

## CHAPITRE III

# SIMULATION NUMERIQUE BI ET TRIDIMENSIONNELLE DE L'ÉCOULEMENT AUTOUR DES ECRANS ETANCHES

### III.1 INTRODUCTION

La construction d'un ouvrage de géotechnique se traduit par une succession de travaux qui intéressent à chaque fois des volumes de sol limités et des géométries parfois compliquées (sols hétérogènes, phasage de travaux, fouilles en zones urbaines, etc.). En toute rigueur, l'étude de la stabilité en cours de construction et l'estimation des déformations induites sur l'environnement sont donc des problèmes tridimensionnels.

En revanche, pour l'étude de l'ouvrage une fois construit, il est possible dans certaines conditions de ramener le problème tridimensionnel à l'étude d'une coupe transversale ou longitudinale : c'est le cas notamment pour des ouvrages de grande largeur (tunnels à axe horizontal, quais, grands remblais, etc.). Les premiers calculs tridimensionnels ont été réalisés, à la fin des années 1960, mais c'est très récemment que des modèles représentatifs de réalité ont pu être envisagés. Ces modèles restent encore relativement grossiers et le calcul tridimensionnel difficile à mener.

Compte tenu des problèmes de mise en œuvre, il paraît difficile d'envisager une utilisation courante des modèles tridimensionnels pour le dimensionnement des ouvrages, du moins dans les quelques années à venir. Cependant, ce type de calcul est devenu abordable et il peut être mené de manière raisonnable pour étudier des ouvrages exceptionnels, des groupes de structures ou à des fins de recherche pour analyser des procédés particuliers de construction que l'on ne saurait pas aborder autrement.

D'une manière générale, en toute rigueur, un calcul tridimensionnel devrait être en réalité dans les cas suivants :

- l'effet de la troisième dimension est important ;
- aucune simplification géométrique n'est raisonnablement envisageable ou aucune symétrie n'est exploitable à cause des structures ou des terrains ;
- forte hétérogénéité des couches de sol, avec la présence des failles ou de lentille ;
- ouvrage de soutènement (mur en T, effets de bord, *coins* d'une fouille) ;
- barrage voûte en milieu rocheux (vallée étroite).

En outre, les calculs en *trois dimensions* sont beaucoup plus lourds que les calculs en deux dimensions (en déformation *plane* ou en *axisymétrie*), donc porteur plus d'erreur plus difficiles à repérer ; mais il n'est pas toujours possible de se contenter de modèle 2D. Des modèles simples peuvent rendre de grands services, pour justifier un ouvrage, pour recouper les conclusions d'un modèle plus élaboré, ou tout simplement pour comprendre les mécanismes.

Selon Einstein, il faut toujours simplifier au maximum les problèmes mais ne jamais trop les simplifier. Le modélisateur doit toujours respecter cette règle, mais il est parfois malaisé d'apprécier si l'on en fait trop ou pas assez (est-ce là que l'incertitude de la mécanique quantique reçoit la relativité). En mécanique des sols appliqués, les paramètres sont connus de manière quelque peu aléatoire, et tous les problèmes sont tridimensionnels.

Le calcul de certains ouvrages en géotechnique requiert la résolution des problèmes tridimensionnels et non linéaires. L'aspect tridimensionnel résulte de diverses origines, notamment la géométrie et le chargement. A titre d'exemple, on peut citer les calculs de fondations profondes ou superficielles soumises à des chargements symétriques, le calcul de tunnels en terrain meuble, et l'étude de l'interaction entre les ouvrages enterrés ou en surface.

La puissance sans cesse croissante des moyens de calcul offre à l'ingénieur des « solutions de facilité » ; s'il est pressé, en s'appuyant sur des « boîtes noires ».

Ce **chapitre** porte sur la modélisation numérique *bi et tridimensionnelle* de l'écoulement autour des batardeaux de forme *carré, rectangulaire et circulaire*. L'objectif est d'illustrer ce

problème en trois dimensions et en axisymétrie, ainsi la comparaison de toutes les relations théoriques et méthodes développées dans les chapitres précédents. On présente l'application du modèle pour des cas de prévision qui peuvent être rencontrés dans la pratique.

Les calculs ont été réalisés en utilisant le code de calcul aux différences finies Flac3D et Flac2D.

Nous nous intéressons dans ce chapitre exclusivement aux calculs hydrauliques du débit d'exhaure et pertes de charge hydrauliques. Le phénomène de renard causant la perturbation de la stabilité du batardeau et du fond de fouille, sera la tache du chapitre qui suivra. Dans ce sens, nous avons effectué plusieurs tests pour valider les résultats de calcul numérique.

La démarche adoptée dans ce travail est de commencer par un modèle simple de vérification, puis d'effectuer des analyses successives en mettant en jeu des différents cas de simulation en jouant sur les différents paramètres du modèle.

Dans la suite, nous présenterons d'abord la procédure de simulation du modèle numérique. Une fois le modèle est établi, on étudie la modélisation d'un batardeau *carré*, *rectangulaire* symétriques et d'un batardeau *circulaire* axisymétrique, afin de vérifier la convergence du calcul, la fiabilité des relations théoriques utilisées en écoulement plan et leurs conditions d'application, etc. Puis une comparaison entre la modélisation *bidimensionnelle* et *tridimensionnelle* est réalisée pour tous les cas étudiés. Cette modélisation permet de calculer les différents paramètres hydrauliques tels que le débit d'exhaure, les pertes de charge en fonction du côté du carré, du rectangle et de la fiche relative pour les batardeaux carré et rectangulaire et en fonction du rayon et de la fiche relative du batardeau circulaire.

## III.2 SIMULATION NUMERIQUE

### III.2.1 Procédure de simulation en Flac3D

Pour exécuter une analyse par le code Flac3D, des étapes spécifiques doivent être considérées dans n'importe quelle modélisation, ces étapes sont les suivantes :

- génération du maillage ;
- conditions initiales et aux limites ;
- choix du modèle constitutif et propriétés du matériau ;
- chargement et séquence de modélisation ; et
- interprétation des résultats.

### III.2.2 Maillage et conditions aux limites

De nombreux problèmes d'hydraulique des sols peuvent être ramenés à des problèmes bidimensionnels :

- lorsqu'une dimension de l'ouvrage est prépondérante par rapport aux deux autres, et que la géométrie tridimensionnelle des couches de sol se prête à une simplification plane, l'écoulement est étudié dans un plan perpendiculaire à cette direction ;
- lorsque l'ouvrage et le massif de sol présentent une *symétrie de révolution*, l'écoulement est analysé à l'aide d'un modèle axisymétrique.

Toutefois, rien n'empêche de réaliser des modèles tridimensionnels, si ce n'est toujours la taille du modèle (nombre de nœuds et d'éléments finis). La réalisation des maillages obéit à des règles, afin d'éviter des problèmes numériques et des instabilités, il est nécessaire de raffiner le maillage :

- dans les zones où des gradients importants sont attendus, c.-à-d. dans les parties les plus sollicitées au voisinage de l'écran étanche et la partie où le débit sortant est calculé, elle constitue la partie à excaver et elle est sollicitée au *soulèvement* et à la *déformation* ;
- au niveau du pied de l'écran étanche et sous le fond de fouille ;
- autour des frontières à charge hydraulique imposée ;
- au voisinage des singularités géométriques ou des changements de matériaux ; et
- au voisinage des singularités hydrauliques (point d'intersection entre une équipotentielle et une frontière imperméable).

### III.3 DEBIT D'EXHAURE DES BATARDEAUX TRIDIMENSIONNELS SANS FOUILLE – MILIEU FINI - ALIMENTATION VERTICALE

#### III.3.1 Cas de batardeaux tridimensionnels carrés sans fouille dans un milieu fini

##### III.3.1.1 Présentation des cas étudiés

On considère le cas d'un batardeau de forme carrée de côté  $b = 2r$  pénétrant d'une profondeur  $f$  où  $f$  est la fiche du batardeau, dans un sol homogène anisotrope reposant sur une base imperméable. La couche de sol a une épaisseur  $e$ . Cet écran a une épaisseur  $E'$  est soumis à une charge hydraulique  $H$  comme indiqué sur la Figure III.1.

L'objectif du problème est d'évaluer le débit d'exhaure en fonction du côté  $b=2r$  et de la fiche relative du batardeau carré, ainsi de vérifier le cas où l'effet *tridimensionnel* devient négligeable au terme du débit, c.-à-d. le cas des batardeaux larges.

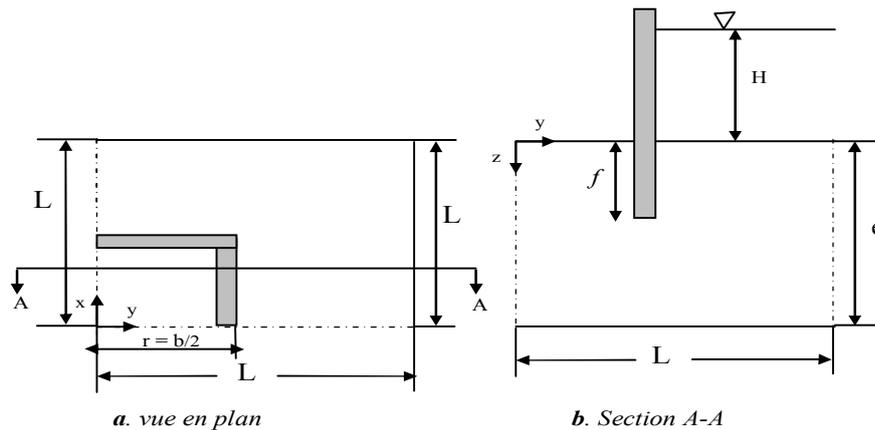


Figure III.1. Batardeau carré sans fouille (un quart du modèle).

##### III.3.1.2 Maillage et conditions aux limites

Le problème traité est à trois dimensions mais, par symétrie, un *quart* du domaine est considéré dans l'analyse. Le système des axes de coordonnées est défini avec l'origine au centre du côté aval dans le plan de la surface de sol, et l'axe de  $z$  descendant. Dans ces modèles, les limites à  $|x| = L$  et  $|y| = L$  sont vues comme plans de symétrie. La Figure III.1 montre un croquis des conditions du problème.

Le comportement du sol est considéré comme un matériau *élastique* car on s'intéresse exclusivement dans cette partie du travail aux calculs hydrauliques. Le sol et l'eau ont les propriétés suivantes:

- Le module volumique,  $K = 390 \text{ MPa}$  ;
- Le module de cisaillement,  $G = 280 \text{ MPa}$  ;
- La densité sèche du sol,  $\rho_d = 1200 \text{ kg/m}^3$  ;
- La densité de l'eau,  $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$  ;
- Le module  $g$  du vecteur de gravité peut être rapproché à  $10 \text{ m/s}^2$ .
- La densité de l'écran,  $\rho_{\text{écran}} = 1500 \text{ kg/m}^3$  ;
- La perméabilité,  $k = 10^{-10} \text{ m/s}$  ;
- La porosité,  $n = 0,3$  ;
- Le module volumique de l'eau,  $k_f = 10^3 \text{ Pa}$  ;

La Figure III.2 montre à titre d'exemple les dimensions du maillage adopté pour la simulation en Flac3D. Ce maillage est raffiné au voisinage de l'écran et la partie où le débit sortant est calculé. Afin de voir l'influence du côté du batardeau (augmentation ou décroissance), on fait varier l'étendu du modèle avec le rapport  $2r/e$ . Le Tableau III.1 montre la variation des dimensions du modèle avec le rapport  $2r/e$  et  $f/e$ .

Tableau III.1. Variation des dimensions du modèle adopté Flac3D en fonction de  $2r/e$ .

$f/e$	$2r/e$	$r$ (m)	$e$ (m)	$L = (4*f) + r$ (m)
0,125	0,25	1	8	5
0,25	0,375	1,5	8	5,5
0,375	0,5	2	8	6
0,5	0,67	2,68	8	6,68
0,625	1,34	5,36	8	9,36
0,75	2,7	10,8	8	14,8
0,875	5	20	8	24
	7	28	8	32
	8,75	35	8	39
	10	40	8	44

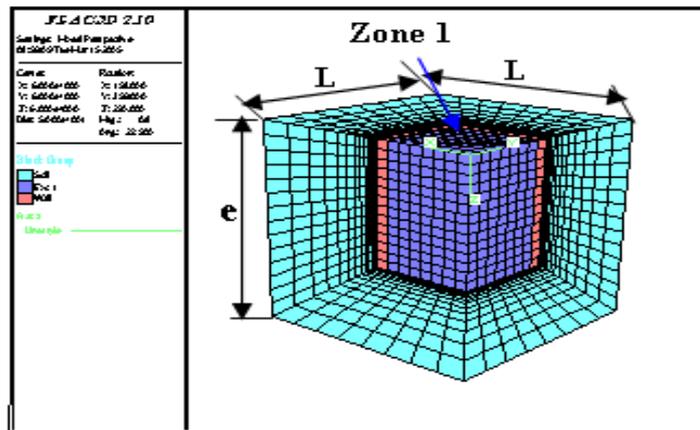


Figure III.2. Le maillage adopté en Flac3D - Batardeau carré sans fouille.

- On note qu'en code Flac les limites non déclarées sont considérées comme des limites imperméables (lignes de courant). Par contre, on fixe la pression hydraulique à l'amont à  $P = \rho g H_1$ , avec  $H_1$  la charge hydraulique appliquée en amont (Figure III.1), et la pression à  $P = 0$  (où  $H_2 = 0$ , avec  $H_2$  la charge hydraulique appliquée dans le côté aval, sur les limites où  $x = y = r = b/2$ , Figure III.1) qui représente une surface équipotentielle.

### III.3.1.3 Procédure de modélisation numérique

Le modèle en Flac3D a des dimensions  $X \times Y \times Z$  ; le maillage a un nombre total de zones cubiques de  $X \times Y \times Z$  de dimensions  $x \times y \times z$ . Un modèle nul d'écoulement d'eau est attribué aux zones de l'écran, et un modèle mécanique nul est attribué aux zones du modèle.

Pour des raisons numériques et afin d'accélérer la convergence du modèle numérique, le module volumique de l'eau  $K_f$  est pris égal à  $10^3$  Pa. Un test préalable sur ce modèle a permis de vérifier la pertinence de cette approximation et la convergence rapide du modèle adopté.

On rappelle que l'objectif de ces simulations est de tester le modèle *tridimensionnel* et *axisymétrique* sur des cas proches à des situations de la pratique, par confrontation avec les méthodes de calcul analytiques en écoulement plan et l'approche tridimensionnel en s'appuyant sur les résultats de simulations de Franke et Davidenkoff, 1965 et les considérations d'analogie électrique de Kastner pour un batardeau circulaire en calculant les rapports  $Q_{\text{fouille carré}}/Q_{\text{fouille ronde}}$ . La comparaison avec l'approche tridimensionnelle se fait dans un premier temps dans des conditions semblables (domaine de variation de la largeur ou rayon, et de la fiche relative du batardeau), puis nous vérifions le cas où l'effet tridimensionnel devient négligeable au terme du débit.

### ➤ Calcul du débit d'exhaure

Etant donné que ce chapitre s'intéresse aux calculs du débit et pertes de charge tridimensionnels dans le cas élastique, le calcul du débit doit donc être déterminé avec plus grande précaution et précision possible. A cet effet, on prend les conditions suivantes:  $0,1 < 2r/e < 10$  et  $0,125 < f/e < 0,875$  qui comprend la gamme de Kastner, 1982:  $0,67 < 2r/e < 7$  et  $0,125 < f/e < 0,875$ .

Les résultats obtenus par le code de calcul numérique aux différences finies Flac3D sont présentés sur les figures III.4 et III.5 (abaques) qui donnent respectivement la variation du débit et les pertes de charge hydraulique en fonction de la fiche et de la largeur relative du batardeau carré.

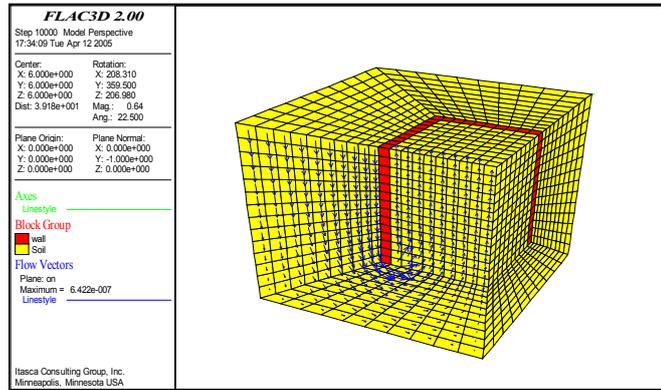


Figure III.3. Visualisation de face de l'écoulement pour un modèle Flac3D - Batardeau carré sans fouille - Après calcul.

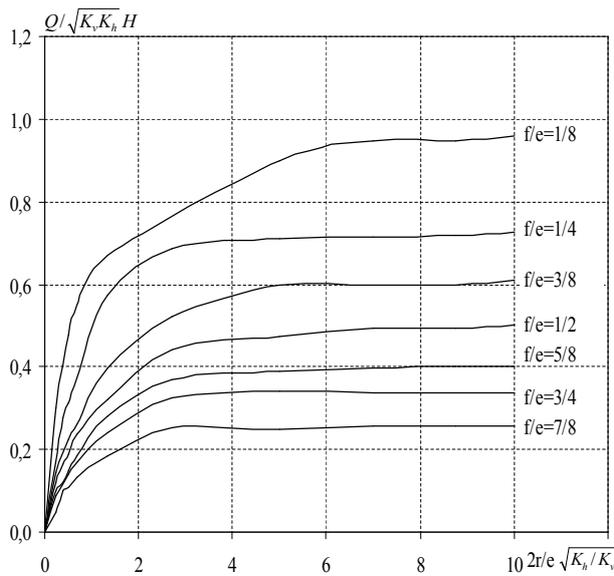


Figure III.4. Calcul du débit total. - Batardeau carré sans fouille.

