

CHAPITRE IV

SIMULATION NUMERIQUE TRIDIMENSIONNELLE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

IV.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 (P.VEZOLE, 1998).

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 (H.MROUEH, & I. SHAHROUR [1998]).

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 » (P. VEZOLE [1998]).

Ce dernier chapitre porte sur la modélisation numérique *tridimensionnelle* de l'écoulement autour des batardeaux de forme *carré*, *rectangulaire* et *circulaire*. L'objectif est d'illustrer ce problème en trois dimensions et la comparaison de toutes les relations théoriques et méthodes développées dans les chapitres précédents. Nous présenterons 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 travail exclusivement aux calculs hydrauliques du débit d'exhaure dans un premier lieu, et au phénomène de renard causant la perturbation de la stabilité du batardeau et du fond de fouille, dans un second temps. Dans ce sens, nous avons effectué plusieurs tests pour valider les résultats de calcul numérique.

La démarche adoptée dans notre 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 de notre modèle. Une fois le modèle 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 nous permet de calculer les différents paramètres hydrauliques tels que le débit d'exhaure, les pertes de charge en fonction du coté 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.

IV.2 Simulation numérique

IV.2.1 Procédure de simulation en Flac3D

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

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

La procédure de simulation adoptée dans notre travail se base sur les deux étapes suivantes :

1. Un calcul hydraulique pour déterminer le débit d'exhaure, les pressions interstitielles, les pertes de charge amont et aval.
2. Un calcul mécanique de la stabilité du fond de fouille « phénomène de renard » : les gradients hydrauliques et les coefficients de sécurité.

IV.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'est-à-dire dans les régions les plus sollicitées ;
- autour des frontières à charge hydraulique imposée ;
- au voisinage des singularités géométriques ou des changements de matériaux ;
- au voisinage des singularités hydrauliques (point d'intersection entre une équipotentielle et une frontière imperméable).

IV.3 Débit d'exhaure des batardeaux tridimensionnels sans fouille – Milieu fini – Alimentation verticale

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

On rappelle que l'objectif de ces simulations est de tester le modèle *tridimensionnel* sur des cas proches à des situations du chantier, par confrontation avec les méthodes de calcul en écoulement plan et l'approche tridimensionnelle en s'appuyant sur les résultats de simulations de FRANKE et DAVIDENKOFF [1965].

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 tridimensionnel devient négligeable au terme du débit.

IV.3.1.1 Présentation des cas étudiés

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

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

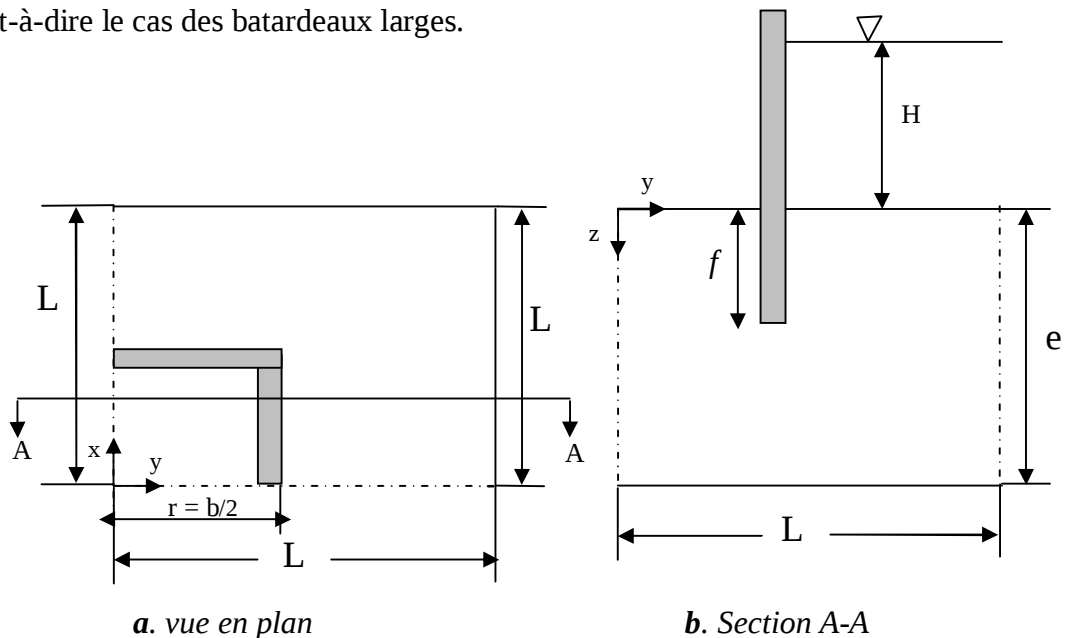


Figure IV.1 : Batardeau carré sans fouille.

