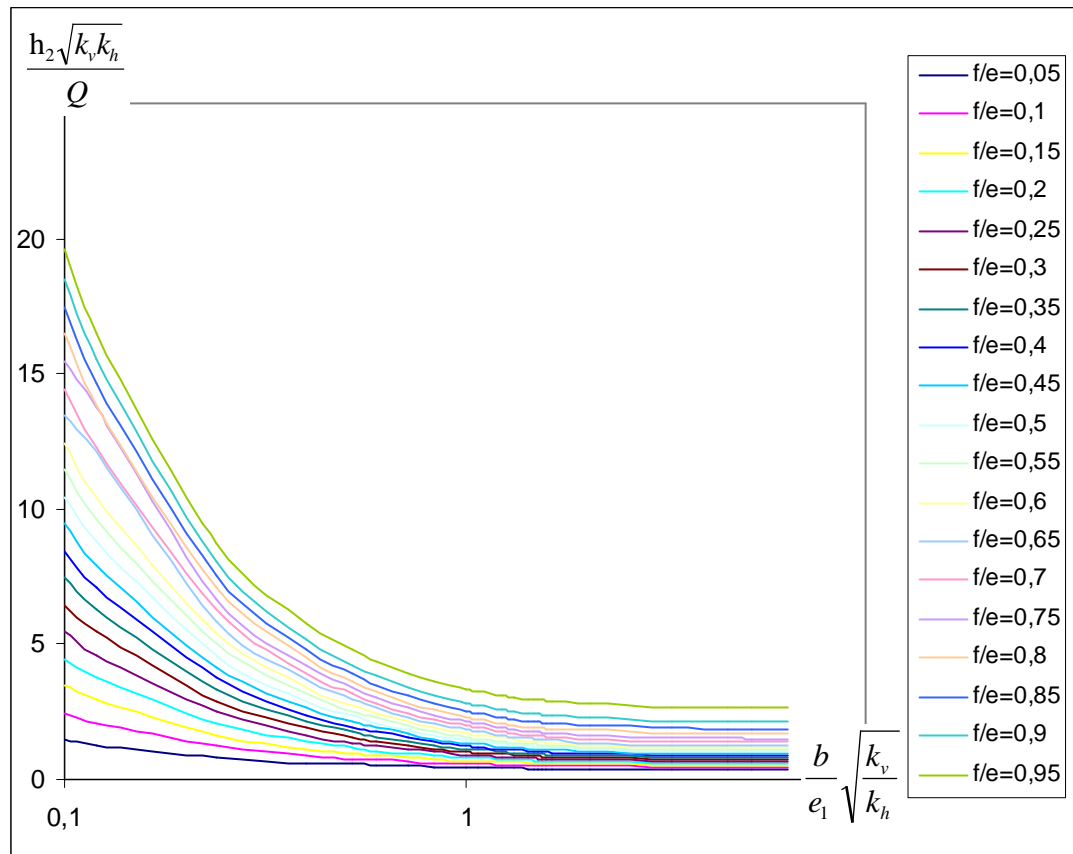
**Figure IV.14 :** variations des pertes de charges en fonction de  $\frac{b}{e_1} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$  dans le coté amont

Ø La figure IV.15 présente la variation des pertes de charges en fonction de la largeur relative, la perte de charge augmente lorsque  $\frac{b}{e_2} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$  diminue et  $\frac{f_2}{e_2}$  augmente, pour

une

valeur de  $\frac{b}{e_2} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}} > 2.5$  la perte de charge devient quasi constante, ce qui représente les

fouilles larges.

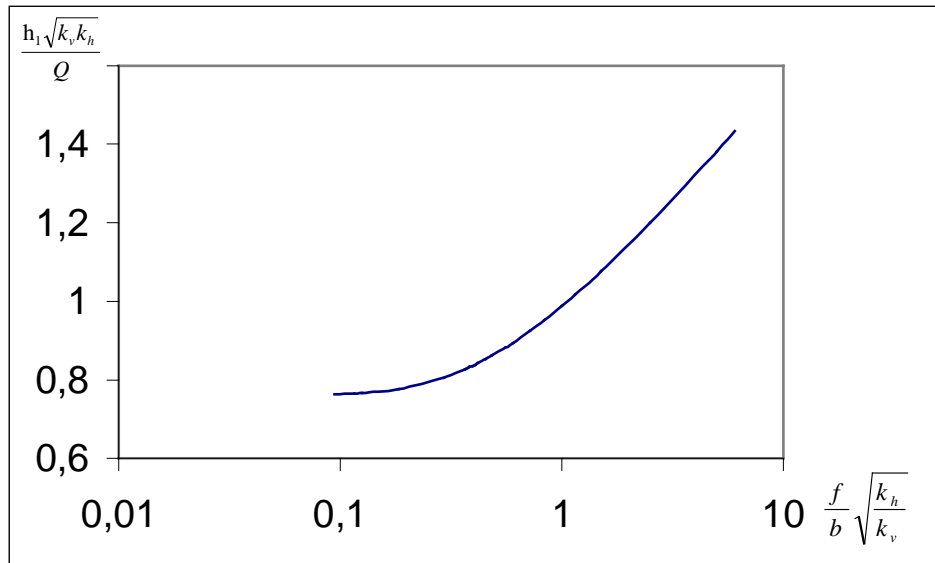


**Figure IV.15 :** variations des pertes de charges en fonction de  $\frac{b}{e_1} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$  dans le coté aval