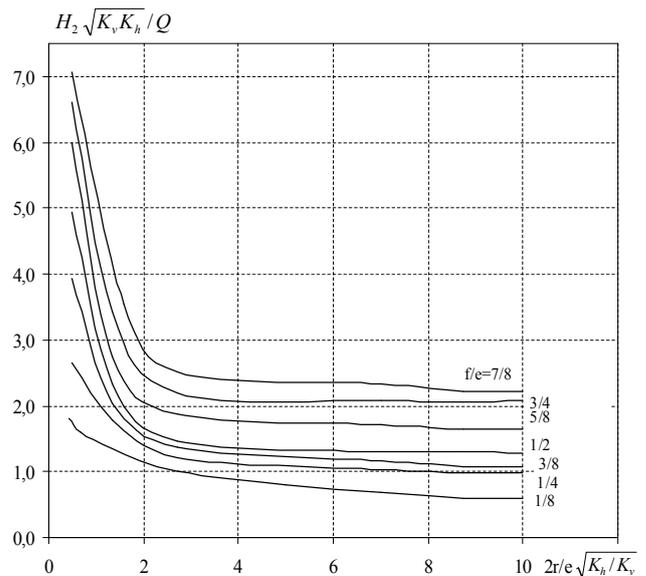


Figure III.5. Calcul de pertes de charge dans le coté aval.

- La Figure III.4 montre clairement que le débit se réduit dans le cas de petites largeurs du batardeau.
- La comparaison de présents résultats avec ceux obtenus en écoulement plan confirme que la réduction de débit due à la convergence de l'écoulement varie avec le demi-côté  $r=b/2$  de l'écran étanche et décroît avec lui. En particulier, les débits coïncident à 01 % près dès que la largeur relative  $2r/e$  est égale à 5 alors que le débit est réduit d'environ 30 % quand :  $2r/e=0,25$ . Si on admet une erreur maximale de 05 % (toujours par excès donc dans le sens de la sécurité), les relations établies par Mandel, 1939 pour l'écoulement plan sont valables dès que  $2r/e = 2,7$ , donc à partir de cette valeur que l'effet tridimensionnel commence à disparaître mais au terme du débit.
- La Figure III.5 quant à elle montre clairement que les pertes de charge dues à l'écoulement sont très importantes pour les fouilles étroites et le débit dans ce cas dépend de la perméabilité verticale.

### III.3.2 Cas de batardeaux tridimensionnels rectangulaires sans fouille en milieu fini

On considère dans ce cas un batardeau de forme *rectangulaire* dont les calculs sont en trois dimensions et en profitant de la symétrie du modèle, on prend seulement un quart du domaine considéré puis on multiplie les résultats obtenus par *quatre* pour trouver le débit total. Après avoir procédé aux meilleur choix du maillage, nous faisons varier la demi-longueur  $R$  où  $L = 2R$ , c.-à-d. on varie la *troisième dimension* et la fiche relative du batardeau en fixant la demi-largeur  $r$  où la largeur  $b = 2r$  jusqu'à la disparition de l'effet *tridimensionnel*. Après une certaine durée, l'écoulement peut être considéré comme étant permanent et dans ce cas les débits entrant et sortant se convergent.

Après cette première étape, on procède aux calculs des pertes de charge amont et aval du modèle testé, grâce au code de calcul Flac3D. L'analyse des résultats de nombreux tests que nous avons effectués, a montré que l'écoulement dans ce cas est à filets convergents ce qui induit une réduction du débit d'exhaure pour les petites largeurs du batardeau. Cependant, qu'en est-il pour les batardeaux de fortes largeurs ? Et à partir de quelle valeur de la largeur relative que l'effet *tridimensionnel* commence à se disparaître au terme du débit ? Ce sont des questions dont nous essayons de répondre dans ce qui suit. La Figure III.6 montre le modèle ainsi adopté en Flac3D.

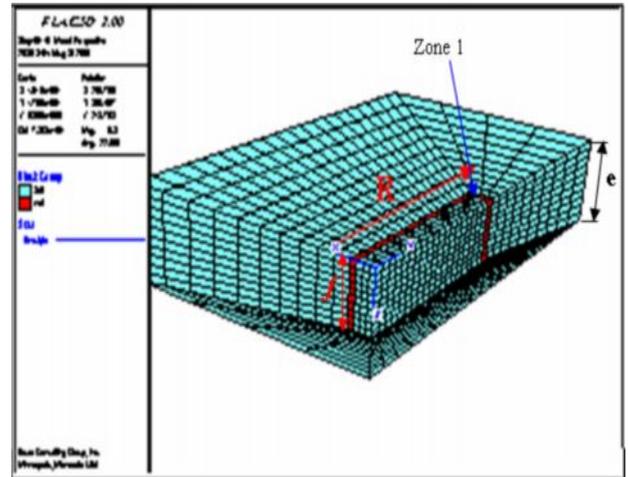


Figure III.6. Maillage adopté en Flac3D - Batardeau rectangulaire sans fouille -

On note que, la largeur relative et la fiche du batardeau varient dans une large gamme:  $0,1 < 2r/e < 10$  et  $0,125 < f/e < 0,875$  qui comprend la gamme de Kastner:  $0,67 < 2r/e < 7$  et  $0,125 < f/e < 0,875$ . Tandis que le rapport de la longueur et la largeur du batardeau est telle que :  $1 < 2R/2r < 12$ . Les tests ainsi effectués ont permis d'obtenir un nombre important de valeurs du débit et de pertes de charge et sur lesquels s'est reposée l'interprétation de ces résultats. Les figures III.7 et III.8 englobent tous les résultats obtenus du calcul numérique.

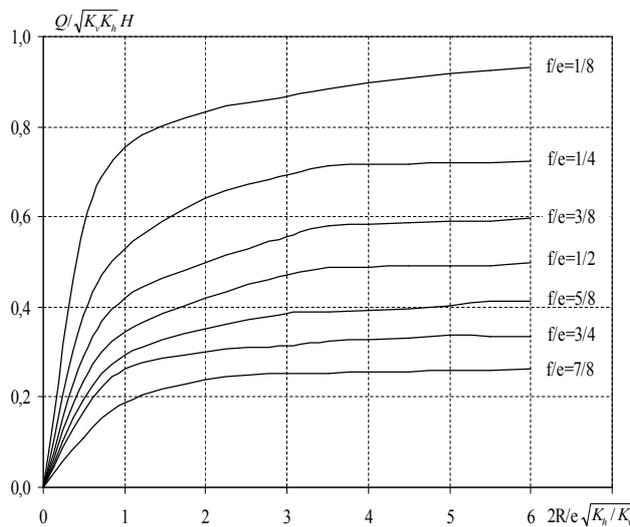


Figure III.7. Calcul du débit total. Batardeau rectangulaire sans fouille.

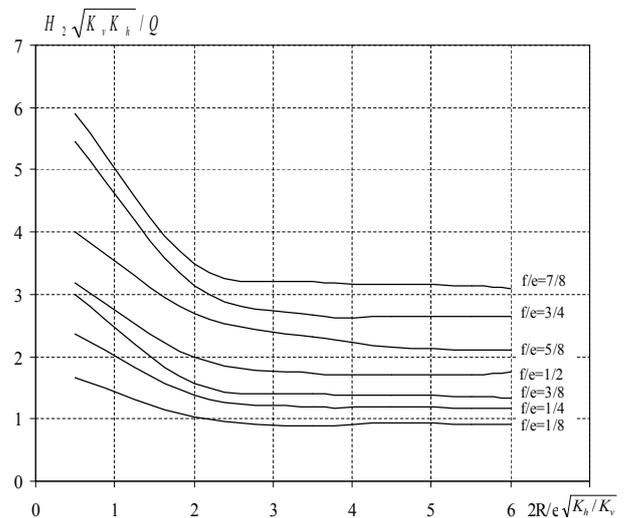


Figure III.8. Calcul de pertes de charge dans le coté aval.

- Les courbes obtenues indiquent clairement que, pour une valeur donnée de la fiche relative  $f/e$ , le débit  $Q/KH$  augmente au fur et à mesure que la largeur relative du batardeau  $2R/e$  augmente. En outre, dès que  $2R/e = 3$  où  $2R / 2r = 6$  donc  $R = 6r$  le débit reste constant ce qui montre qu'à partir de cette valeur que l'effet *tridimensionnel* devient négligeable au terme du débit, et l'effet de la troisième dimension peut être négligé, l'évaluation du débit  $Q/KH$  sera entachée d'une erreur relative de 1 %.

- Lorsque le batardeau est très large, le flux d'eau reste concentré au voisinage de l'écran étanche : les trois quarts du débit débouchent dans la fouille dans une bande de largeur  $e \sqrt{K_v / K_h}$ . Ce débit dépend alors à parts égales de la perméabilité verticale et horizontale.
- Par contre, pour le cas des batardeaux étroits où  $2R/e < 3$  le débit est réduit avec une certaine valeur, ceci est expliqué par le fait que les pertes de charge dues à l'écoulement vertical entre les écrans sont prépondérantes et le débit dépend plus de la perméabilité verticale que de la perméabilité horizontale.
- Nous pouvons ainsi observer de la Figure III.8 que les pertes de charge dues à l'écoulement sont vraiment très fortes que le débit se réduit dans ce cas. Ainsi, si l'on souhaite calculer le débit total  $Q/KH$  sous hypothèse que l'effet de la troisième dimension du batardeau est négligeable, il est recommandé de multiplier les résultats par un facteur réducteur de débit pour les fouilles étroites.

### III.3.3 Cas des batardeaux axisymétriques circulaires sans fouille dans un milieu fini

Dans cette partie de travail, on traite le cas d'un ouvrage de révolution. Ce type de calcul ne résulte pas d'une théorie de structure à proprement parler mais d'une technique de résolution utilisant des propriétés remarquables de la géométrie et des conditions appliquées. Lorsque l'enceinte est *axisymétrique*, la dimension de l'espace de travail peut être réduite et l'étude d'un problème 3D est ramenée à l'étude d'un problème 2D. Mais il y'a des conditions à cela : conditions sur la géométrie, conditions particulières sur les chargements. L'étude de l'enceinte *axisymétrique*, ou à symétrie de révolution autour d'un axe noté  $Oz$ , revêt un grand intérêt pratique, et leur calcul peut être notablement simplifié lorsque les charges appliquées et les conditions sont également symétriques.

Le principe de modélisation des batardeaux à symétrie de révolution consiste donc à ramener, sans dégradation de la précision des résultats, le problème 3D à un problème à 2D défini soit dans un plan *méridien* (i.e., le plan est défini par l'axe de révolution  $Oz$  et un point de la structure. L'intersection d'un plan méridien avec une surface axisymétrique est une ligne *méridienne*) soit dans un plan *parallèle* (i.e., le plan parallèle est perpendiculaire à l'axe  $Oz$ . L'intersection d'un plan parallèle avec une surface axisymétrique est une ligne circonférentielle) (Prat, 1999).

Ce cas a été traité par une méthode expérimentale appelée analogie électrique par Kastner, 1982. Dans ce cas, la modélisation numérique *tridimensionnelle* est lourde. Par contre, sous certaines conditions, la modélisation en *axisymétrie* est rapide. Nous présentons dans ce qui suit une confrontation entre un modèle *axisymétrique* conçu à l'aide du code Flac2D avec un modèle *tridimensionnel* conçu à l'aide de l'analogie électrique réalisée par Kastner, 1982.

#### III.3.3.1 Présentation des cas étudiés

On considère le cas d'un batardeau de forme *circulaire* de rayon  $r$  pénétrant d'une profondeur  $f$  où  $f$  est la fiche du batardeau, dans un sol homogène anisotrope reposant sur une base imperméable. La couche de sol a une épaisseur  $e$ . Cet écran a une épaisseur  $E'$  (paroi moulée), et  $E$  (palplanche), est soumis à une charge hydraulique  $H$  comme indiqué sur la Figure III.9.

L'objectif du problème est d'évaluer le débit d'exhaure et pertes de charge en fonction du diamètre  $2r$  du batardeau et de la fiche relative  $f$ , ainsi de vérifier le cas où l'effet tridimensionnel est négligeable, c.-à-d. le cas de grandes fouilles.

Avec :

- $e$  : épaisseur de la couche perméable ;
- $L$  : étendu du milieu ;
- $r$  : rayon du batardeau circulaire ;
- $f$  : fiche de l'écran étanche ;
- $H$  : perte de charge totale.

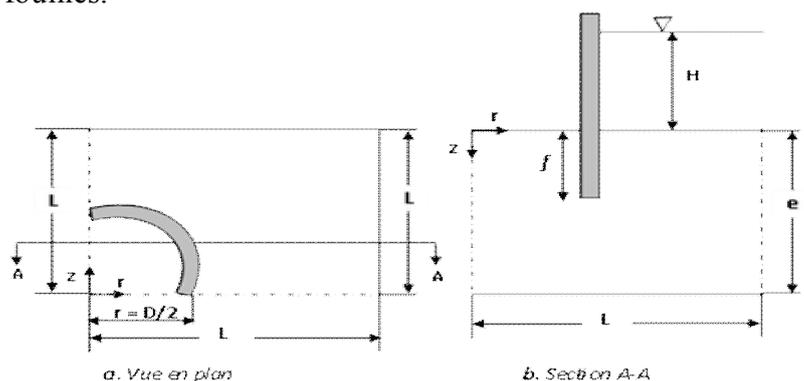


Figure III.9. Batardeau circulaire sans fouille.

### III.3.3.2 Maillage et conditions aux limites

Le problème est *axisymétrique*. Le système des axes ( $roz$ ) de coordonnées est défini avec l'origine au centre du coté aval dans le plan de la surface de sol. La Figure III.9 montre un croquis des conditions du problème.

Il convient tout d'abord de rappeler les coefficients et les paramètres qui vont être pris en compte dans cette étude et le comportement du sol qui est considéré comme un matériau élastique. Le sol et l'eau ont les propriétés suivantes:

- Le module volumique,  $K = 10^4$  MPa ;
- La densité sèche du sol,  $\rho_d = 1700$  kg/m<sup>3</sup> ;
- Le module de cisaillement,  $G = 10^8$  MPa ;
- La cohésion  $coh = 10^8$  ;
- La tension  $ten = 10^{10}$  ;
- Le module  $g$  du vecteur de gravité peut être rapproché à  $10$  m/s<sup>2</sup>.
- La densité de l'eau,  $\rho_w = 1000$  kg/m<sup>3</sup> ;
- La densité de l'écran,  $\rho_{wall} = 1500$  kg/m<sup>3</sup> ;
- La perméabilité,  $k = 10^{-10}$  m/s ;
- La porosité,  $n = 0,3$  ;
- Le module volumique de l'eau,  $K_f = 10^3$  Pa ;

La Figure III.10 montre à titre d'exemple les dimensions du maillage adopté pour la simulation en Flac2D. Ce maillage est raffiné au voisinage de l'écran étanche où les gradients hydrauliques sont importants et la partie où le débit sortant est calculé. Le maillage se fait d'une manière automatique.

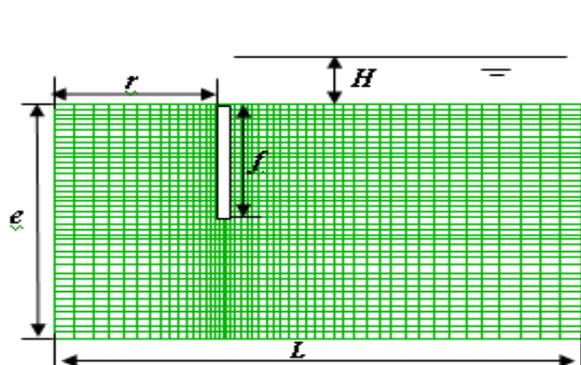


Figure III.10. Maillage axisymétrique adopté en Flac2D. Batardeau circulaire sans fouille.

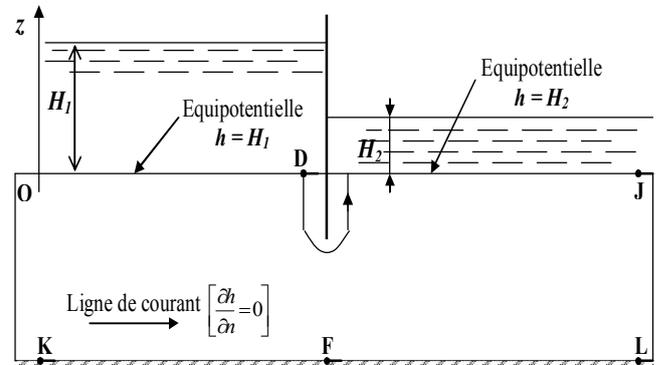


Figure III.11. Conditions aux limites hydrauliques.

Afin de voir l'influence de la frontière verticale du modèle sur les résultats de calcul, on a fait varier l'étendue droite du modèle (coté amont) en fonction de la fiche du batardeau, les résultats obtenus montrent qu'à partir de l'étendue de maillage égale à  $6f$  le débit reste constant. Par conséquent, ce maillage **varie** d'un cas à un autre en fonction de la fiche et du rayon du batardeau, donc, le nombre d'éléments dans les directions  $r$  et  $z$  change aussi tout en considérant toujours un maillage raffiné.