IV.3.1.2 Maillage et conditions aux limites

Le problème est à trois dimensions mais, par symétrie, un *quart* du domaine peut être 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 notre travail, les limites à $|x| = L$ m et $|y| = L$ m sont vues comme plans de symétrie. La **Figure IV.1** montre un croquis des conditions du problème.

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

- Le module volumique, K 390 MPA
- Le module de cisaillement, G 280 MPA
- La densité sèche du sol, ρ_d 1200 kg/m³
- La densité de l'eau, ρ_w 1000 kg/m³
- Le module g du vecteur de gravité peut être rapproché à 10 m/s².
- La densité de l'écran, $\rho_{\text{écran}}$ 1500 kg/m³
- La perméabilité, k 10-10 m²/Pa - s
- La porosité, n 0.3
- Le module volumique du fluide, K_f 1.0 10³ PA

La **Figure IV.2** montre les dimensions du maillage adopté pour la simulation en Flac3D. Ce maillage est raffiné au voisinage de l'écran et la partie où on calcule le débit sortant. 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 IV.1** montre la variation des dimensions du modèle avec le rapport $2r/e$ et f/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

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

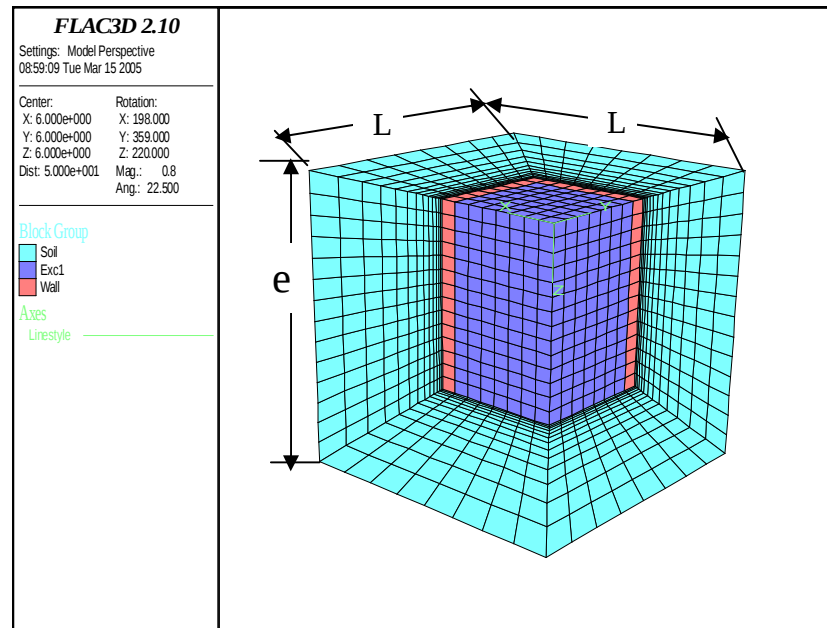


Figure IV.2 : Le maillage adopté en Flac3D - Batardeau carré sans fouille.

- 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 à l'amont à $P = \rho g H_1$, avec H_1 la charge appliquée en amont (**Figure IV.1**), et puis on fixe la pression à $P = 0$ (où $H_2 = 0$, avec H_2 la charge appliquée dans le coté aval, sur les limites où $x = y = r = b/2$, Figure IV.1) qui représente une surface équipotentielle.

IV.3.1.3 La procédure de modélisation

Le modèle Flac3D a des dimensions $X\ m \times Y\ m \times Z\ m$; le maillage a un nombre total de zones cubiques de $X \times Y \times Z$ de dimensions $x\ m \times y\ m \times z\ m$. Un modèle nul d'écoulement d'eau est attribué aux zones de l'écrans, 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 sur des cas proches à des situations de la pratique, par confrontation avec les méthodes de calcul analytiques en écoulement plan et l'approche tridimensionnelle en s'appuyant sur les résultats de simulations de DAVIDONKOFF et FRANKE 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 bidimensionnelle se fait dans des conditions semblables (domaine de variation de la largeur et de la fiche relative du batardeau), puis nous verrons à partir de quelle valeur de la largeur relative du batardeau que l'effet tridimensionnel devient négligeable au terme du débit.