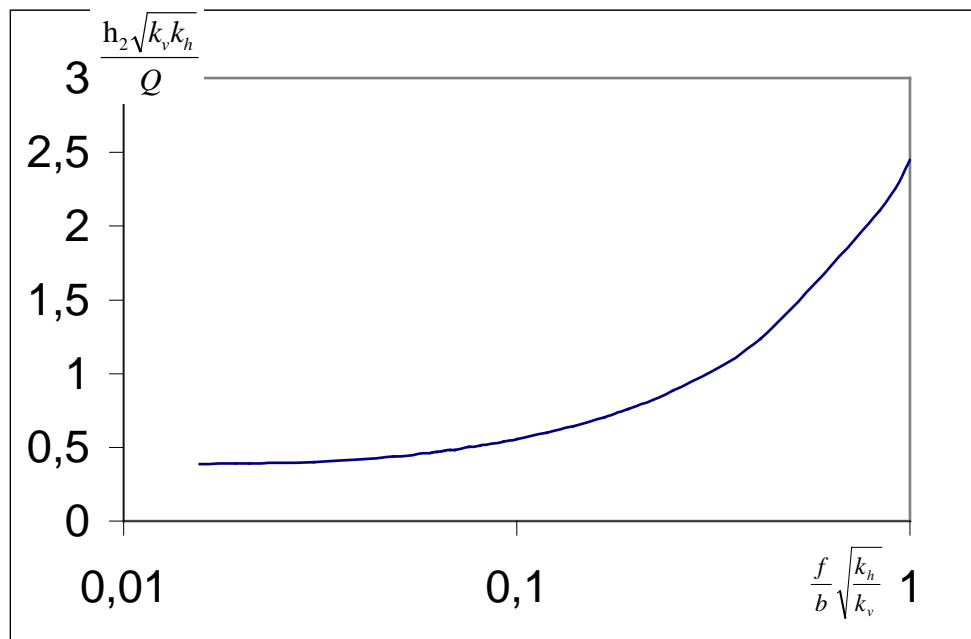
#### IV-5-2 Débit d'exhaures des batardeaux plans avec fouille dans un milieu semi infini

On dit qu'un milieu est semi infini si le milieu où le substratum n'influe pas sur les caractéristiques hydrauliques de la fouille tels que le débit, vitesse, pressions etc....

Les figures IV.16 et IV.17 présentent successivement les variations de la perte de charge en fonction de  $\frac{f}{b} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$  dans les cotés amont et aval car l'épaisseur du milieu n'influe plus sur les caractéristiques hydrauliques.



**Figure IV.16 :** variations des pertes de charges en fonction de  $\frac{f}{b} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$  dans le coté amont



**Figure IV.17:** variations des pertes de charges en fonction de  $\frac{f}{b} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$  dans le coté aval

Les pertes de charges relatives augmentent avec la fiche relative. La perte de charge dans le coté aval est plus grande que celle dans le coté amont.

### IV-5-3 Comparaison avec les résultats existants

#### IV-5-3-1 milieu fini

MANDEL a proposé deux relations pour le calcul de la perte de charge partielle de chacun des deux écoulements :

$$\text{Si } \frac{f}{e} < 0.5 \quad \frac{H\sqrt{k_v k_h}}{Q} = \frac{\pi}{2 \ln \left( 2 \cot g \left( \frac{\pi f}{4e} \right) \right)} \quad (\text{IV.5})$$

$$\text{Si } \frac{f}{e} > 0.5 \quad \frac{H\sqrt{k_v k_h}}{Q} = \frac{2 \ln \left( 2 \cot g \left( \frac{\pi}{4} \left( 1 - \frac{f}{e} \right) \right) \right)}{\pi}$$

Ø Pour le coté amont (tableau IV.7.a), l'erreur oscille entre 2% et 8.5% car Mandel néglige l'effet de la largeur du batardeau sur ses résultats.

**Tableau IV.7.a :** Comparaisons avec MANDEL

| $\frac{f_1}{e_1}$ | La perte de charge d'après MANDEL | La perte de charge d'après EAUSOL | ERREUR     |
|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------|
| 0.37              | 0,825975                          | 0,90296908                        | 0,08526769 |
| 0,4               | 0,863649                          | 0,92490549                        | 0,06623    |
| 0,433             | 0,9061257                         | 0,9561957                         | 0,05236375 |
| 0,47              | 0,9553551<br>9                    | 0,99499677                        | 0,03984092 |
| 0,5               | 0,9967722<br>5                    | 1,03687628                        | 0,03867774 |
| 0,53              | 1,04673                           | 1,08430643                        | 0,03465481 |
| 0,57              | 1,1083857                         | 1,13366317                        | 0,02229716 |

|       |                |            |            |
|-------|----------------|------------|------------|
| 0,6   | 1,157876       | 1,18715228 | 0,02466093 |
| 0,63  | 1,21069        | 1,24728255 | 0,02933782 |
| 0,67  | 1,28736        | 1,31118473 | 0,01817039 |
| 0,7   | 1,3506126      | 1,38264863 | 0,02317004 |
| 0,8   | 1,615536       | 1,65636513 | 0,02464984 |
| 0,9   | 2,0609852<br>2 | 2,1319614  | 0,0332915  |
| 0,967 | 2,7683075      | 2,93836732 | 0,05787562 |

Ø Pour les valeurs de  $1.64 < \frac{b}{e_1} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}} < 6.4$  la relation est applicable ;

Ø Pour la partie aval (tableau IV.7.b) l'erreur est comprise entre 0.007% et 6.8%.