Pour ce faire, le maillage de différences finies en Flac2D utilisé pour le calcul numérique est constitué de plusieurs groupes générés entre les points limites de chacun de ces groupes de densité de maillage différente, c.-à-d. chaque partie est discrétisée par un nombre d'éléments dans les directions  $r$  et  $z$ .

Pour le coté amont, plus qu'on s'éloigne de la fiche plus que le maillage devient grossier, et plus qu'on se rapproche de l'écran étanche plus que le maillage devient fin.

Pour la partie intérieure du batardeau (coté aval), et afin de montrer l'influence de la taille du modèle, le nombre d'éléments sur le débit, plusieurs dimensions du maillage ont été testées pour chaque cas du modèle :  $r$ ,  $e$ , et  $f$ . Donc, plusieurs tests ont été exécutés pour fixer le modèle de calcul final considéré pour l'étude.

Les résultats obtenus montrent que le débit reste constant à partir d'un certain maillage, et donc on choisit le modèle qui n'est pas influencé par l'augmentation du nombre d'élément dans les directions  $r$  et  $z$ .

Par ailleurs, malgré le débit reste constant, et afin d'avoir des résultats de gradients hydrauliques plus précis, on opte toujours pour les maillages plus dense et fin. Le maillage adopté pour le calcul contient  $X$  éléments dans la direction  $r$  et  $Y$  éléments dans la direction  $z$ .

Ainsi, on a procédé de la même manière pour tous les cas étudiés avant de fixer le modèle de calcul final.

On note que, pour des raisons numériques et afin d'accélérer la convergence du modèle, le module volumique de l'eau  $K_f$  est pris égal à  $10^3$  Pa. Un test préalable sur ce modèle a permis de vérifier la pertinence de cette approximation et la convergence rapide du modèle adopté. En outre, la charge hydraulique dans le coté aval est nulle d'où la pression hydraulique est nulle ( $P = 0$ ). Les limites OK et JL (Fig. III.11) sont des limites imperméables (lignes de courant).

La comparaison avec l'approche *tridimensionnelle* se fait dans un premier temps dans des conditions semblables (domaine de variation de la largeur et de la fiche relative du batardeau), puis nous verrons le cas où l'effet *axisymétrique* devient négligeable au terme du *débit*.

### III.3.3.3 Calcul du débit d'exhaure et pertes de charge

Pour comparer nos résultats de calculs du débit d'exhaure et pertes de charge aux résultats de Kastner, 1982 ; Mandel, 1939 ; Davidonkoff et Franke, 1965 nous avons exploré avec notre modèle le domaine suivant:  $0,1 < 2r/e < 10$  et  $0,125 < f/e < 0,875$  qui comprend la gamme de Kastner :  $0,5 < 2r/e < 8,75$  et  $0,125 < f/e < 0,875$ .

Les résultats obtenus par le code de calcul numérique Flac2D sont présentés sur les figures III.12, III.13, III.14 et III.15 sous formes d'abaques donnant respectivement la variation du débit et des pertes de charge en fonction du rayon et de la fiche relative du batardeau circulaire.

On peut noter qu'en terme de débit d'exhaure, les résultats obtenus en *axisymétrie* sont très voisins de ceux donnés par l'approche expérimentale en 3D de Kastner, 1982 et quasi identiques pour les grandes fouilles comparés aux relations analytiques pour les cas en plan.

L'analyse de ces résultats permet de dégager quelques remarques qualitatives.

– Le débit augmente avec l'augmentation du diamètre et la diminution de la fiche relative du batardeau. Néanmoins, le débit reste presque constant dès que le rapport  $2r/e \sqrt{k_v/k_h}$  est supérieur à 6. Ce domaine caractérise les batardeaux circulaires larges.

– Lorsque le batardeau est très large, le flux d'eau reste concentré au voisinage de l'écran étanche : les trois quarts du débit débouchent dans la fouille dans une bande de largeur  $e \sqrt{k_v/k_h}$ . Ce débit dépend alors à parts égales de la perméabilité verticale et horizontale du sol.

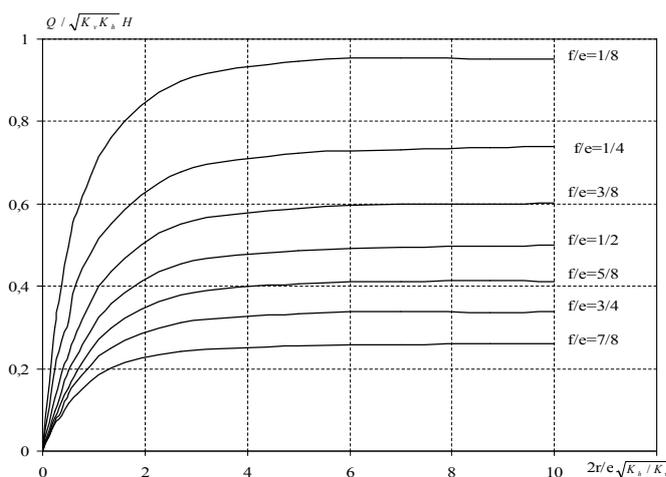


Figure III.12. Calcul du débit total.

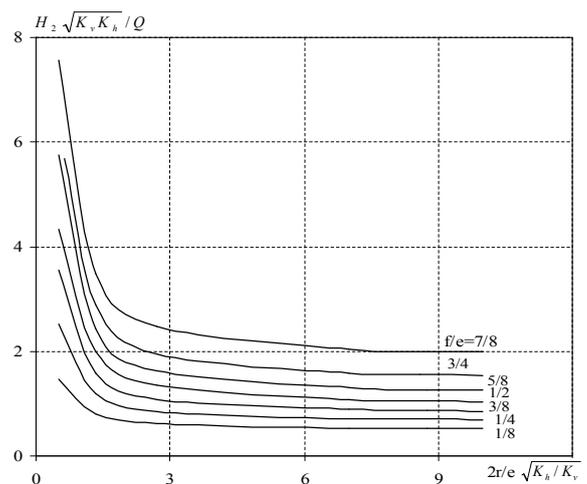


Figure III.13. Pertes de charge dans le coté aval.

– Quant aux batardeaux étroits, l'écoulement est quasi uniforme en fond de fouille dès que:  $2r/e < 1$  pour  $f/e = 0,75$  (forte fiche) et  $2r/e < 0,5$  pour  $f/e = 0,25$  (fiche faible). Dans ce cas, les pertes de charge dues à l'écoulement vertical à filets convergents entre les écrans sont prépondérantes et le débit dépend plus de la perméabilité verticale que de la perméabilité horizontale.

– Pour le coté aval (Figure III.13), la perte de charge relative augmente au fur et à mesure que l'écran s'enfonce dans le sol et diminue avec l'élargissement du batardeau. Pour les faibles valeurs du diamètre relatif, les pertes de charges en aval dues à l'écoulement sont très fortes et le débit dans ce cas dépend uniquement de la perméabilité verticale.

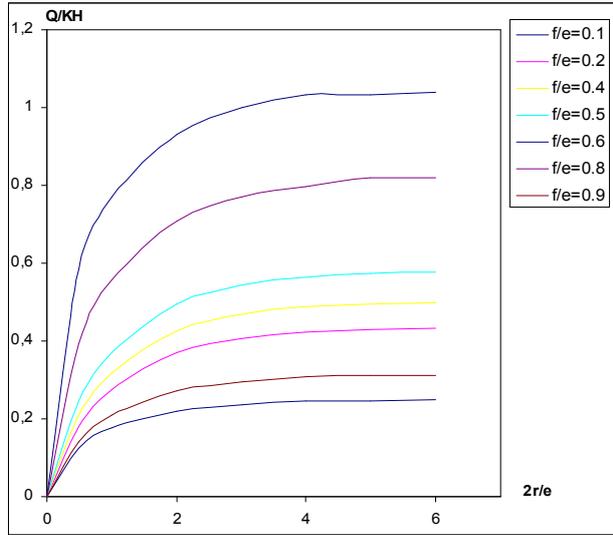


Figure III.14. Calcul du débit total.

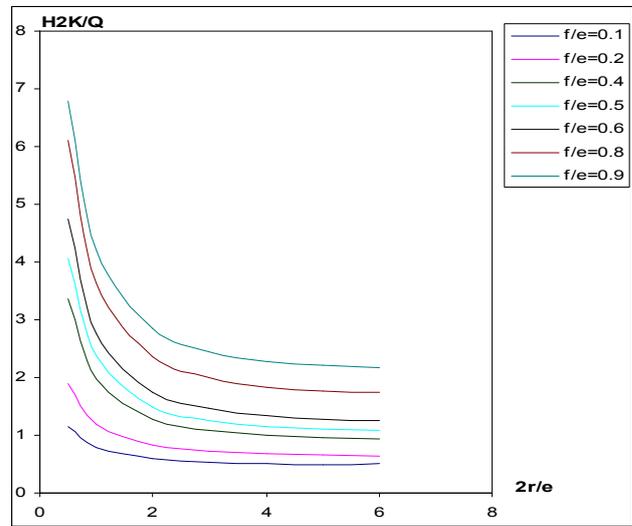


Figure III.15. Pertes de charge dans le coté aval.

### III.3.3.4 Influence de l'épaisseur de l'écran

Afin de voir l'influence de l'épaisseur de l'écran étanche sur les résultats du débit d'exhaure et les pertes de charge, on fait les calculs pour deux cas de batardeaux : l'un est en palplanche d'épaisseur  $E$  et l'autre en paroi moulée d'épaisseur  $E'$  avec un rapport  $E/E' = 0,1$  dans le même domaine.

Les résultats de calculs sont regroupés dans la Figure III.16 donnant la variation du débit total en fonction du rayon et de la fiche relative du batardeau.

Ces résultats montrent que le débit pour une palplanche est nettement supérieur à celui de la paroi moulée pour le cas de fiches faibles. Cette différence est expliquée par la perte de charge supplémentaire provoquée par l'augmentation de l'épaisseur de l'écran étanche. Alors que, pour les fortes fiches du batardeau, plus que la fiche augmente moins que l'influence de l'épaisseur de l'écran devient importante du point de vue débit d'exhaure, et cela est montré sur la Figure III.17 où la valeur du rapport des débits tend vers 1 quand  $f/e$  augmente, et les débits presque coïncident pour la valeur de  $f/e = 0,9$  (Fig. III.16).

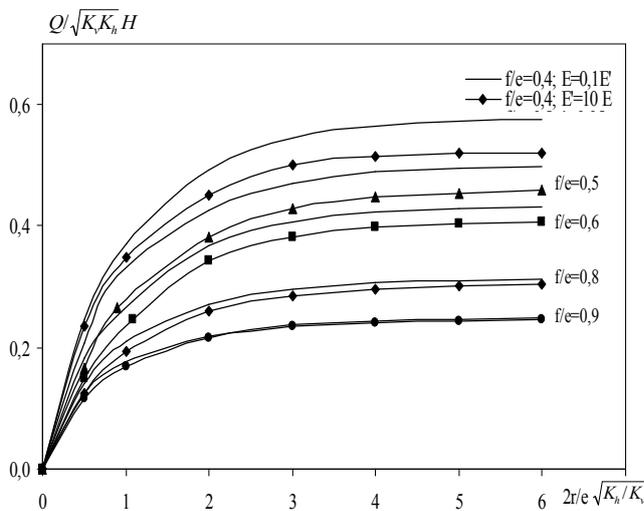


Figure III.16. Comparaison du débit: rapport d'épaisseur de l'écran  $E/E' = 0,1$ .

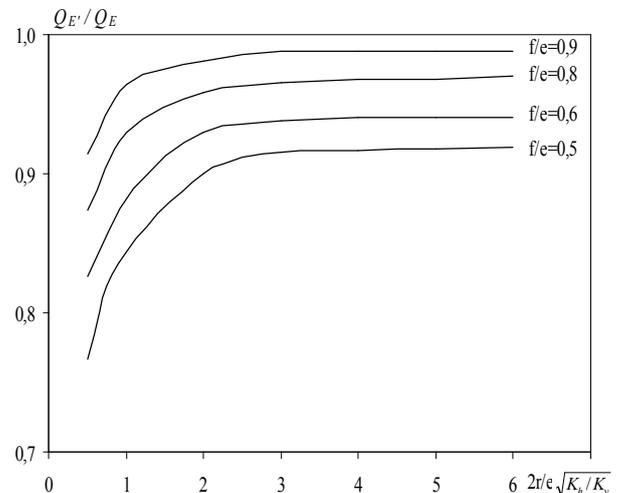


Figure III.17. Variation du rapport de débits  $Q_{E'}/Q_E$ .

### III.4 CONFRONTATION AUX RESULTATS EXISTANTS

#### III.4.1 Batardeau carré sans fouille en milieu fini

1- Davidenkoff et Franke, 1965 proposent de calculer le débit comme pour le batardeau plan, puis de multiplier les résultats par un facteur réducteur égal à 0,75.

2- Kastner, 1982 avait comparé systématiquement les résultats de Davidenkoff et Franke, 1965 au débit d'un batardeau circulaire de diamètre égal au coté du carré. Les résultats sont assez dispersés, le rapport de ces débits variant de 0,93 à 0,71. Cette dispersion s'explique par l'épaisseur non négligeable de l'écran dans les essais de Davidenkoff qui fausse les comparaisons lorsque  $f/e$  est élevé. Elle diminue si l'on conserve les résultats concernant les fiches faibles qui sont résumés dans le tableau ci-après (Kastner, 1982).

Tableau III.2. Variation du rapport des débits en fonction de la largeur relative du batardeau. D'après Kastner, 1982.

$2 r/e$	0,67	1,34	2,7	7
$Q_{\text{fouille carrée}} / Q_{\text{fouille ronde}}$	0,93	0,91	0,87	0,77

Ces résultats donnent une bonne idée des corrections à apporter mais sont limités en largeur relative : il serait intéressant de vérifier si le rapport des débits tend bien vers l'unité 1 lorsque  $2r/e$  devient très grand (Kastner, 1982). Les hypothèses mentionnées ci-dessus ont été confirmées dans un bon nombre de cas numériques. Mais qu'en est-il de leur validité pour le modèle tridimensionnel faisant l'objet de la présente étude ? Seule l'utilisation d'un modèle tridimensionnel ou expérimental pourra répondre de manière définitive à cette question.

Les résultats du Tableau III.3 montrent dans la globalité que le rapport des débits tend bien vers 1 lorsque  $2r/e$  devient très grand et le débit du batardeau carré se rapproche de celui des batardeaux circulaires. De même, pour les batardeaux de petite dimension le débit unitaire se rapproche de celui des batardeaux circulaires, ceci est expliqué par la tendance du rapport des débits vers 1.

Tableau III.3. Comparaison du présent débit unitaire 3D avec l'écoulement 3D (Davidenkoff et Franke, 1965) et avec le présent écoulement en conditions axisymétrique.

$f/e$	$2r/e$	Flac3D $Q_{3D}$	Kastner $Q_{Plan}$	Davidenkoff et Franke $Q = Q_{Plan} \times 0,75$	Ecart %	Fouille circulaire Flac2D $Q_{2D}$	$Q_{3D}/Q_{2D}$
1/8	0,5	0,47500	0,64	0,48	0,01	0,4975	0,95
1/8	7	0,946	0,959	0,7192	0,24	0,953	0,99
1/4	0,67	0,373	0,51	0,3825	0,02	0,411	0,90
1/4	8,75	0,714	0,73	0,5475	0,23	0,735	0,971
3/8	1,34	0,397	0,53	0,3975	0,00028	0,436	0,91
3/8	10	0,588	0,6	0,45	0,24	0,60	0,976
1/2	0,5	0,190	0,26	0,195	0,002	0,196	0,96
1/2	2,7	0,443	0,49	0,3675	0,17	0,453	0,97
5/8	0,37	0,120	0,17	0,1275	0,05	0,120	0,99
5/8	2,7	0,370	0,41	0,3075	0,17	0,379	0,97
3/4	0,37	0,113	0,16	0,12	0,06	0,114	0,99
3/4	2,7	0,31	0,33	0,2475	0,24	0,32	0,96
7/8	0,25	0,068	0,10	0,075	0,06	0,07	0,97
7/8	10	0,258	0,26	0,195	0,25	0,26	0,99

Flac3D : présents résultats avec Flac3D. Kastner : résultats en plan d'après Kastner (1982). Davidenkoff et Franke : résultats 3D d'après Davidenkoff et Franke (1965). Flac2D : présents résultats axisymétriques avec Flac2D.

❖ **Confrontations aux résultats en écoulement plan**

- Kastner, 1982 a proposé un abaque pour les écrans en plan fichés dans un milieu *fini*. La comparaison avec les présents résultats vis-à-vis du débit, montre que tous ces calculs se sont révélés très précis, l'écart n'atteignant pas 05 % dans le cas le plus défavorable pour le cas des fouilles larges dont la largeur relative du batardeau  $2r/e > 2,7$  et dès que  $2r/e = 7$  les résultats se coïncident avec un écart inférieur à 01%.
- Pour un écran unique fiché dans une couche d'épaisseur limitée, Mandel, 1939 propose deux relations dont l'écart avec nos résultats ne dépasse pas 04 %.

$$\frac{f}{e} < 0,5 \quad \frac{Q}{H\sqrt{K_v.K_h}} = \frac{1}{\pi} \ln 2 \cot g \frac{\pi f}{4 e}$$

$$\frac{f}{e} > 0,5 \quad \frac{Q}{H\sqrt{K_v.K_h}} = \frac{\pi}{4} \frac{1}{\ln 2 \cot g \left( \frac{\pi}{4} (1 - \frac{f}{e}) \right)}$$

Tableau III.4. Comparaison avec l'écoulement en plan: Kastner, 1982 et Mandel, 1939.

$f/e$	$2r/e$	Le débit - Fouille carrée - d'après Flac3D	Le débit d'après Kastner, 1982	Ecart %	Le débit d'après Mandel, 1939	Ecart %
1/8	7	0,946	0,96	01,3	0,96	01,3
1/8	8,75	0,948	0,96	01,0	0,96	01,0
1/4	2,7	0,700	0,73	04,1	0,735	04,7
1/4	10	0,720	0,73	01,3	0,735	02,0
3/8	5	0,595	0,60	01,0	0,600	0,9
3/8	7	0,596	0,60	01,0	0,600	0,7
1/2	7	0,493	0,50	01,0	0,501	01,7
1/2	8,75	0,494	0,50	01,0	0,501	01,4
5/8	8,75	0,400	0,41	02,4	0,416	03,8
5/8	10	0,400	0,41	02,4	0,416	03,0
3/4	2,7	0,327	0,33	01,0	0,340	03,0
3/4	8,75	0,337	0,34	01,0	0,340	0,8
7/8	2,7	0,251	0,26	03,0	0,260	03,0
7/8	7	0,257	0,26	0,01	0,260	0,013

**III.4.2 Batardeau rectangulaire sans fouille en milieu fini**

1- Les résultats numériques tridimensionnels obtenus par Faheem *et al*, en analysant la stabilité d'une excavation de forme **rectangulaire** par la méthode des éléments finis, indiquent que la stabilité de fond de fouille est considérablement influencée par ces facteurs: le rapport de la profondeur à la largeur de l'excavation; le rapport de la longueur  $R$  à la largeur  $r$  de l'excavation. L'effet tridimensionnel peut être négligé à un rapport de la longueur à la largeur  $R/r$  supérieur à **six** ( $R/r > 6$ ).

- En l'absence de solutions exactes ou de résultats expérimentaux, nous avons obtenu la solution avec un modèle *tridimensionnel* conçu à l'aide du code Flac3D.

On propose le facteur réducteur du débit en multipliant les résultats en *écoulement plan* par ce facteur pour trouver les résultats en *écoulement tridimensionnel*.

2. *Confrontations aux résultats en écoulement plan**Cas des batardeaux larges*

- Par comparaison en écoulement plan avec l'abaque de Kastner, 1982 et à partir des résultats reportés dans le Tableau **III.5**, on peut déduire que la précision est excellente pour les fortes largeurs relatives du batardeau (l'écart est inférieur à 4,3 % lorsque  $3 < 2R/e < 6$ ).
- La comparaison avec les relations de Mandel, 1939 montre que celles-ci donne le débit avec un écart inférieur à 4,4 %.

Tableau III.5. Comparaison du débit avec l'écoulement plan: Kastner, 1982 et Mandel, 1939.

$f/e$	$2R/e$	$2R/2r$	Le débit batardeau rectangulaire - d'après Flac3D	Le débit plan d'après Kastner, 1982	Ecart %	Le débit plan d'après Mandel, 1939	Ecart %
1/8	5	10	0,917	0,96	04,3	0,96	04,3
1/8	6	12	0,931	0,96	02,9	0,96	02,9
1/4	3,5	7	0,713	0,72	01,0	0,73	03,0
1/4	5	10	0,720	0,73	01,0	0,73	02,0
3/8	3,5	7	0,580	0,60	03,0	0,60	03,5
3/8	6	12	0,597	0,60	01,0	0,60	0,60
1/2	5	10	0,491	0,50	02,0	0,50	02,1
1/2	6	12	0,498	0,50	0,3	0,50	0,60
5/8	5	10	0,400	0,41	02,4	0,41	03,8
5/8	6	12	0,409	0,41	0,2	0,41	01,6
3/4	5	10	0,336	0,34	01,0	0,34	01,0
3/4	6	12	0,335	0,34	01,0	0,34	01,0
7/8	3,5	7	0,253	0,26	02,9	0,26	03,5
7/8	5	10	0,258	0,26	0,7	0,26	01,8

Comme l'indique le Tableau III.5, on s'est plus particulièrement intéressés dans cette comparaison aux grandes et fortes valeurs du paramètre  $2R/e$ . En effet, les faibles valeurs de  $2R/e$  entraînent de grandes valeurs de pertes de charge et donc une forte réduction du débit dont ce dernier dépend de la perméabilité verticale. Si dans le cas d'un batardeau de forme *rectangulaire* le débit à calculer est associé à une faible largeur, le résultat de celui-ci risque d'entraîner des erreurs relatives assez importantes. Afin d'éviter ces erreurs, il est recommandé de bien préciser les conditions et le domaine d'application des relations établies en écoulement plan. En outre, les profondeurs importantes de la fiche de l'écran étanche induisent une réduction de la valeur du débit.

Par conséquent, on peut noter que les relations établies en écoulement plan sont valable à partir de  $2R/e = 3$  où  $2R/2r = 6$  donc  $R = 6r$  avec un écart qui ne dépasse pas 05 %.

### Le facteur de réduction du débit

Tableau III.6. Facteur de réduction de débit du batardeau rectangulaire.

$f/e$	$2R/e$	$2R/2r$	Flac3D $Q_{3D}$	Kastner $Q_{2D}$	Facteur réducteur de débit $F = Q_{3D}/Q_{2D}$
1/4	0,5	1	0,383	0,44	0,8705
1/4	1	2	0,528	0,6	0,8800
1/4	2	4	0,592	0,7	0,8457
3/8	0,5	1	0,290	0,34	0,8529
3/8	1	2	0,419	0,46	0,9116
3/8	2	4	0,476	0,56	0,8500
1/2	0,5	1	0,234	0,27	0,8667
1/2	1	2	0,345	0,40	0,8617
1/2	2	4	0,393	0,45	0,8738
5/8	0,5	1	0,196	0,24	0,8167
5/8	1	2	0,294	0,33	0,8909
5/8	2	4	0,337	0,4	0,8430
3/4	0,5	1	0,167	0,20	0,8350
3/4	2	4	0,299	0,32	0,9338
7/8	1	2	0,189	0,23	0,8232
7/8	2	4	0,24	0,25	0,9600

Enfin, ces tests mettent en évidence l'intérêt du modèle *tridimensionnel* dans le calcul de débit et les pertes de charge puisqu'il permet de représenter les cas réels observés en pratique.

### III.4.3 Confrontation du modèle axisymétrique par rapport à un modèle tridimensionnel - Batardeau circulaire sans fouille en milieu fini -

1- Davidonkoff et Franke, 1965 proposent de calculer le débit unitaire comme si le problème était plan, puis de multiplier le résultat par un facteur réducteur égal à 0,8.

2- Kastner, 1982 a proposé un abaque pour les écrans circulaires fichés dans un milieu fini, Figure III.18, l'écart comparé aux présents résultats axisymétriques ne dépasse pas 4 % (Figure III.19).

La Figure III.19 présentant une comparaison entre le débit total donné par Kastner, 1982 et celui obtenu par le code numérique Flac2D en axisymétrie, montre une bonne concordance entre les deux approches, l'écart ne dépasse pas 4 % montrant ainsi l'aptitude du modèle axisymétrique à décrire correctement le comportement d'un modèle *tridimensionnel* à symétrie de révolution.

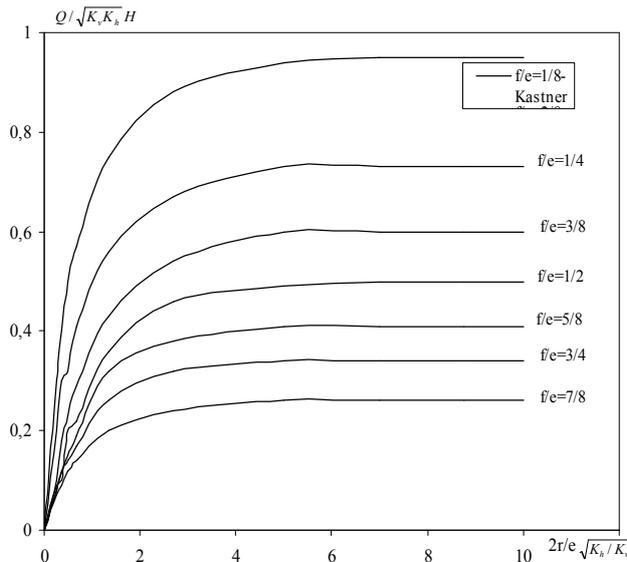


Figure III.18. Débit total.

Batardeau circulaire- D'après Kastner, 1982.

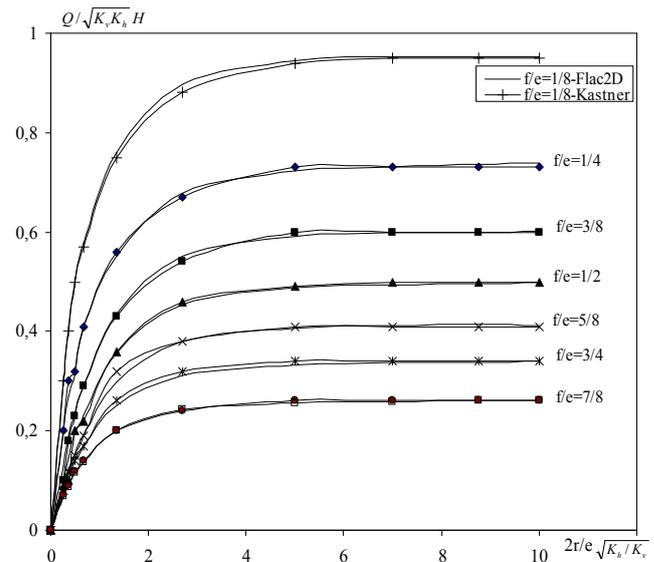


Figure III.19. Comparaison du débit total.

- Les résultats de Davidonkoff et Franke, 1965 sont seulement valables pour les batardeaux étroits et l'erreur peut dépasser **19 %** pour les batardeaux larges. Ce résultat approximatif est le reflet du domaine étroit qu'ils ont étudié et ne peut être adopté comme règle générale. En particulier, nous allons montrer qu'un batardeau de rayon infini pouvant être assimilé à un batardeau plan, et le coefficient minorateur qu'ils ont défini tend vers l'unité.

- Pour les batardeaux étroits, la concordance des résultats Flac2D et ceux de Davidonkoff et Franke, 1965 est bonne (Tableau III.7), mettant toutefois en évidence l'erreur systématique liée à l'épaisseur de l'écran dans leur modèle.

Tableau III.7. Comparaison du débit total avec les résultats 3D de Davidonkoff et Franke, 1965.  $f/e = 0,5$ .

$2r/e$	Le débit unitaire	Le débit unitaire	Le débit réduit d'après	Ecart %
	- Fouille circulaire - d'après Flac2D	Plan d'après Kastner, 1982	Davidonkoff et Franke, 1965	
	$Q_{axis}$	$Q_{plan}$	$Q_{3D} = Q_{plan} * 0,8$	
0,5	0,208	0,26	0,208	0,3
1	0,317	0,4	0,32	0,9
3	0,469	0,5	0,4	14,9
4	0,488	0,5	0,4	18,0
5	0,495	0,5	0,4	19,3
6	0,499	0,5	0,4	19,9

– La comparaison de présents résultats aux résultats en écoulement *plan* confirme que la réduction de débit due à la convergence de l'écoulement varie avec le rayon de l'écran étanche et décroît avec lui. En particulier, les débits coïncident à 0,5 % près dès que le rayon relatif  $2r/e$  est égal à 6 alors que le débit est réduit d'environ 30 % quand :  $2r/e = 0,5$ . Si l'on admet une erreur maximale de 9 % (toujours par excès donc dans le sens de la sécurité), les relations établies par Mandel, 1939 pour l'écoulement plan sont valables dès que  $2r/e = 2,7$ .

Tableau III.8. Comparaison du débit total avec les relations en plan de Mandel, 1939.  $f/e = 0,125$ .

$2r/e$	Le débit unitaire - Fouille circulaire - d'après Flac2D	Le débit unitaire plan d'après Mandel, 1951	Ecart %
0,25	0,302	0,959	68,5
0,375	0,402	0,959	58,1
0,5	0,497	0,959	48,1
0,67	0,578	0,959	39,7
1,34	0,761	0,959	0,20
2,7	0,900	0,959	05,0
5	0,945	0,959	01,5
7	0,953	0,959	0,6
8,75	0,951	0,959	0,8
10	0,952	0,959	0,7

– Ainsi autant pour les fortes largeurs du batardeau que pour les petites valeurs, l'approche *axisymétrique* donne des résultats voisins de l'approche *tridimensionnelle* de Kastner, 1982 et des méthodes de calcul en écoulement plan pour les batardeaux larges.

– D'une manière générale, les batardeaux *circulaires* de **grands** diamètres sont souvent considérés comme des batardeaux **plans**. Pour vérifier cette hypothèse, on a effectué une comparaison entre les résultats obtenus par le code Flac2D en axisymétrie avec ceux obtenus par le même code et les mêmes programmes en symétrie plane (Tableau III.9 et Figure III.20).

Tableau III.9. Comparaison entre les calculs plans et axisymétriques.  $f/e=0,5$ .

$2r/e$	Débit unitaire Fouille circulaire Flac2D $Q_{circulaire}$	Débit unitaire plan Flac2D $Q_{plan}$	$Q_{circulaire} / Q_{plan}$
0,5	0,2087	0,2902	0,72
1	0,3169	0,4067	0,78
2	0,4255	0,4817	0,88
3	0,4696	0,5002	0,94
4	0,488	0,5057	0,96
5	0,4956	0,5044	0,98
6	0,4991	0,5048	0,99

Le Tableau III.9 et la Figure III.21 confirment que le batardeau *circulaire* peut être considéré comme *plan* vis-à-vis les calculs du débit pour les batardeaux dont le diamètre relatif est large.

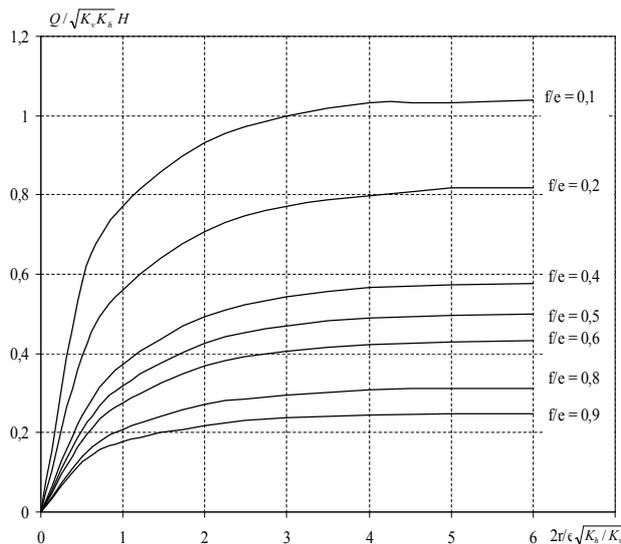


Figure III.20. Débit total – Batardeau plan.

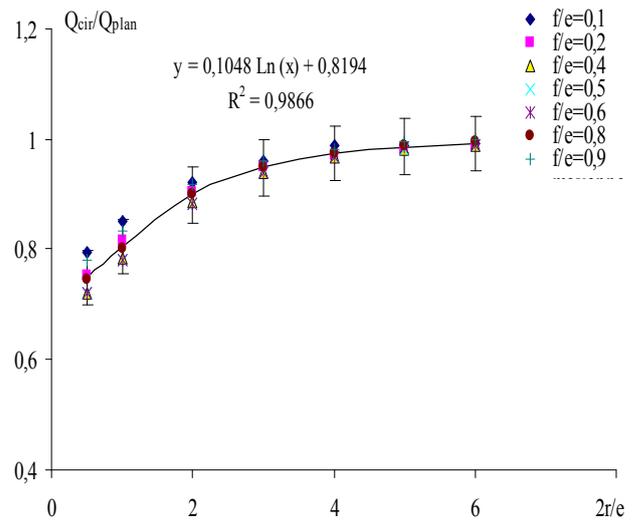


Figure III.21. Variation de  $Q_{circulaire}/Q_{plan}$ .

Dans la Figure III.21, les courbes de variation du rapport de débit circulaire et plan en fonction de la fiche relative  $2r/e$  et  $f/e$  (varie de 0,1 à 0,9) peuvent être représentées par une courbe unique avec la formule logarithmique :

$$y = 0,1048 \text{Ln}(x) + 0,8194$$

où :  $Q_{cir}/Q_{plan} = 0,1048 \text{Ln}(2r/e) + 0,8194$  (1)

Enfin, dans tous les cas précédents, on note en effet que, contrairement au cas de l'écoulement global les pertes de charge partielles données par les modèles *tridimensionnels* restent différentes à celles relatives à l'écoulement *plan*. Même pour les fortes largeurs de batardeau, les pertes de charge intérieures et extérieures restent respectivement supérieures et inférieures. Cette différence est expliquée par la convergence des filets liquides ce qui introduit une perte de charge supplémentaire autour des singularités qui sont les coins de la fouille même pour les fortes largeurs du batardeau.

### III.5 BATARDEAUX TRIDIMENSIONNELS SANS FOUILLE DANS UN MILIEU SEMI-INFINI – ALIMENTATION VERTICALE

Dans ce cas, le substratum n'influe pas sur les caractéristiques hydrauliques de la fouille tels que le débit, les pressions interstitielles, les vitesses d'infiltration, le gradient, etc. Donc, l'épaisseur du sol est variée jusqu'à une valeur où le débit reste constant.