**Tableau IV.7.b : Comparaisons avec MANDEL**

| $\frac{f_2}{e_2}$ | La perte de charge d'après MANDEL | La perte de charge d'après EAUSOL | ERREUR      |
|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------|
| 0,05              | 0,3994466<br>5                    | 0,37241098                        | 0,067682798 |
| 0,1               | 0,4852048<br>4                    | 0,47012541                        | 0,031078475 |
| 0,15              | 0,5552211<br>6                    | 0,5496243                         | 0,010080419 |
| 0,2               | 0,6189893                         | 0,61894771                        | 6,71931E-05 |
| 0,25              | 0,6800781                         | 0,68550957                        | 0,007923256 |
| 0,3               | 0,740408                          | 0,74884053                        | 0,011260788 |

|      |                |            |             |
|------|----------------|------------|-------------|
| 0,35 | 0,8012552<br>6 | 0,8142117  | 0,015912858 |
| 0,4  | 0,8636498      | 0,88105727 | 0,019757477 |
| 0,45 | 0,928513       | 0,94863743 | 0,021214039 |
| 0,5  | 0,9967722<br>6 | 1,02188419 | 0,024574141 |
| 0,55 | 1,0769910<br>5 | 1,09966489 | 0,020618861 |
| 0,65 | 1,248042       | 1,28019939 | 0,025119051 |
| 0,75 | 1,4704194      | 1,51430266 | 0,028979189 |
| 0,85 | 1,8010841      | 1,87172198 | 0,037739517 |
| 0,95 | 2,5034626      | 2,67992584 | 0,065846314 |

KASTNER a calculé la perte de charge dans le côté amont  $\rho_2$  par l'analogie électrique et  $\rho_1$  à partir de MANDEL.

On a travaillé sous les conditions suivantes :  $0.1 < \frac{b}{e_2} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}} < 6.4$  et  $0.05 < \frac{f_2}{e_2} < 0.95$

Ces deux intervalles présentent deux gammes suffisamment larges que celles de KASTNER. Alors l'écart avec nos résultats (tableau IV.8) ne dépasse pas 2%.

Pour le cas de  $\frac{f_2}{e_2} = 0.5$ :

**Tableau IV.8 :** Comparaisons avec KASTNER

| $\frac{b_1}{e_1} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$ | La perte de charge d'après EAUSOL | La perte de charge d'après KASTNER | ERREUR |
|--|-----------------------------------|------------------------------------|--------|
| 5,2                                      | 1,0220988                         | 1                                  | 0,02   |
| 4,55                                     | 1,0225044<br>4                    | 1,02                               | 0,002  |
| 3,29                                     | 1,0312177<br>7                    | 1,03                               | 0,001  |
| 2,05                                     | 1,0930081<br>2                    | 1,09                               | 0,003  |
| 1,64                                     | 1,1632820<br>5                    | 1,16                               | 0,003  |
| 1,6                                      | 1,1720212<br>7                    | 1,17                               | 0,002  |
| 1,56                                     | 1,1824451<br>4                    | 1,18                               | 0,002  |
| 1  | 1,4650416<br>6                    | 1,455                              | 0,007  |
| 0,84                                     | 1,6362709<br>2                    | 1,64                               | 0,002  |
| 0,72                                     | 1,8223416<br>9                    | 1,83                               | 0,004  |
| 0,6                                      | 2,0874023<br>4                    | 2,1                                | 0,006  |

#### IV-5-3-2 milieu semi infini

Le tableau IV.9 présente les valeurs des erreurs comparées avec CARDINAL et De CASENOV, on remarque que l'erreur augmente avec l'augmentation de  $\frac{f}{b} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$  et atteint

Le maximum 16% pour une grande valeur de  $\frac{f}{b} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$  qui est égale 9, pour les faibles valeurs de  $\frac{f}{b} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$ , l'erreur maximale est de 6%.

On peut dire que l'abaque de CARDINAL et DECASENOV est valable pour les fouilles larges et les fiches courtes.

**Tableau IV.9 :** Comparaisons avec CARDINAL et DECASENOV

| $\frac{f}{b} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$ | La perte de charge d'après EAUSOL | La perte de charge d'après cardinal | ERREUR |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------|
| 2,00E+00                             | 1,6009                            | 1,7                                 | 0,06   |
| 6,00E+00                             | 1,7                               | 2                                   | 0,006  |
| 1,00E+01                             | 1,9122                            | 2,17                                | 0,11   |
| 9,00E+00                             | 1,988                             | 2,1                                 | 0,16   |

BRILLANT propose pour les fouilles larges en milieu semi infini la relation suivant :

$$\frac{Q}{kh} = \frac{1}{\ln 2 \frac{b}{f_2}} \quad (\text{IV.6})$$

Cette relation est applicable pour des faibles valeurs de  $\frac{f}{b} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$ .