#### III.5.1 Cas de batardeaux tridimensionnels carrés sans fouille dans un milieu semi-infini

On fixe la valeur de demi-largeur  $r$  et on varie la fiche du batardeau telle que:  $0,1 < f/2r < 1,75$ . La variation du débit total en fonction de la fiche relative est illustrée sur la Figure III.22.

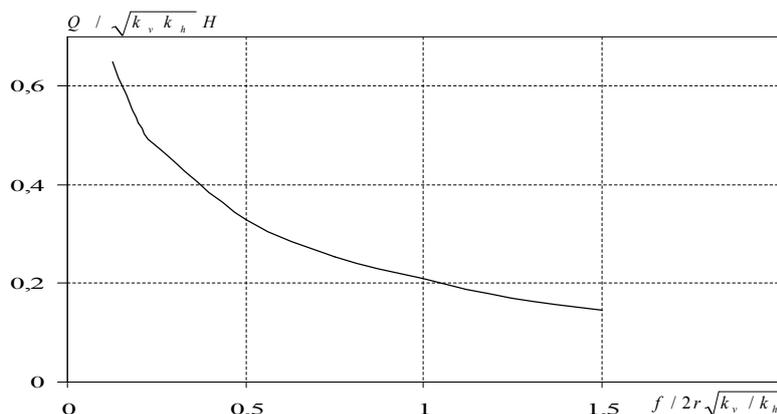


Figure III.22. Calcul du débit total.

### III.5.2 Cas de batardeaux tridimensionnels rectangulaires

Dans ce cas, on fixe aussi la valeur de  $r/f = 2/3$ , et en faisant varier la troisième dimension, i.e., la demi-longueur  $R$  telle que:  $0,125 < f/R < 1,75$ .

La Figure III.23 donne la variation du débit total en fonction de la fiche relative du batardeau.

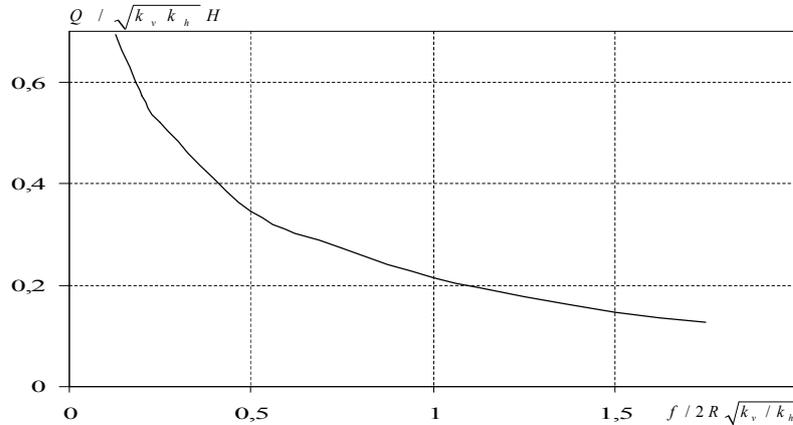


Figure III.23. Calcul du débit total.

### III.5.3 Batardeaux axisymétriques circulaires sans fouille dans un milieu semi-infini

#### III.5.3.1 Calcul du débit d'exhaure

De même, on fixe la valeur de  $r$  et on fait varier la fiche du batardeau :  $0,1 < f/2r < 2$ .

La Figure III.24 illustre la variation du débit total en fonction de la fiche relative du batardeau.

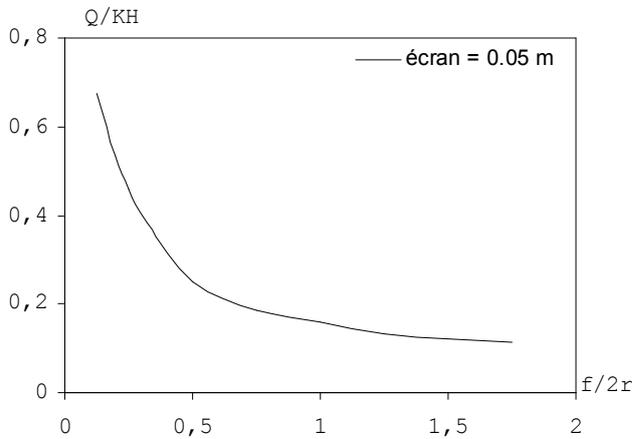


Figure III.24. Calcul du débit total.

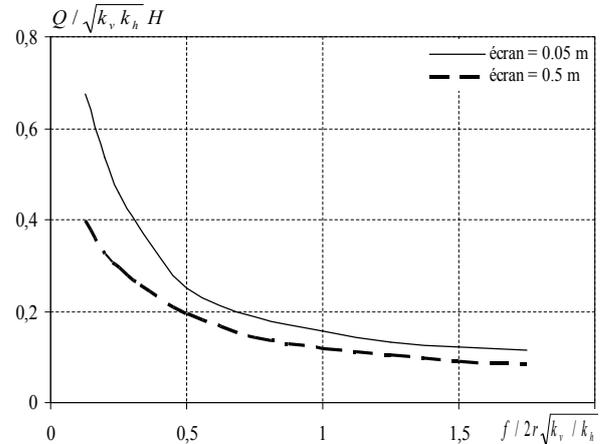


Figure III.25. Influence de l'épaisseur de batardeau.

#### III.5.3.2 Influence de l'épaisseur de l'écran

En raison de l'utilisation de deux types de batardeaux, l'influence de l'épaisseur de l'écran étanche est étudiée. La Figure III.25 fait apparaître l'influence de l'épaisseur de l'écran sur les résultats de calcul numérique. Nous avons calculé les débits pour deux cas de batardeaux dans le même domaine : l'un est en palplanche d'épaisseur  $E$  et l'autre en paroi moulée d'épaisseur  $E'$  avec un rapport  $E/E' = 0,1$ .

Les résultats de calcul sont présentés dans la Figure III.25 donnant deux différentes courbes de variation du débit d'exhaure en fonction de la fiche relative du batardeau. En fait, on arrive aux mêmes constatations du cas circulaire en milieu fini.

L'analyse de tous les résultats ainsi obtenus montrent que le débit d'exhaure diminue avec l'augmentation du rapport  $f/2r \sqrt{K_h / K_v}$ , et il ne dépend pratiquement plus de l'épaisseur de la couche

perméable mais il dépend à la fois du rapport adimensionnel  $f/2r \sqrt{K_h/K_v}$  et de la perméabilité verticale surtout. Par contre, on voit que les pertes de charge augmentent au fera et en mesure que le rapport  $f/2r \sqrt{K_h/K_v}$  augmente.

De manière générale, ces constatations indiquent l'importance de la perméabilité du sol le long du tracé de l'écran et plus particulièrement l'influence de la perméabilité verticale que l'on ne sait pas déterminer précisément.

### III.6 CONFRONTATION AVEC LES RESULTATS EXISTANTS

Brillant, 1975 pour les batardeaux *circulaires* de fiche faibles dans un milieu *semi-infini* propose la

relation :

$$\frac{Q}{KH} = \frac{1}{\pi} \left\{ \text{Ln} \frac{4r}{f} - 0,167 \right\}$$

Par comparaison avec nos résultats et ceux de Brillant, 1975 son domaine d'application à 02 % près peut être défini par :  $f/2r < 0,5$  ;  $2r/e < 1,5$  ;  $f/e < 0,125$ .

Tableau III.10. Comparaison avec Brillant, 1975.

$f/2r$	Le débit calculé		Ecart %
	Flac2D	Le débit d'après Brillant, 1975	
0,125	0,675	0,687	1,74
0,2	0,525	0,537	2,23
0,25	0,460	0,466	1,28
0,325	0,382	0,383	0,26
0,5	0,245	0,246	0,40

On remarque que pour ces fiches faibles, l'écart ne dépasse pas 2,23 %.

### III.7 PROPOSITIONS POUR LE CALCUL DU DEBIT DANS LES BATARDEAUX CARRÉS SANS FOUILLE

Les différentes méthodes que nous venons de passer en revue laissent subsister des lacunes importantes, aussi proposons-nous de les compléter par les deux abaques construits à partir de nos simulations numériques *tridimensionnelles* conçues à l'aide du code Flac3D. Le premier (Figure III.4) donne le débit  $Q$  en fonction de la fiche relative  $f/e$  et la largeur relative  $b/e$  dans le domaine suivant :  $0,125 < f/e < 0,875$  et  $0,1 < 2r/e < \infty$ .

Le second (Figure III.22) concerne une zone où le débit n'est pratiquement fonction que de  $f/2r$  : il s'agit du domaine tel que :  $0,125 < f/2r < 1,75$ .

### III.8 PROPOSITIONS POUR LE CALCUL DU DEBIT DANS LES BATARDEAUX RECTANGULAIRE SANS FOUILLE

Pour ce cas, on propose les deux abaques suivants: le premier (Figure III.7) donne le débit  $Q$  en fonction de la fiche relative  $f/e$  et la largeur relative  $b/e$  dans le domaine:

$$0,125 < f/e < 0,875 ; 0,1 < 2R/e < \infty ; 1 < 2R/2r < 12.$$

Pour les batardeaux rectangulaires sans fouille de faibles largeurs, on propose de calculer le débit à l'aide de la relation :  $Q = Q_{plan} * F$  où  $F$  est un facteur de réduction dépendant à la fois de  $f/e$  et de  $2r/e$ . On peut estimer ce facteur à environ  $F = 0,85$ .

Le second (Figure III.23) concerne une zone où le débit n'est pratiquement fonction que de  $f/2r$  : il s'agit du domaine tel que :  $0,125 < f/2r < 1,75$  donc  $2 < R < 24$ .

### III.9 DEBIT D'EXHAURE DES BATARDEAUX TRIDIMENSIONNELS AVEC FOUILLE DANS UN MILIEU FINI - ALIMENTATION VERTICALE

En effet, ce problème ne conduit pas, en général, à des solutions simples. Cependant, les relations analytiques de Mandel pour un écoulement plan sont applicables aussi à ce cas pour peu que la fouille soit large.

#### III.9.1 Cas de batardeau tridimensionnel carré avec fouille dans un milieu fini

On adopte pour ce cas la même méthode que pour le batardeau carré sans fouille, mais en considérant une *excavation* dans une couche saturée de sol reposant sur une base imperméable. C'est pourquoi un nouveau paramètre géométrique  $e_2$  (épaisseur du sol dans le côté aval) est introduit dans ces cas. Le niveau de la surface phréatique (surface libre de l'eau) est constant et correspond au sommet de la surface du sol. L'excavation aura une coupe transversale carrée de dimensions  $x, y$  et une profondeur de  $z$ . La fouille est entourée par des écrans étanches verticaux qui se prolongent de  $f_2$  au-dessous du fond de la fouille. L'objectif du problème est d'évaluer le débit total et les pertes de charge au fond de la fouille résultant de l'excavation.

De même, ce problème est à *trois dimensions* mais, par symétrie, un quart du domaine peut être considéré dans l'analyse. Le débit obtenu sera multiplié par *quatre* pour obtenir le débit total.

La Figure III.27 présente le modèle adopté en Flac3D et le maillage avec une excavation.

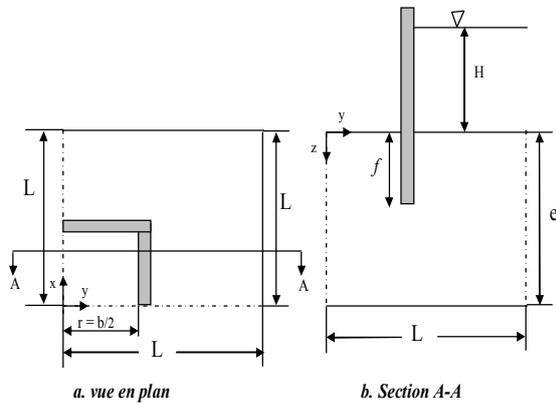


Figure III.26. Batardeau carré avec fouille-  
Excavation – Un quart de la section.

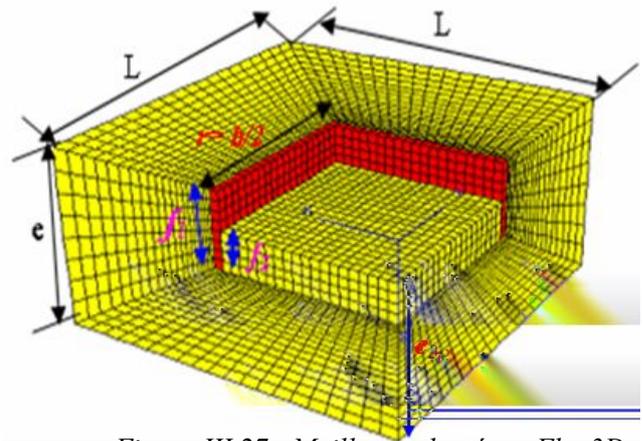


Figure III.27. Maillage adopté en Flac3D-  
Batardeau carré avec fouille.

Puisqu' on s'intéresse à l'état final de l'écoulement permanent, la pression interstitielle est fixée à *zéro* au fond de l'excavation, l'écoulement de l'eau est permis et le modèle est cyclé davantage. La valeur du débit que nous avons ainsi calculée est transcrite sur l'abaque de la Figure III.28 donnant la variation du débit total en fonction de  $2r/e_1 \sqrt{K_h/K_v}$ , avec  $e_1$  l'épaisseur du sol dans le côté amont

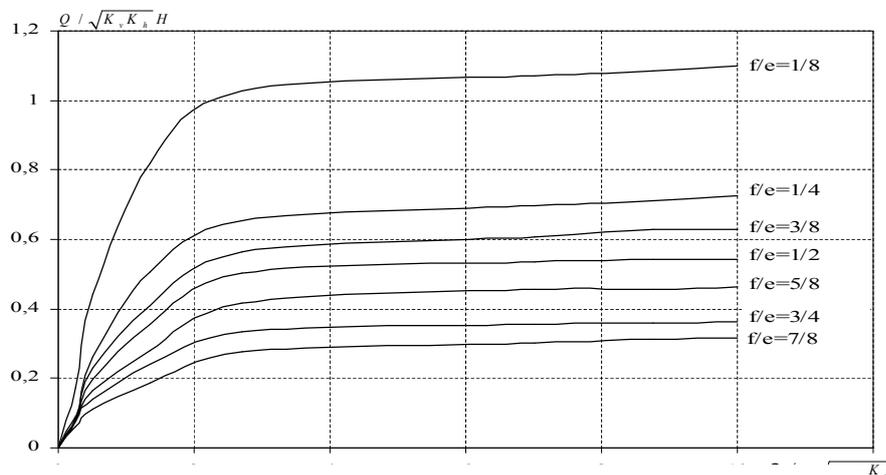


Figure III.28. Calcul du débit total. Batardeau carré avec fouille.

- Dans le coté aval, on peut voir que le débit augmente avec l'augmentation de la largeur relative du batardeau  $2r/e_2$ , en outre, il diminue avec l'augmentation de sa fiche relative. Cependant le débit reste constant pour les grandes valeurs de  $2r/e_2$  quelque soit la valeur de  $f_2/e_2$  (Figure III.29).
- Quant au coté amont, (Figure III.30) il est clair que les pertes de charge diminuent avec l'augmentation de la largeur relative du batardeau  $2r/e_1$ , et augmente avec l'augmentation de sa fiche relative.

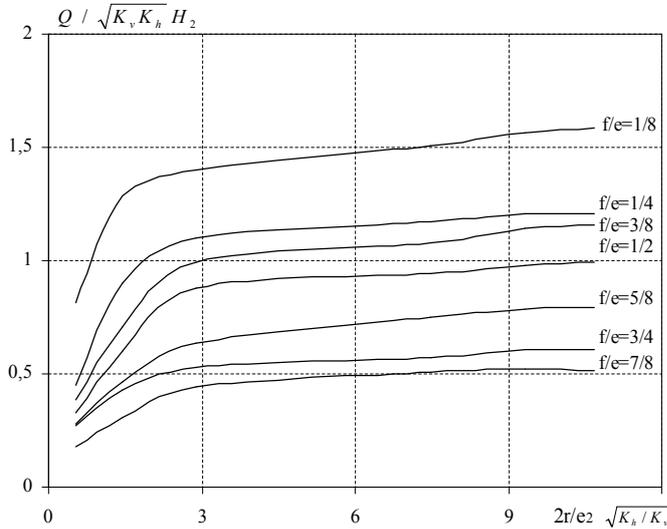


Figure III.29. Calcul du débit dans le coté aval.

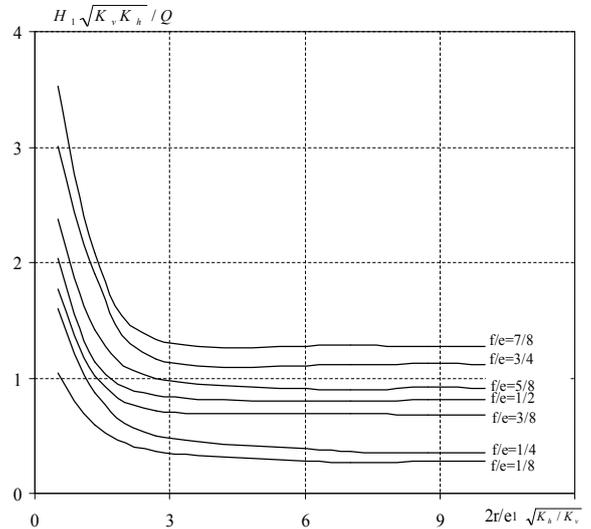


Figure III.30. Calcul de pertes de charge dans le coté amont.

- Il apparaît des figures III.31, III.37 et III.44 que les pertes de charge augmentent au fur et à mesure que  $2r/e_2$  diminue et  $f_2/e_2$  augmente, cela est dû généralement à la longueur du trajet d'écoulement contournant l'écran étanche.

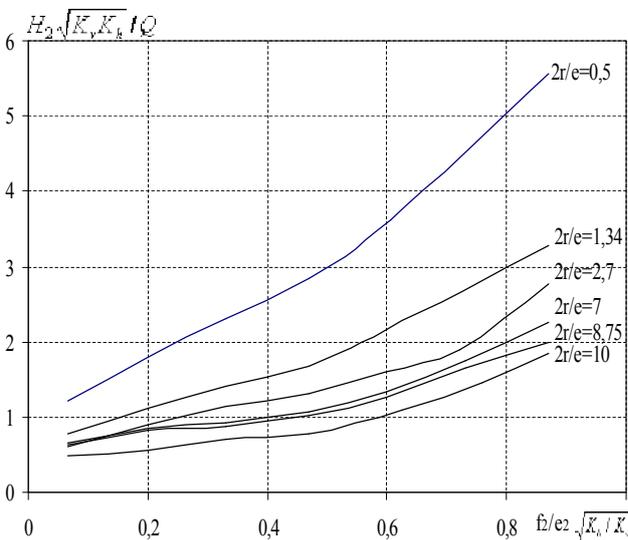


Figure III.31. Variation des pertes de charge en fonction de  $f_2/e_2 \sqrt{K_h / K_v}$  dans le coté aval.

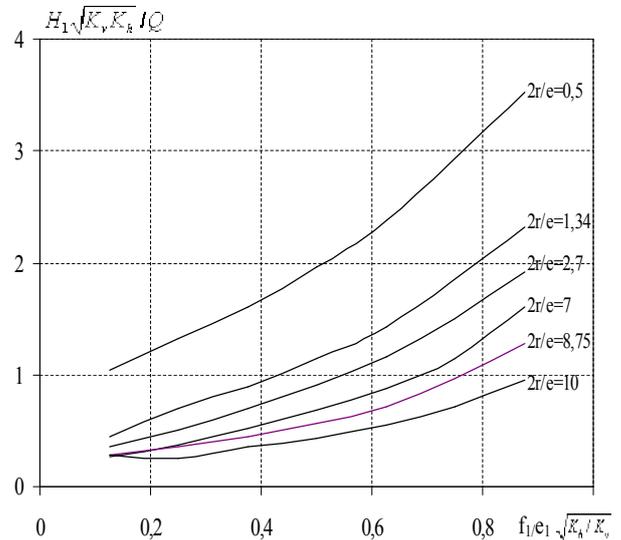


Figure III.32. Variation des pertes de charge en fonction de  $f_1/e_1 \sqrt{K_h / K_v}$  dans le coté amont.

- Quant au coté amont, les pertes de charge augmentent avec l'augmentation de  $f_1/e_1$ , c.-à-d. avec la longueur du trajet d'écoulement (Figure III.32, Figure III.36 et Figure III.43), cependant, elles diminuent avec la largeur relative du batardeau. En outre, on peut voir que les courbes dont les largeurs sont voisines sont presque confondues et une courbe unique peut les représenter.

### III.9.2 Débit d'exhaure des batardeaux tridimensionnels rectangulaires avec fouille dans un milieu fini

Dans ce cas, nous allons considérer un batardeau de forme *rectangulaire* avec fouille en fixant la demi-largeur  $r$  où la largeur  $b = 2r$ . La procédure de simulation est similaire au cas d'un batardeau *rectangulaire* sans fouille, néanmoins un nouveau paramètre géométrique  $e_2$  est introduit dans les modèles de simulation qui suivent.

La Figure III.33 illustre un exemple du modèle ainsi le maillage adopté.

Afin de donner plus de validité aux relations théoriques en écoulement plan développées au cours des chapitres précédents, plusieurs cas de calcul numérique sont testés, en variant la demi-longueur  $R$  du batardeau et la fiche relative  $f/e$  de l'écran étanche d'une part et le paramètre  $e_2$  d'autre part.

Tous les résultats du calcul numérique obtenus à l'aide du code Flac3D sont regroupés dans les figures III.34, III.35, III.36, III.37 et III.38.

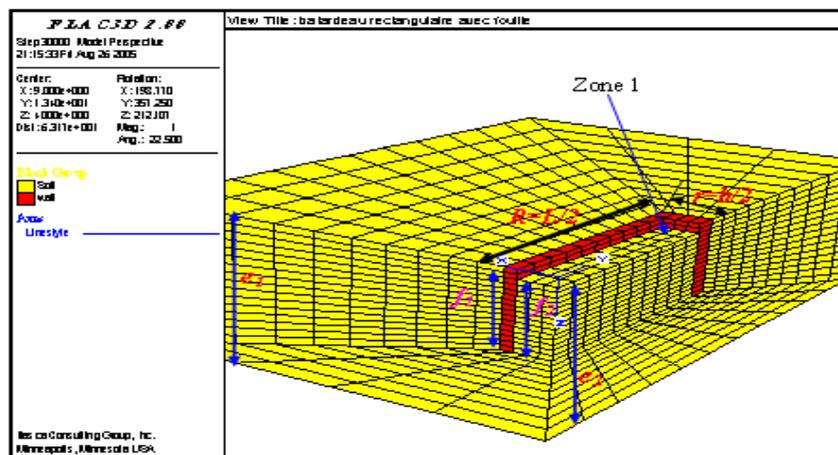


Figure III.33. Maillage adopté en Flac3D - Batardeau rectangulaire avec fouille.

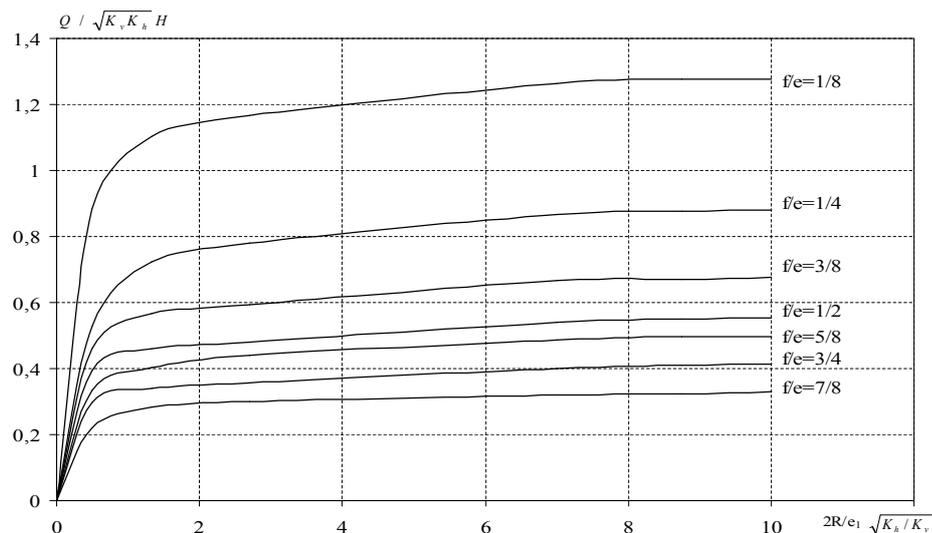


Figure III.34. Calcul du débit total. Batardeau rectangulaire avec fouille.

- Pour le coté aval (Figure III.35), on note les mêmes constatations que la Figure III.29.
- Quant au coté amont (figure III.36), on note aussi les mêmes constatations que la Figure III.30.

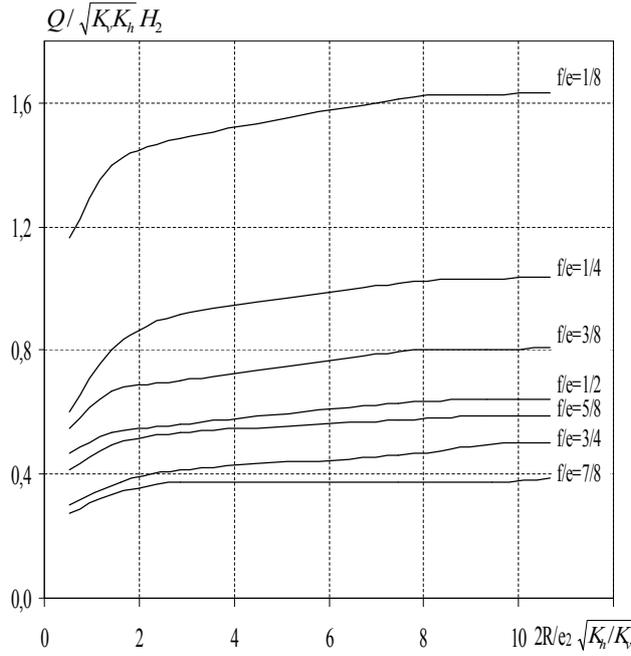


Figure III.35. Calcul du débit dans le côté aval.

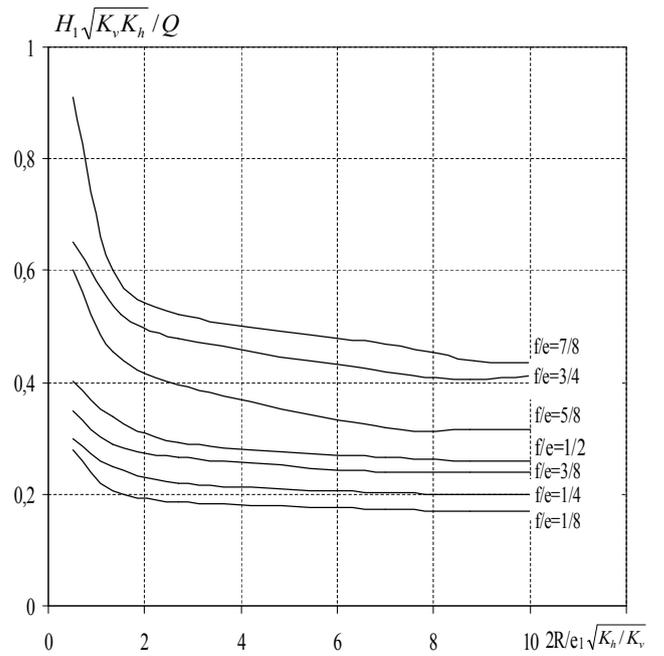


Figure III.36. Calcul de pertes de charge dans le côté amont.

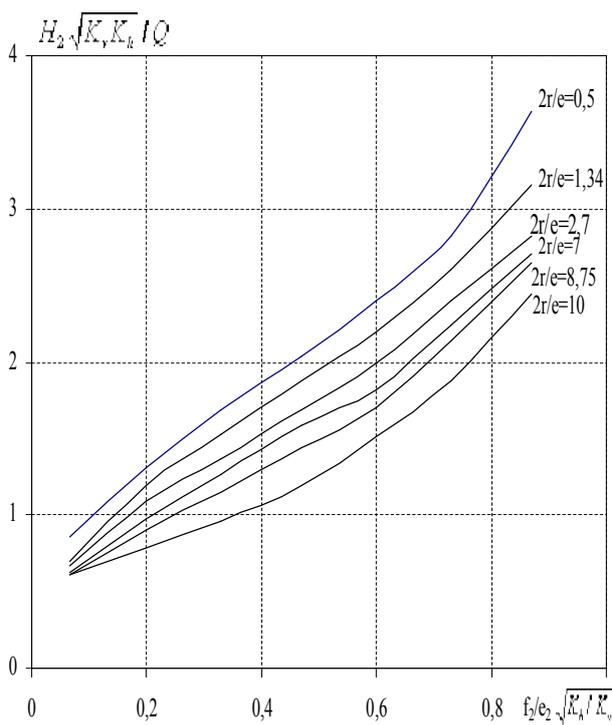


Figure III.37. Variation des pertes de charge en fonction de  $f_2/e_2 \sqrt{K_h / K_v}$  dans le côté aval.

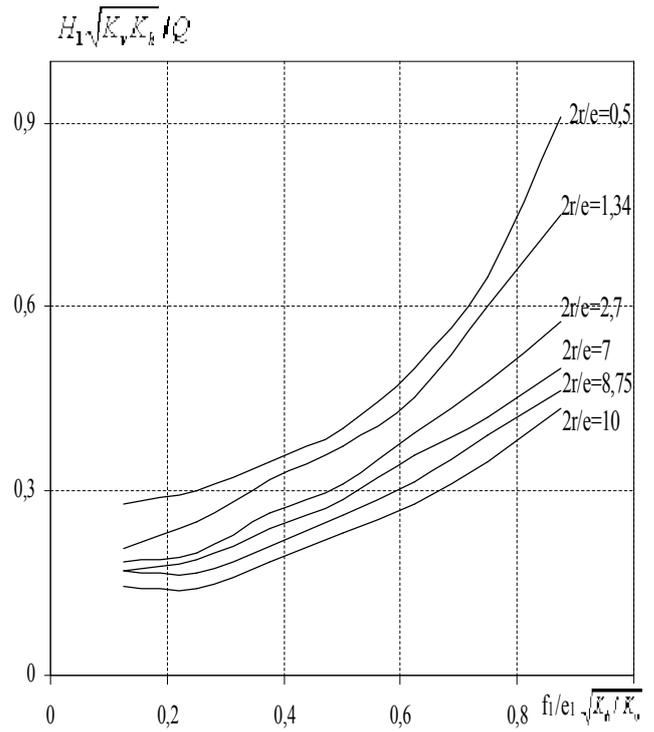


Figure III.38. Variation des pertes de charge en fonction de  $f_1/e_1 \sqrt{K_h / K_v}$  dans le côté amont.

### III.9.3 Débit d'exhaure des batardeaux axisymétriques circulaires avec fouille dans un milieu fini

#### III.9.3.1 Calcul du débit d'exhaure et pertes de charge

On adopte pour ce cas la même méthode que pour le batardeau *circulaire* sans fouille, bien que dans ce cas, un nouveau paramètre géométrique  $e_2$  est introduit dans les modèles de simulation qui suivent. Ce problème ne conduit pas, en général, à des solutions simples. Cependant, les relations analytiques de Mandel, 1939 pour un écoulement plan sont applicables aussi à ce cas pour peu que la fouille soit large. Les valeurs du débit calculé sont représentées sur l'abaque de la Figure III.40.

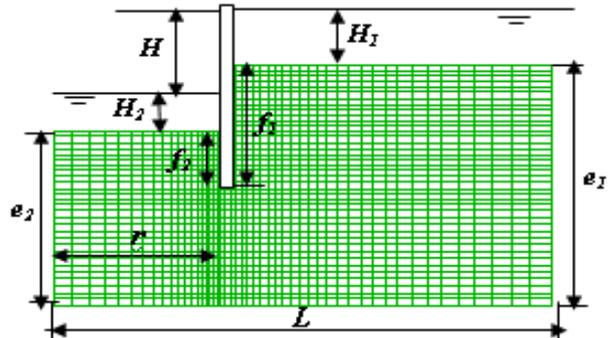


Figure III.39. Maillage axisymétrique adopté en Flac2D - Batardeau circulaire avec fouille.

En comparaison avec l'abaque de Kastner, 1982 (fouille circulaire), l'écart entre le débit calculé et débit mesuré étant au maximum 5 %. Du même, l'écart entre les pertes de charge amont est inférieur à 5 %.

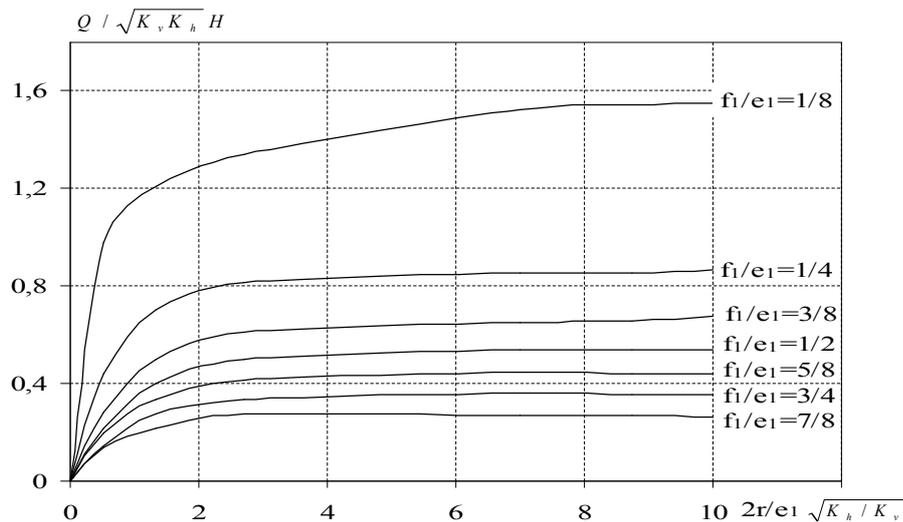


Figure III.40. Calcul du débit total.

- Dans le coté aval, on peut voir les mêmes constatations que les figures III.29 et III.35.