Û Pour des valeurs de  $\frac{f}{b} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$  supérieurs a 0.075 et inférieur a 0.02 l'erreur dépasse

40%

Û Pour des valeurs de  $\frac{f}{b} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$  entre 0.02-0.075 l'erreur est comprise entre 3% et 9%.

(Tableau IV.10)



Tableau IV.10: Comparaisons avec BRILLANT

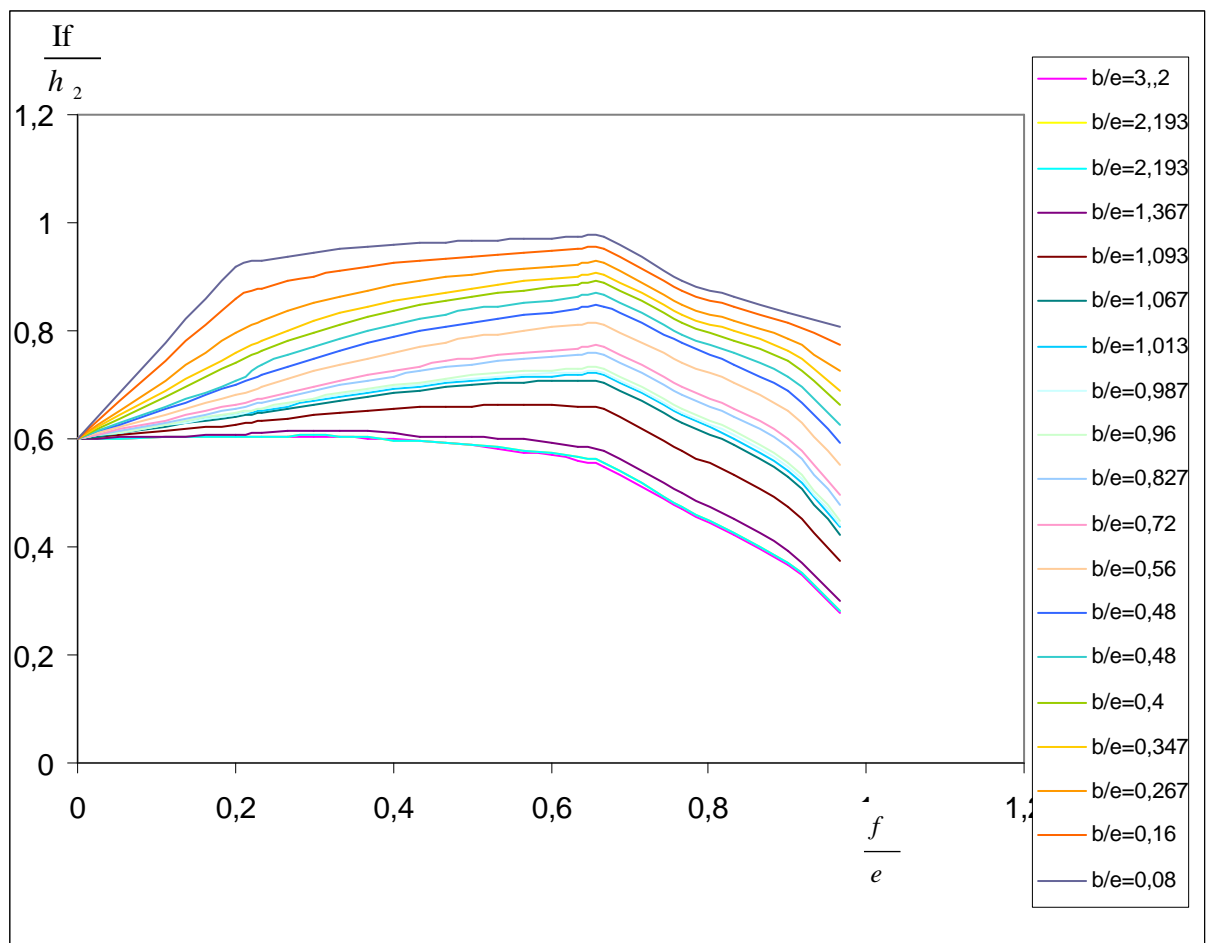
| $\frac{f}{b} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$ | Le débit d'après<br>BRILLANT | Le débit d'après<br>EAUSOL | ERREUR     |
|--------------------------------------|------------------------------|----------------------------|------------|
| 0,015625                             | 0,64715178                   | 0,76350372                 | 0,15239211 |
| 0,0192307                            | 0,67608435                   | 0,76515597                 | 0,11640976 |
| 0,02083333                           | 0,68794051                   | 0,76727972                 | 0,10340325 |
| 0,03039514                           | 0,75000839                   | 0,77628959                 | 0,0338549  |
| 0,04878049                           | 0,84554708                   | 0,80579977                 | 0,0470078  |
| 0,06097561                           | 0,89960301                   | 0,82766469                 | 0,07996674 |
| 0,0625                               | 0,90601249                   | 0,83036619                 | 0,08349365 |
| 0,06410256                           | 0,91267977                   | 0,83326803                 | 0,08700942 |
| 0,06578947                           | 0,91962301                   | 0,8357186                  | 0,09123784 |
| 0,06944444                           | 0,9268622                    | 0,83904358                 | 0,0947483  |
| 0,0757575                            | 0,93441941                   | 0,8426071                  | 0,098256   |
| 0,08064516                           | 0,95925781                   | 0,85357269                 | 0,11017385 |
| 0,09259259                           | 0,97793612                   | 0,86264921                 | 0,11788798 |
| 0,1                                  | 1,02190478                   | 0,8819934                  | 0,13691234 |
| 0,11904762                           | 1,04815775                   | 0,8949422                  | 0,14617604 |
| 0,13888889                           | 1,11293099                   | 0,92375411                 | 0,16998078 |
| 0,16666667                           | 1,1772521                    | 0,9526241                  | 0,19080704 |
| 0,16666667                           | 1,26362896                   | 0,98860732                 | 0,2176443  |
| 0,19230769                           | 1,3408456                    | 1,01821221                 | 0,24061934 |
| 0,25                                 | 1,51002081                   | 1,07647059                 | 0,2871154  |
| 0,41666667                           | 2,00176472                   | 1,20004873                 | 0,4005046  |
| 0,83333333                           | 3,58665006                   | 1,38158124                 | 0,61479899 |
| 1                                    | 4,53006243                   | 1,43255922                 | 0,68376612 |