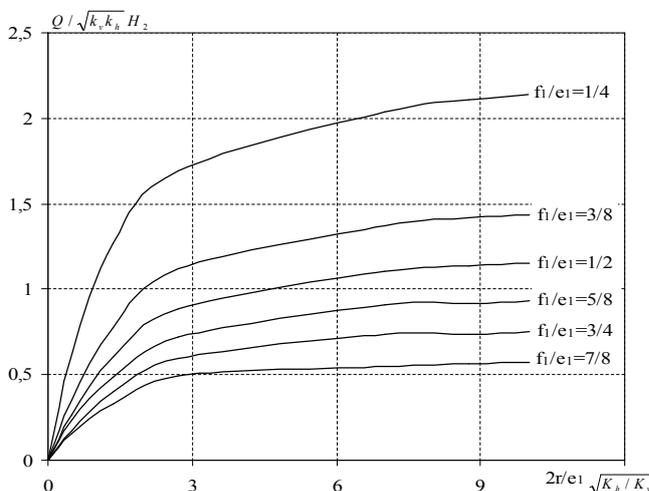


Figure III.41. Calcul du débit dans le coté aval.

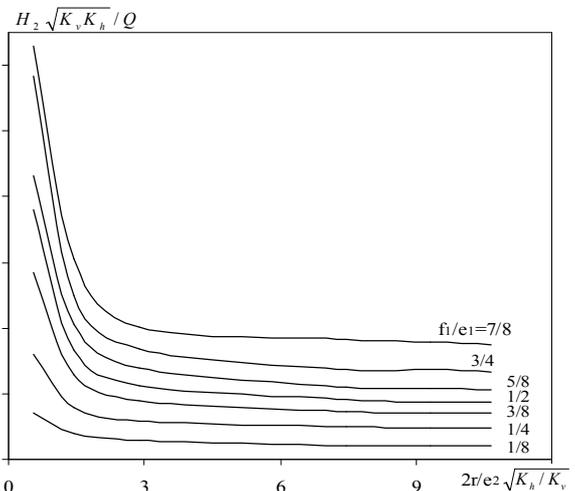


Figure III.42. Calcul de pertes de charge aval.

• En ce qui concerne le coté amont, la Figure III.43 apparaît les même constatations que la Figures III.30.

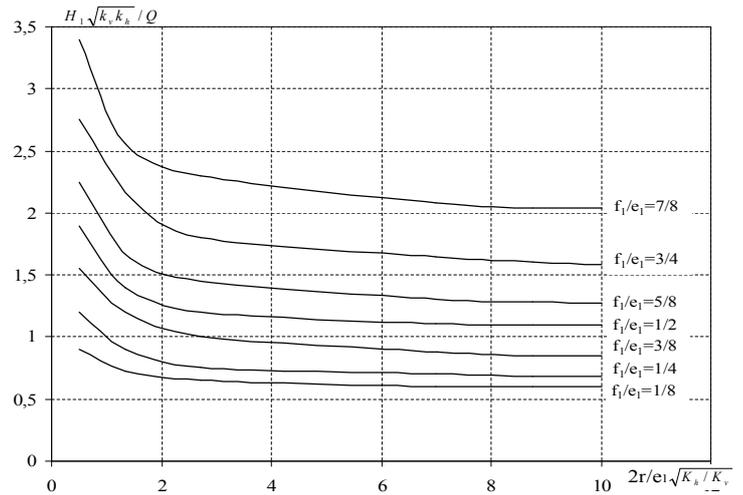


Figure III.43. Calcul de pertes de charge amont.

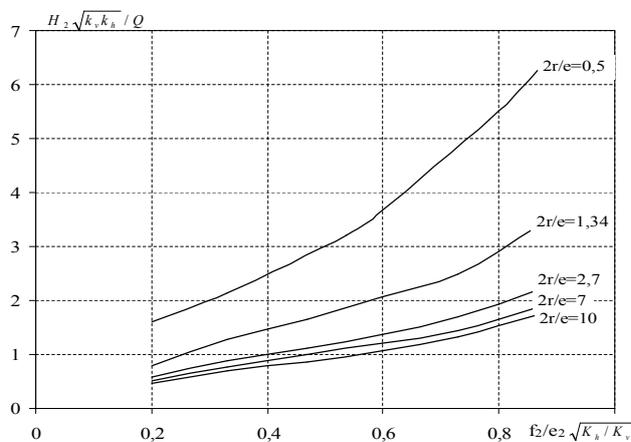


Figure III.44. Variation des pertes de charge en fonction de  $f_2/e_2 \sqrt{K_h/K_v}$  dans le coté aval.

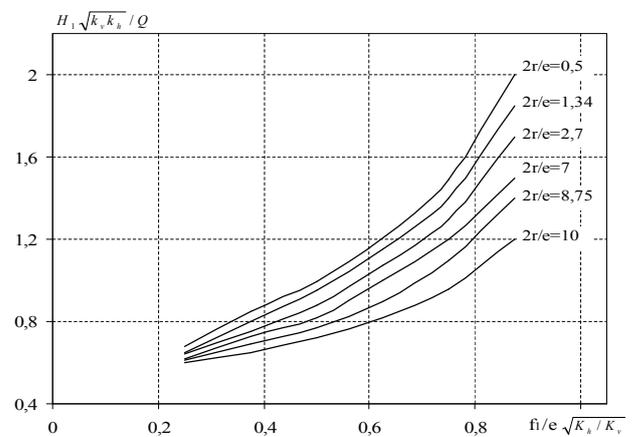


Figure III.45. Variation des pertes de charge en fonction de  $f_1/e_1 \sqrt{K_h/K_v}$  dans le coté amont.

### III.9.3.2 Influence de l'épaisseur de l'écran étanche

On étudie aussi pour ce cas, l'influence de l'épaisseur de l'écran étanche sur les résultats du débit d'exhaure. Les résultats du calcul numérique sont illustrés dans la Figure III.46. On trouve les mêmes constatations que le cas circulaire sans fouille, cependant l'influence de l'épaisseur de l'écran sur les calculs dans ce cas est remarquable comparé au cas du batardeau sans fouille.

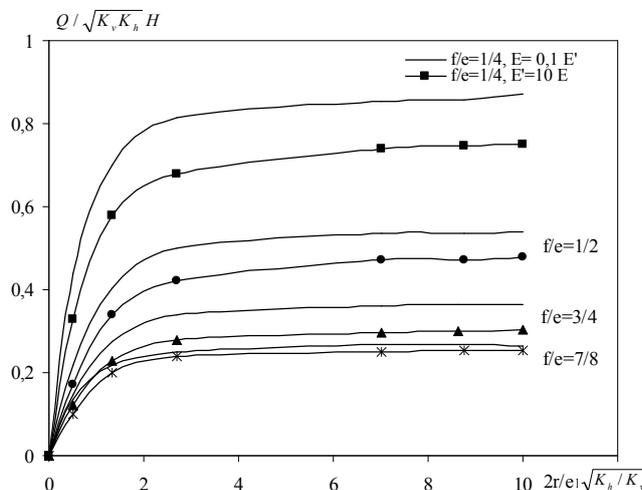


Figure III.46. Comparaison du débit: rapport d'épaisseur de l'écran  $E/E'=0,1$ .

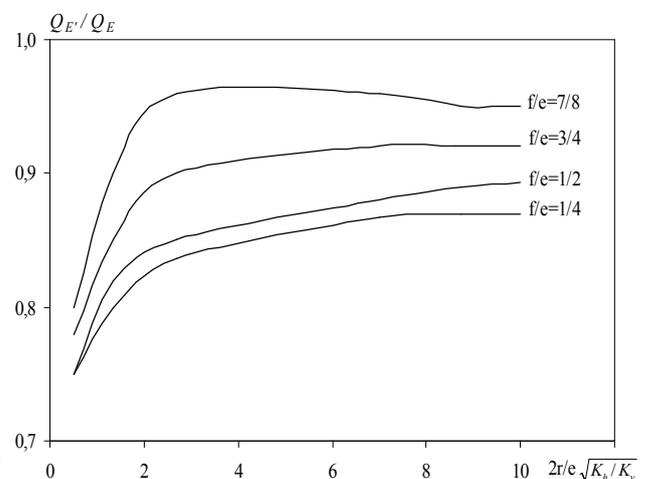


Figure III.47. Variation du rapport de débits  $Q_{E'}/Q_E$ .

### III.10 CONFRONTATION AUX RESULTATS EXISTANTS

#### III.10.1 Batardeau carré avec fouille dans un milieu fini

De même que le cas d'un batardeau *carré* sans fouille dans un milieu fini, il serait intéressant de vérifier si le rapport des débits tend bien vers 1 lorsque  $2r/e$  devient très grand.

Tableau III.11. Variation du rapport des débits en fonction de la fiche et de la largeur relative du batardeau.

$f/e$	$2r/e$	Le débit unitaire - fouille carrée - d'après Flac3D	Le débit - fouille circulaire - d'après Flac2D	$Q_{3D}/Q_{2D}$
1/4	2,7	0,81	0,812	0,99
1/4	8,75	0,842	0,857	0,98
3/8	1,34	0,410	0,498	0,83
3/8	2,7	0,564	0,608	0,93
3/8	8,75	0,628	0,657	0,96
1/2	0,5	0,197	0,2195	0,90
1/2	7	0,53	0,535	0,99
5/8	0,5	0,17	0,19	0,89
5/8	2,7	0,41	0,413	0,99
3/4	0,5	0,145	0,147	0,98
3/4	7	0,357	0,360	0,99
7/8	0,5	0,11	0,13	0,85
7/8	2,7	0,27	0,28	0,96

Ces résultats montrent dans la globalité que le rapport des débits tend bien vers 1 lorsque  $2r/e$  devient très grand et le débit du batardeau carré se rapproche de celui des batardeaux circulaires. De même, pour les batardeaux de petite dimension le débit unitaire se rapproche de celui des batardeaux circulaires, ceci est expliqué par la tendance du rapport des débits vers 1.

#### ➤ Pertes de charge dans le coté aval

Mandel, 1939 a proposé deux relations pour le calcul de la perte de charge partielle pour un écoulement *plan avec fouille* dans un milieu *fini* :

$$\text{Si } f < e/2 \quad \frac{H \sqrt{K_v \cdot K_h}}{Q} = \frac{\pi}{2 \ln (2 \cot g(\pi f / 4e))}$$

$$\text{Si } f > e/2 \quad \frac{H \sqrt{K_v \cdot K_h}}{Q} = \frac{2 \ln 2 \cot g\left(\frac{\pi}{4}\left(1 - \frac{f}{e}\right)\right)}{\pi}$$

Dans ce cas, on peut noter à partir de ces résultats que les pertes de charge dans le coté aval restent toujours supérieures à celles en écoulement plan et ceci même pour les fortes largeurs du batardeau, et on constate que le rapport entre les pertes de charges 3D et celles en *plan* est très petit pour les fouilles étroites, et dès que  $2r/e_1=2,7$ , ce rapport augmente et tend presque vers 1 pour de très fortes largeurs du batardeau. En outre les pertes de charge dans le batardeau carré sont supérieures que celles du batardeau *circulaire*. Tandis que dans le cas rectangulaire, ce rapport ne tend pas vers l'unité.

Tableau III.12. Rapport de pertes de charge (coté aval).  $f/e = 7/8$ . Batardeau carré avec fouille.

$2r/e$	Flac3D $H_{2\text{carré}}$	Mandel, 1939 $H_{2\text{plan}}$	$H_{2\text{plan}}/H_{2\text{carré}}$
0,5	5,563636364	1,876726558	0,33
1,34	3,2696	1,876726558	0,57
2,7	2,268	1,876726558	0,82
7	1,983058824	1,876726558	0,94
10	1,949206349	1,876726558	0,96

### III.10.2 Batardeau rectangulaire avec fouille dans un milieu fini

Pour ce cas, on propose le facteur réducteur du débit en multipliant les résultats en écoulement plan par ce facteur pour trouver les résultats en *trois dimensions*.

#### ➤ Pertes de charge dans le coté aval

En effet, les mêmes constatations peuvent être observées : le rapport entre les pertes de charges *tridimensionnelles* et celles en plan est très petit pour les fouilles étroites. De plus, ce rapport augmente avec l'augmentation du rapport  $2r/e$ .

Tableau III.13. Rapport de pertes de charge (coté aval).  $f/e = 7/8$ . Batardeau rectangulaire avec fouille.

$2r/e$	Flac3D	Mandel	$H_{2\text{ plan}} / H_{2\text{ rectangulaire}}$
	$H_{2\text{ rectangulaire}}$	$H_{2\text{ plan}}$	
0,5	3,64	1,876726558	0,52
1,34	2,97	1,876726558	0,63
2,7	2,67	1,876726558	0,70
7	2,66	1,876726558	0,71
10	2,59	1,876726558	0,73

### III.10.3 Batardeau circulaire avec fouille dans un milieu fini

1- Kastner, 1982 a proposé un abaque pour les écrans circulaires fichés dans un milieu fini, l'écart comparé à nos résultats est comprise entre 0,6 et 06 % (voir Tableau III.14).

2- Mandel, 1939 a proposé deux relations pour le calcul de la perte de charge partielle pour un écoulement *plan* avec fouille dans un milieu fini.

Les tableaux suivants résument les résultats obtenus par les différentes méthodes de calcul ci-dessus. Ces résultats, avec des écarts n'excédant pas 06 % confirment dans un premier temps, la proximité du modèle *axisymétrique* et les calculs tridimensionnels par analogie électrique dans les conditions de maillage présentes, et une bonne concordance avec les résultats en plan pour les batardeaux larges dans un second temps.

#### ➤ Le débit dans le coté aval

##### 1. Comparaison du débit avec Kastner, 1982

Tableau III.14. Comparaison du débit d'exhaure.

$f_2/e_2$	$2r/e_2$	Le débit		Ecart %
		- Fouille circulaire - D'après Flac2D	- Fouille circulaire - D'après Kastner, 1982	
0,2	2,88	1,115	1,15	3,0
0,46	0,53	0,263	0,28	6,0
0,73	0,53	0,171	0,17	0,6
0,73	1,43	0,400	0,38	5,0
0,87	1,43	0,327	0,32	2,2
0,87	10,67	0,546	0,5	5,0

##### 2. Comparaison avec Mandel, 1939

#### ➤ Pertes de charge dans le coté aval

La comparaison des pertes de charge dans le coté aval avec l'écoulement plan montre que l'écart de calcul peut atteindre **16 %** (Tableau III.15) dans le cas de grandes fouilles. Ce qui montre que les pertes de charge aval restent toujours supérieures aux pertes de charge en écoulement plan même pour les batardeaux larges. Par contre, ces écarts se compensent dans l'écoulement global. En outre, les relations de Mandel, 1939 ne sont valables qu'aux batardeaux très larges et elles portent un grand risque si on les applique aux batardeaux étroits, car dans ce cas l'erreur peut atteindre **73 %** (Tableau III.15).

Tableau III.15. Comparaison des pertes de charge **aval** avec l'écoulement plan.

$f_1/e_1$	$2r/e_1$	Pertes de charge Fouille circulaire Flac2D	Pertes de charge Batardeau plan D'après Mandel, 1939	Ecart %
1/4	0,5	1,6091	0,6189	61
1/4	1,34	0,7897	0,6189	21
5/8	0,5	4,3131	1,1578	73
5/8	1,34	2,0596	1,1578	43
5/8	2,7	1,3827	1,1578	16
7/8	0,5	6,2909	1,8767	70
7/8	1,34	3,0556	1,8767	38

➤ **Pertes de charge dans le coté amont**

**1. Comparaison avec l'abaque de Kastner, 1982**

Pour le coté amont, en comparaison avec l'abaque de Kastner, 1982 (fouille circulaire), l'écart entre les pertes de charge amont est inférieur à 5 % (Tableau III.16).

Tableau III.16. Comparaison des pertes de charge amont.

$f_1/e_1$	$2r/e_1$	Pertes de charge Fouille circulaire Flac2D	Pertes de charge Fouille circulaire D'après Kastner, 1982	Ecart %
1/4	7	0,68	0,68	0,0
1/4	8,75	0,69	0,68	1,5
1/4	10	0,69	0,68	1,5
3/8	7	0,81	0,80	1,2
3/8	10	0,79	0,80	1,2
1/2	8,75	0,99	1,03	3,9
1/2	10	1,00	1,03	2,9
7/8	7	1,90	2,00	5,0
7/8	10	2,07	2,05	0,9

**2. Comparaison avec les relations de Mandel, 1939**

Quant à la comparaison des pertes de charge dans le coté amont par rapport à l'écoulement plan, l'écart peut dépasser **17 %** dans le cas de grandes fouilles (Tableau III.16). Ainsi, ces pertes de charge amont restent toujours **inférieures** aux pertes de charge en écoulement plan même pour les batardeaux larges.

Tableau III.16. Comparaison des pertes de charge amont avec l'écoulement plan.

$f_1/e_1$	$2r/e_1$	Pertes de charge Fouille circulaire Flac2D	Pertes de charge Batardeau plan D'après Mandel, 1939	Ecart %
3/8	2,7	0,7495	0,8322	10
1/2	3	0,8776	0,9967	12
5/8	2,7	1,0388	1,2016	13
3/4	3	1,2693	1,4704	13
7/8	2,7	1,584	1,9181	17

En effet, il est évident que, contrairement au cas de l'écoulement global les pertes de charge partielles restent différentes de celles relatives à l'écoulement plan. Même pour les fortes largeurs de batardeau, les pertes de charge intérieures et extérieures restent respectivement supérieures et inférieures. Par contre, ces écarts se compensent dans l'écoulement global, les relations de Mandel en écoulement plan deviennent utilisables dès que :

- $2r/e_1$  est égal à 2,7 avec un écart inférieur à 05 % pour les batardeaux **carrés**.
- $2R/e=2,5$  où  $R=5r$  avec un écart inférieur à 05% pour les batardeaux **rectangulaires**.
- $2r/e_1$  est égal à 2,7 avec un écart inférieur à 05 % pour les batardeaux **circulaires**.

### III.11 BATARDEAUX TRIDIMENSIONNELS AVEC FOUILLE EN MILIEU SEMI-INFINI - ALIMENTATION VERTICALE

Dans ce cas, nous avons choisi de simuler une couche de sol d'une épaisseur infinie, où l'influence de l'épaisseur de la couche du sol  $e$  n'est pas apparente mais plutôt négligeable. On note que le débit dans ce cas diminue au fur et à mesure que le rapport  $f/2r$  augmente, d'où le débit dépend de ce rapport et de la perméabilité du milieu considéré.

#### III.11.1 Batardeau tridimensionnel carré avec fouille dans un milieu semi-infini

La variation des débits et les pertes de charges aval en fonction de la fiche relative obtenue par présentes diverses simulations est illustrée dans les figures III.48 et III.49.

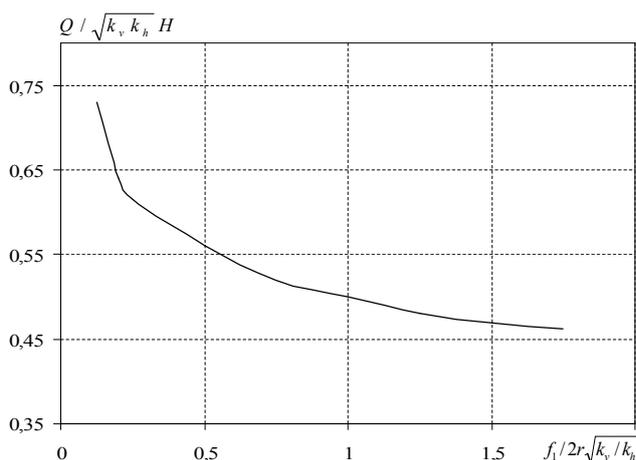


Figure III.48. Calcul du débit total.

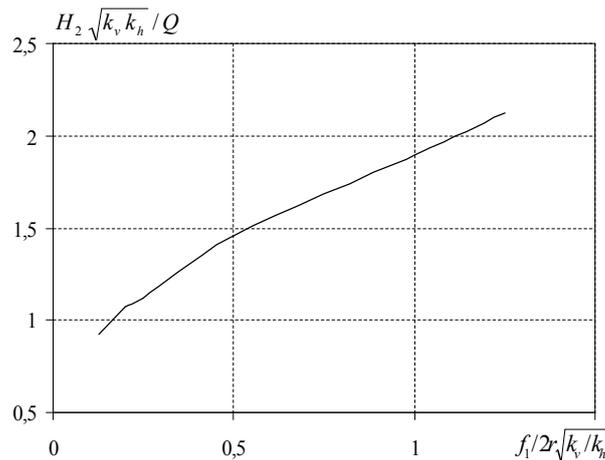


Figure III.49. Calcul de pertes de charge dans le coté aval.

#### III.11.2 Batardeau tridimensionnel rectangulaire avec fouille dans un milieu semi-infini

La variation des débits en fonction de la fiche relative est illustrée dans la Figure III.50.

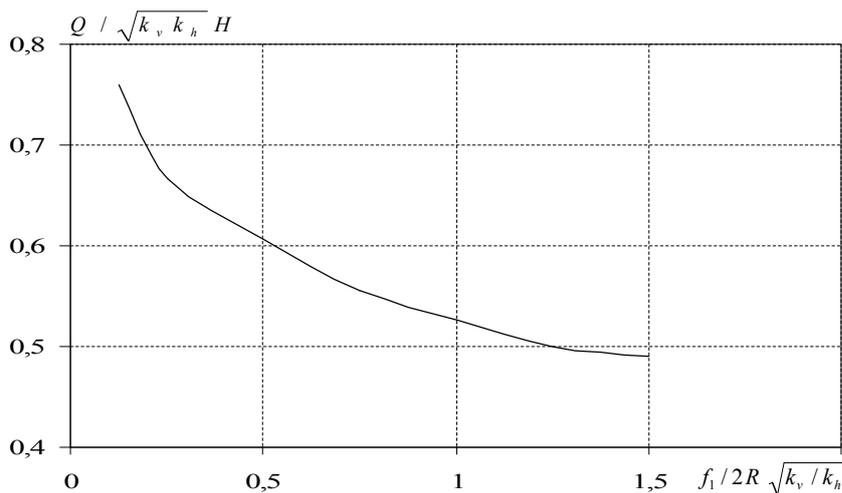


Figure III.50. Calcul du débit total.

Les figures III.51 et III.52 représentent respectivement la variation des pertes de charge en fonction de la fiche relative du batardeau  $f/2r$ , dans le coté amont et aval. Ces figures montrent que les pertes de charges partielles augmentent avec l'augmentation de la fiche relative du batardeau.

Il est intéressant de signaler que les pertes de charge dans le coté aval sont nettement supérieures à celles du coté amont.

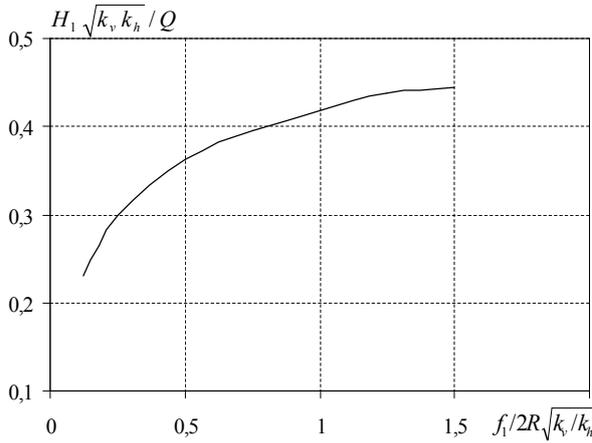


Figure III.51. Calcul de pertes de charge dans le coté amont.

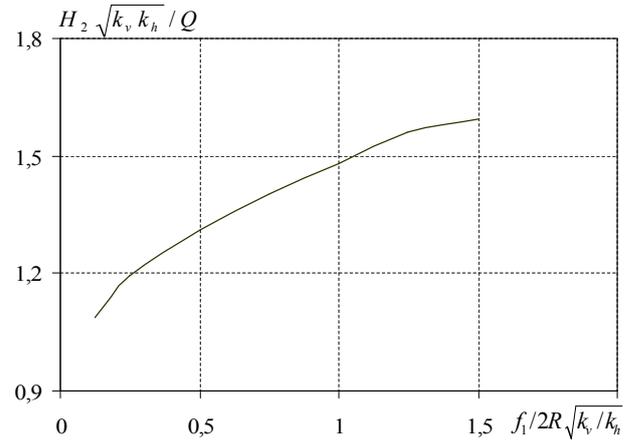


Figure III.52. Calcul de pertes de charge dans le coté aval.

### III.11.3 Batardeau axisymétrique circulaire avec fouille dans un milieu semi-infini

On présente sur la Figure III.53 la variation de la perte de charge totale en fonction de la fiche relative du batardeau  $f/2r$ . On constate que les valeurs des pertes de charge totales augmentent avec l'augmentation des valeurs de  $f/2r$ .

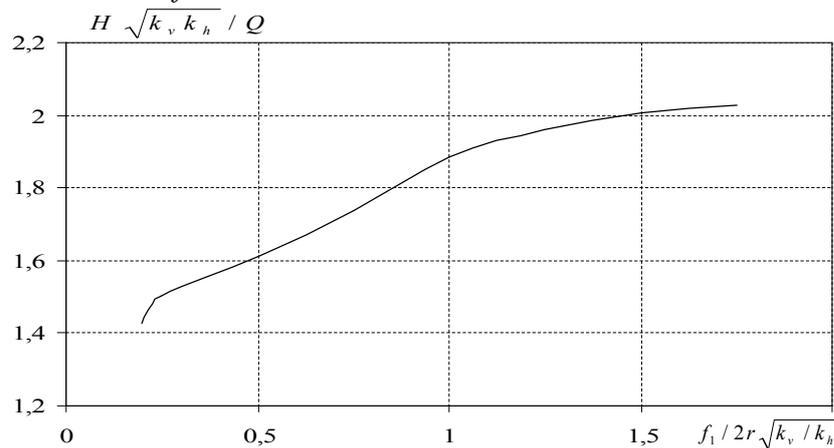


Figure III.53. Calcul de pertes de charge totales.

Les figures III.54 et III.55 représentent respectivement la variation des pertes de charge en fonction de la fiche relative du batardeau  $f/2r$ , dans le coté *amont* et *aval*.

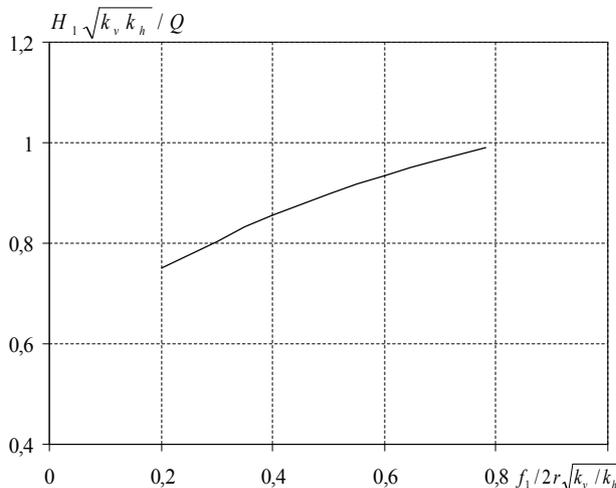


Figure III.54. Calcul de pertes de charge dans le coté amont.

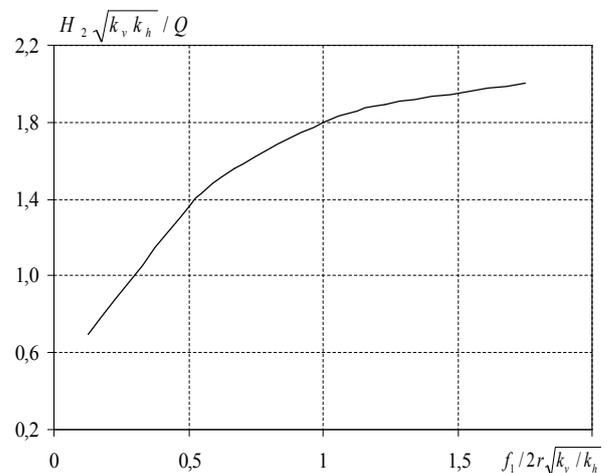


Figure III.55. Calcul de pertes de charge dans le coté aval.

Pour pouvoir faire des confrontations aux résultats existants en *plan* et en 3D, on représente sur la Figure III.56 la variation du débit unitaire en fonction de la fiche relative du batardeau.

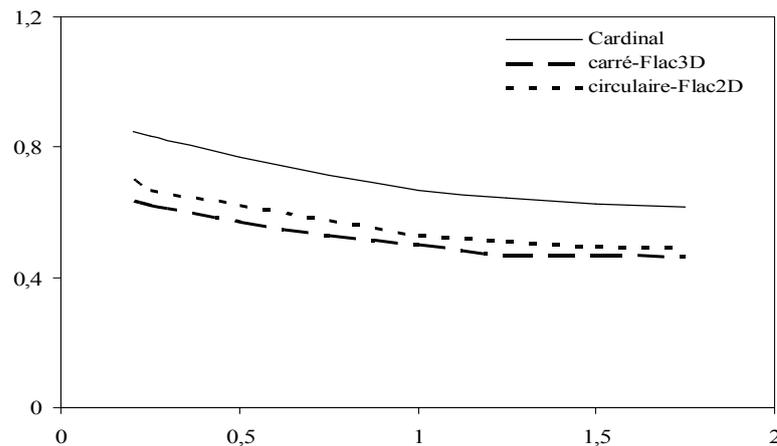


Figure III.56. Comparaison du débit unitaire.

Cette figure, montre un grand écart entre les courbes du débit obtenu par les simulations numériques (*axisymétriques* et *tridimensionnelles*) et l'abaque de Cardinal et De Cazenove, 1971 en écoulement *plan* pour le cas d'un milieu *semi-infini*, ce qui montre que le débit en 3D est réduit dans ce cas. En outre, le débit pour le cas *carré* (obtenu par les simulations numériques 3D avec Flac3D) est inférieur au cas *circulaire*, à cause des pertes de charge engendrées dans les *coins* du batardeau *carré* qui sont plus grandes que le cas de batardeau *circulaire*.

### III.13 CONCLUSION

Le calcul numérique présenté dans ce chapitre modélise le cas d'un batardeau avec une enceinte de forme *carrée*, *rectangulaire* et *circulaire*. On s'est intéressé au régime hydraulique permanent à long terme avant et après l'excavation dans un milieu homogène anisotrope dont le comportement du sol est élastique.

Ce chapitre constitue en quelque sorte une expérimentation numérique de la modélisation *plane*, *tridimensionnelle* et *axisymétrique* de l'écoulement contournant des écrans étanches.

Nous avons implanté tous ces modèles dans le code de calcul aux différences finies Flac3D et Flac2D (en *axisymétrie* et en *plan*). La démarche consiste dans un premier temps à calculer le débit d'exhaure, et puis les pertes de charges dans un second temps. Le calcul des pertes de charge nous servira pour l'évaluation du gradient adimensionnel et les facteurs de sécurité contre la boulangerie et le soulèvement. On a fait varier la largeur du batardeau à chaque pas de temps et on continue le calcul avec la fiche relative de l'écran étanche.

Les cas de batardeau *carré* et *rectangulaire* nous ont permis de vérifier cette implantation dans un cas purement hydraulique pour vérifier la disparition de l'effet *tridimensionnel* au terme du débit. Ensuite la réalisation d'un calcul numérique sur un modèle *axisymétrique* de batardeau *circulaire* nous a permis de vérifier la validité de ce modèle par rapport aux calculs tridimensionnels. Ces valeurs ont été comparées avec les solutions analytiques et les différents abaques donnés par plusieurs auteurs en tri et bi-dimensions.

À côté des avantages et des inconvénients, il convient de signaler que les calculs plans sont généralement du côté de la sécurité en exagérant les coefficients de sécurité et surestimant les débits. En revanche, les résultats obtenus avec un modèle tridimensionnel sont plus réalistes du moment qu'ils représentent les cas de configurations rencontrées dans la pratique. Cette observation ne doit pas conduire les projeteurs à ne faire que des calculs bidimensionnels. Il est des cas pour lesquels la différence peut être très importante et d'autres pour lesquels une approche bidimensionnelle ignore totalement certains phénomènes. Lorsque le calcul tridimensionnel s'impose (c'est-à-dire si le modèle bidimensionnel ne peut être justifié), il faut le réaliser. Il vaut mieux effectuer un calcul tridimensionnel avec une loi de comportement simple et un maillage aussi fin que possible, plutôt

qu'un calcul bidimensionnel inadapté avec une loi de comportement avancée (élasto-plasticité avec écrouissage) et un maillage très raffiné.

La décision d'élaborer un modèle tridimensionnel dépend certes largement de critères économiques, mais elle doit aussi tenir compte du degré d'erreur qu'est prêt à accepter l'ingénieur lorsqu'il réalise des calculs bidimensionnels alors qu'il sait que le problème est véritablement tridimensionnel. Les techniques proposées pour introduire certains effets tridimensionnels dans les modèles plans réduisent l'écart, mais peuvent parfois ignorer certains phénomènes d'interactions et conduisent à des résultats plus conservateurs que la réalité.

Néanmoins, les calculs numériques tridimensionnels commencent à faire partie de la vie des ingénieurs-géotechniciens et les publications se multiplient dans ce domaine.

- Le modèle **axisymétrique** que nous avons implanté dans le code de calcul Flac2D a été validé sur le modèle d'analogie électrique de Kastner, 1982 et les méthodes de calcul en plan pour les fouilles larges.
- En particulier, nous avons pu vérifier l'hypothèse d'un batardeau circulaire de rayon *infini* pouvant être assimilé à un batardeau *plan*, et le coefficient minorateur défini par Davidonkoff et Franke, 1965 en 3D tend vers *l'unité*.
- Une formule de calcul du rapport de débit circulaire et plan en fonction du rayon et de la fiche relative du batardeau a été proposée.
- Avec des temps de calcul fortement réduits, le modèle **axisymétrique** apparaît comme une alternative au calcul **tridimensionnel** simulant les écoulements autour des batardeaux **circulaires**.
- Il ressort de cette étude que la vitesse de résolution obtenue par un modèle numérique en **axisymétrie** permet d'effectuer des études en un court laps de temps tout en obtenant des résultats similaires à ceux du calcul en **3D**.

En fait, les modèles décrits dans ce chapitre ont fait l'objet d'une série de tests de validation. Une attention particulière a été portée au temps nécessaire pour atteindre l'équilibre lors de l'augmentation de la taille du modèle. L'ensemble des résultats obtenus a été discuté et interprété. L'utilisation du modèle **axisymétrique** dans le cas d'une enceinte circulaire s'est avérée précise.

Enfin, l'absence de résultats réels obtenus in-situ dans un modèle à **trois dimensions** est fortement ressentie. Mais pour l'instant les résultats obtenus et les vérifications effectuées démontrent l'intérêt du modèle et les abaques que nous avons développés comme outil qui couvre un nombre important de configurations rencontrées dans la pratique. Ils permettront au praticien de tester rapidement plusieurs solutions pour calculer les débits d'exhaure et estimer les pertes de charge.