## IV-6 GRADIENT DE SORTIE DANS LES BATARDEAUX PLANS SANS FOUILLE

### IV-6-1 Gradient de sortie dans les batardeaux plans sans fouille dans un milieu fini

La figure IV.18 présente les valeurs du gradient de sortie obtenues par le calcul numérique en fonction de la fiche relative du batardeau.

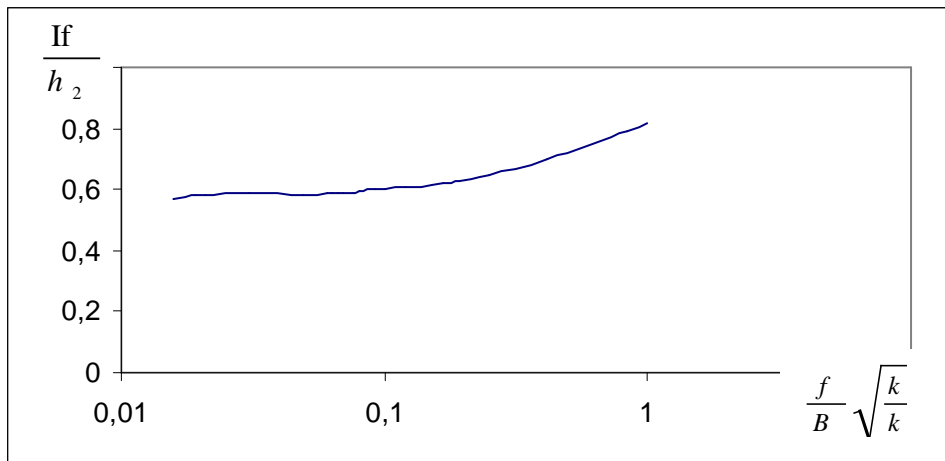
On remarque que l'influence de la largeur de la fouille devient négligeable dès que  $\frac{b}{e} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$  atteint la valeur de 2.5, à partir de cette valeur une courbe unique représente les fouilles larges.



**Figure IV.18** : la variation du gradient de sortie en fonction de la fiche relative  $\frac{f}{e}$

#### IV-6-2 Gradient de sortie dans les batardeaux plans sans fouille dans un milieu semi infini

La figure IV.19 présente la variation du gradient de sortie en fonction de la fiche relative dans un milieu semi infini, en remarque que la courbe est constante pour des valeurs du gradient comprises entre 0.5 et 0.6 quelle que soit la valeur de la fiche relative qui représente les batardeaux larges, à partir de la valeur de  $\frac{f}{b} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$  égale 0.1 les valeurs du gradient augmentent ce qui représente les batardeaux étroits.

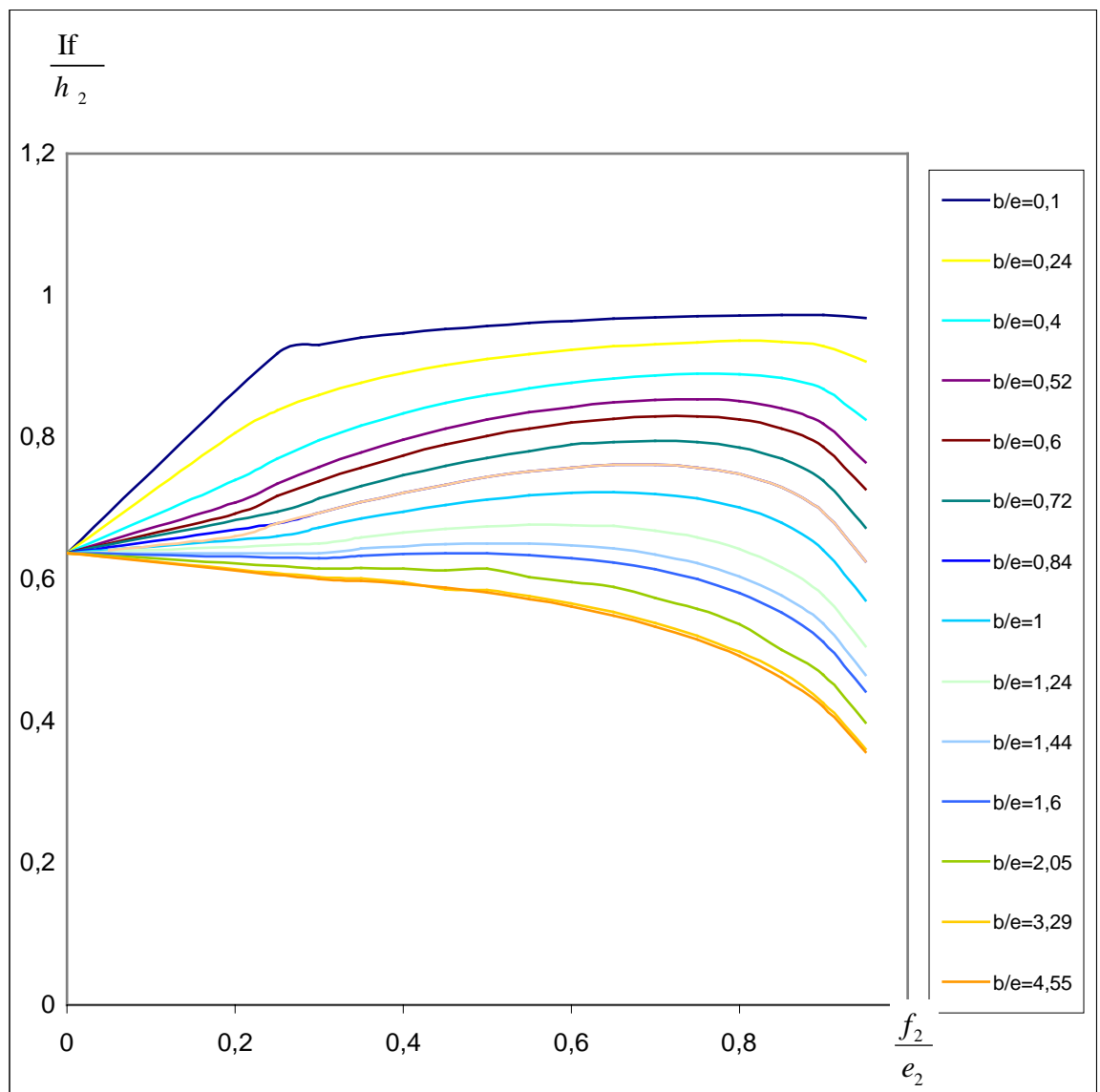


**Figure IV.19:** la variation du gradient de sortie en fonction de  $\frac{f}{B} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$

#### IV-7 GRADIENT DE SORTIE DANS LES BATARDEAUX PLANS AVEC FOUILLE

##### IV-7-1 gradient de sortie dans les batardeaux plans avec fouille dans un Milieu fini

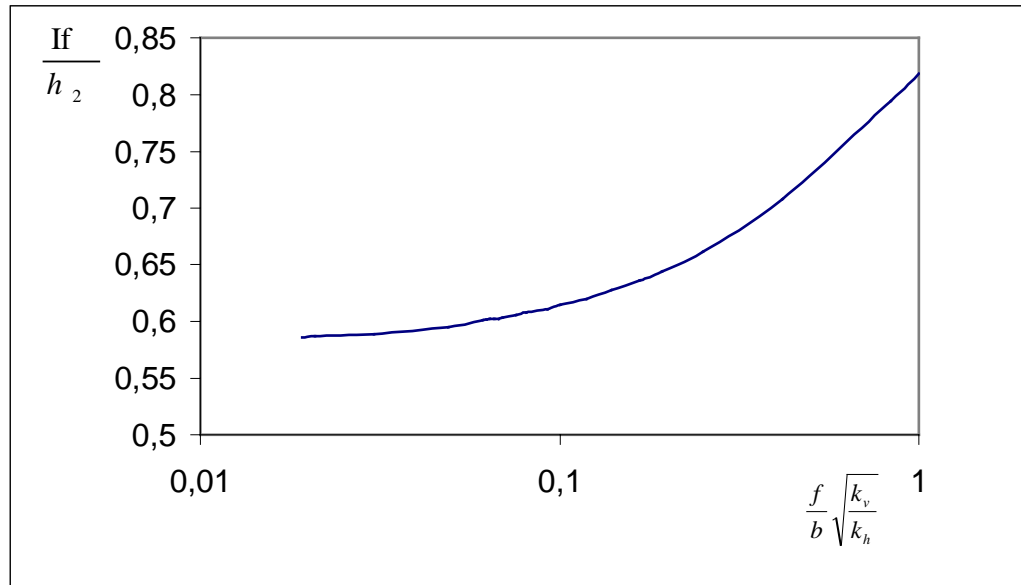
La figure IV.20 donne les valeurs du gradient hydraulique de sortie en fonction de la largeur relative de la fouille et la fiche relative, à partir des résultats obtenus numériquement, on constate que le gradient de sortie diminue avec l'augmentation de la largeur relative et la fiche relative, cela est dû à l'augmentation de la trajectoire d'écoulement, et on remarque aussi que la valeur du gradient reste constante pour les fouilles larges.



**Figure IV.20 :** la variation du gradient de sortie en fonction de la fiche relative  $\frac{f_2}{e_2}$

#### IV-7-2 gradient de sortie dans les batardeaux plans avec fouille dans un milieu semi infini

Dans la figure IV.21, il y a une légère stabilité puis une augmentation de la valeur du gradient.



**Figure IV.21:** la variation du gradient de sortie en fonction de  $\frac{f}{b} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$

#### IV-8 CALCUL PRATIQUE DES GRADIENT MOYEN ET GRADIENT DE SORTIE

L'application de cette méthode de calcul du soulèvement en masse au cas de l'écran fiché dans des milieux fini et semi infini est facilitée par la connaissance précise du Champ de potentiel, sous forme d'abaques. Elle n'est plus difficile à mettre en œuvre dans le cas d'un batardeau quelconque.

A cause de la mise en œuvre lourde et l'hétérogénéité du milieu, on estime, comme KASTNER, la sécurité vis-à-vis du renard (au sens plus large) à partir de critères simples pouvant être calculés facilement. Ces critères sont le gradient de sortie  $i_e$  et le gradient moyen  $i_m$ . Le gradient de sortie indiquera le rabattement (lorsque  $i_e = i_c$ ) provoquant de manière certaine des désordres en fond de fouille. Le gradient moyen donnera, en association avec les résultats présentés dans les figures précédentes, une bonne indication de risque de soulèvement généralisé.

### IV-8-1 Calcul du gradient moyen

Si l'on définit  $h_2$  comme la perte de charge entre le pied de l'écran et le fond de fouille (figure IV.3) le gradient moyen est donné par la relation  $i_m = h_2 / f$ . Ainsi la détermination du gradient moyen se limite à la détermination de  $h_2$ .

La méthode de calcul proposée est la suivante:

- On calcule  $\rho_1$  et  $\rho_2$  à partir des figures IV.10, IV.11, IV.14, IV.15, IV.16, IV.17, selon le cas.
- On détermine le débit en fonction de la perte de charge totale  $H$ , de la perméabilité et de  $\rho_1$  et  $\rho_2$ .

$$\frac{Q}{H \cdot \sqrt{K_v \cdot K_h}} = \frac{1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (\text{IV.7})$$

$$Q = \frac{H \sqrt{K_v \cdot K_h}}{\rho_1 + \rho_2} \quad (\text{IV.8})$$

- La perte de charge  $h_2$  est calculée en fonction du débit déterminé dans l'étape précédente et de  $\frac{h_2 \sqrt{k_v k_h}}{Q}$
- Le gradient moyen est donné par la relation  $i_m = h_2 / f$ .

### IV-8-2 Calcul du gradient de sortie

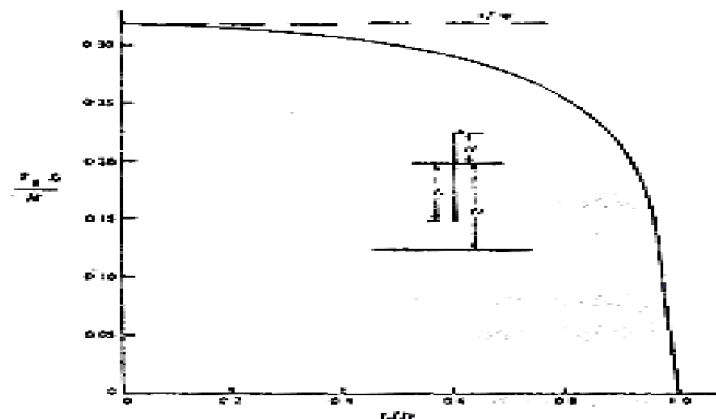
Divers autres (CRAY et NAIR, 1967, MCNAMEE, 1949 ; HARR 1962, KRIZEK, 1968 ; REDDY, 1971) ont proposé des abaques plus au moins complets pour le calcul du gradient de sortie. Ils considèrent tous l'écoulement global, ce qui conduit à exprimer  $i_e$  en fonction d'un nombre important de paramètre.

On propose, un calcul approché en reprenant l'hypothèse déjà adoptée pour le calcul de  $h_2$ , on a examiné la variation de la quantité sans dimensions  $i_e f/h_2$  en fonction de  $f_2/e_2$  et ce calcul a été réalisé pour les différents écoulements vers un batardeau quelconque.

Les courbes ont été extrapolées en tenant compte de la valeur théorique  $i_e f/h_2 = 2/\pi$  lorsque  $f/e$  tend vers zéro.

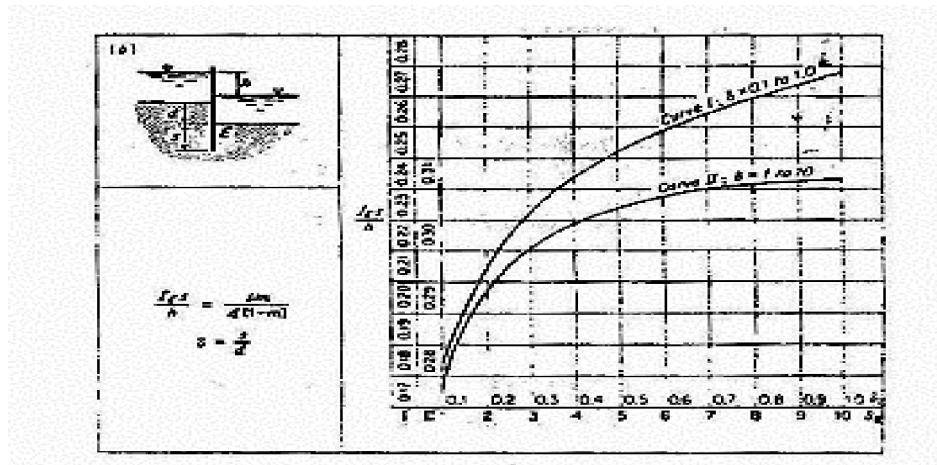
On note que le calcul n'est pas précis pour les faibles valeurs de  $f/e$ . On propose ainsi une méthode de calcul simple et rapide du gradient de sortie, comprenant deux étapes :

- On calcule d'une part la valeur du gradient de sortie adimensionnel  $i_e f/h_2$  à l'aide des abaques des figures IV.18, IV.19, IV.20, IV.21 selon le cas.
- On calcule ensuite  $h_2$  suivant le processus décrit au paragraphe précédent d'où la valeur de  $i_e$
- On complète ces abaques par ceux de KHOSLA et al (1954) (figure IV.22) et de GRAY et NAIR (1962) (figure IV.23), ces deux derniers sont très commodes dans le cas particulier des fiches faibles.



**Figure IV.22** : Ecran coupant une couche d'épaisseur limitée

(D'après GRAY et NAIRE, 1962)



**Figure IV.23** : Ecran dans une couche d'épaisseur infinie

(D'après KHOSLA et al, 1954)

Comme le gradient de sortie  $i_e$  contrôle la bouclage. Il est donc impératif qu'il soit inférieur à la valeur critique  $i_e = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$  soit :

$$i_e < (\gamma' / \gamma_w) / F \quad (\text{IV.9})$$

Avec F coefficient de sécurité. F devra essentiellement « corriger » les effets de l'hétérogénéité qui peuvent affecter soit localement, soit globalement (milieu stratifié) le gradient de sortie.

#### IV-9 CONCLUSION

Le calcul numérique des variations du débit et des pertes de charges a été effectué à l'aide du logiciel EAUSOL.

L'analyse des présents résultats numériques comparés à ceux de plusieurs auteurs permet les conclusions suivantes :

Pour le cas d'un batardeau plan sans fouille:



- Les résultats de la simulation pour les batardeaux dans un milieu fini confirment les résultats publiés par KASTNER, l'erreur ne dépasse pas le 2%.
- La relation de CAMBFORT est applicable à condition que  $\frac{f}{e}$  appartienne à l'intervalle [0,4, 0,8], l'erreur est comprise entre 1 et 9% ;
- Pour MANDEL, le domaine d'application est valable pour les fouilles larges et les fiches courtes;
- Pour les batardeaux dans un milieu semi infini, l'écart de nos résultats avec ceux de KASTNER ne dépasse pas le 0,9% ;
- Les relations de SCHNEEBILI sont valables dans un milieu semi infini. L'erreur est inférieure à 4% ;
- Le domaine d'application de la relation de BRILLANT est valable dans un milieu semi infini lorsque  $\frac{f}{b} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$  est supérieur à 0,067. L'erreur ne dépasse pas 14%;

Pour le cas d'un batardeau plan avec fouille:

- La relation de MANDEL est applicable pour des valeurs de  $1,64 < \frac{b}{e_1} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$  (fouilles larges), l'erreur oscille entre 2% et 8% pour le coté amont et 0,007% et 6,6% pour le coté aval;
- L'écart de nos résultats avec ceux de KASTNER ne dépasse pas 2%;

- Pour CARDINAL et DE CASENOV et dans un milieu semi infini l'erreur augmente avec  $\frac{f}{b} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$  et atteint 16%, pour les faibles valeurs de  $\frac{f}{b} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$ , l'erreur ne dépasse pas 6% ;
- Les relations de BRILLANT sont applicables pour les faibles valeurs de, en effet pour les valeurs de  $\frac{f}{b} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$  comprises entre 0.02 et 0.075, la relation est applicable et l'erreur atteinte oscille entre 3% et 9% ;

Pour les gradients hydrauliques

- Le gradient de sortie diminue avec l'augmentation de la largeur relative et la fiche relative, cela est dû à l'augmentation de la trajectoire d'écoulement ;
- La valeur du gradient de sortie reste constante pour les fouilles larges, ainsi une courbe unique représente Le gradient de sortie.