Ø Calcul du débit d'exhaure

Etant donné que notre étude s'intéresse aux calculs des débits et pertes de charge dans les cas tridimensionnels, le calcul du débit doit donc être déterminé avec la plus grande précaution et précision possible. A cet effet, nous avons travaillé sous les conditions suivantes :

$$0.1 < 2r/e < 10 \quad \text{donc } 1\text{ m} < r < 40\text{ m} \quad \text{où } 2\text{ m} < b = 2r < 80\text{ m.}$$

$$0.125 < f/e < 0.875$$

qui comprend la gamme de KASTNER :

$$0.67 < 2r/e < 7$$

$$0.125 < f/e < 0.875$$

Les résultats obtenus par le code de calcul numérique au différences finies Flac3D sont présentés sur les **Figures IV.5, IV.6** (Abaques) qui donnent respectivement la variation du débit et les pertes de charge en fonction de la fiche et de la largeur relative du batardeau carré.

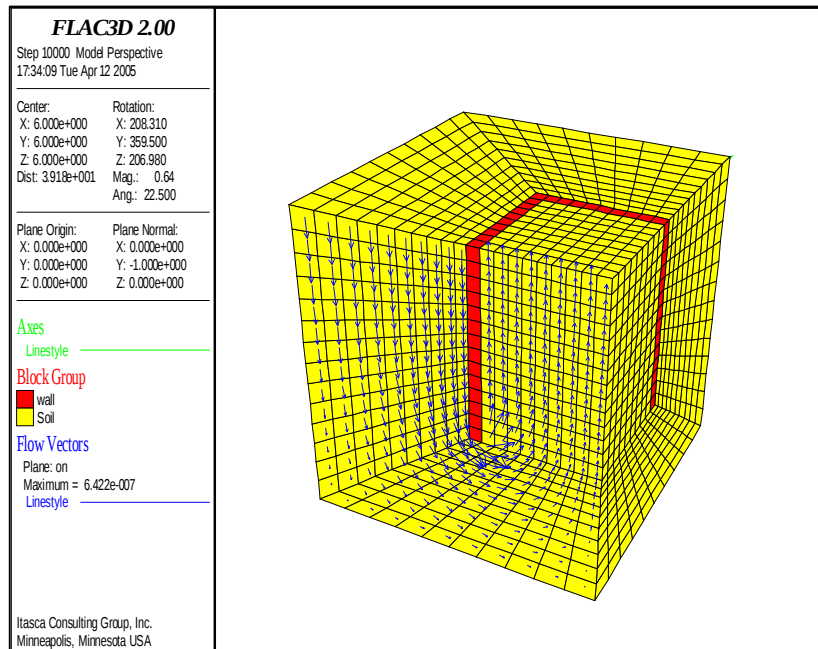


Figure IV.3 : Visualisation de face de l'écoulement pour un modèle Flac3D - Batardeau carré sans fouille– Après calcul.

Ø Visualisation du modèle adopté en Flac3D

Afin d'observer plus en détails l'état de l'écoulement permanent des eaux souterraines pour chaque modèle, nous présentons sur les figures suivantes quelques visualisations des vecteurs d'écoulement autour de l'écran étanche, le contour de distribution des pressions interstitielles et l'historique du débit entrant et débit sortant (convergence des calculs, c'est-à-dire lorsque $Q_e \approx Q_s$) pour une largeur relative $2r/e = 0.67$ et $f/e = 1/8$.

Ø La **Figure (a)** montre clairement la nature de l'écoulement dans le modèle numérique quand il atteint l'état permanent. Cet état de l'écoulement peut être observé pour tous les cas testés. La **Figure (b)** montre également la distribution des pressions interstitielles de l'écoulement à l'amont et à l'aval du milieu où les pressions dans le fond de la fouille représentées en couleur bleu sont nulles. La **Figure (c)** quant à elle présentant l'historique du débit entrant et débit sortant montre bien la convergence des calculs, c'est-à-dire dans ce cas $Q_e \approx Q_s$.

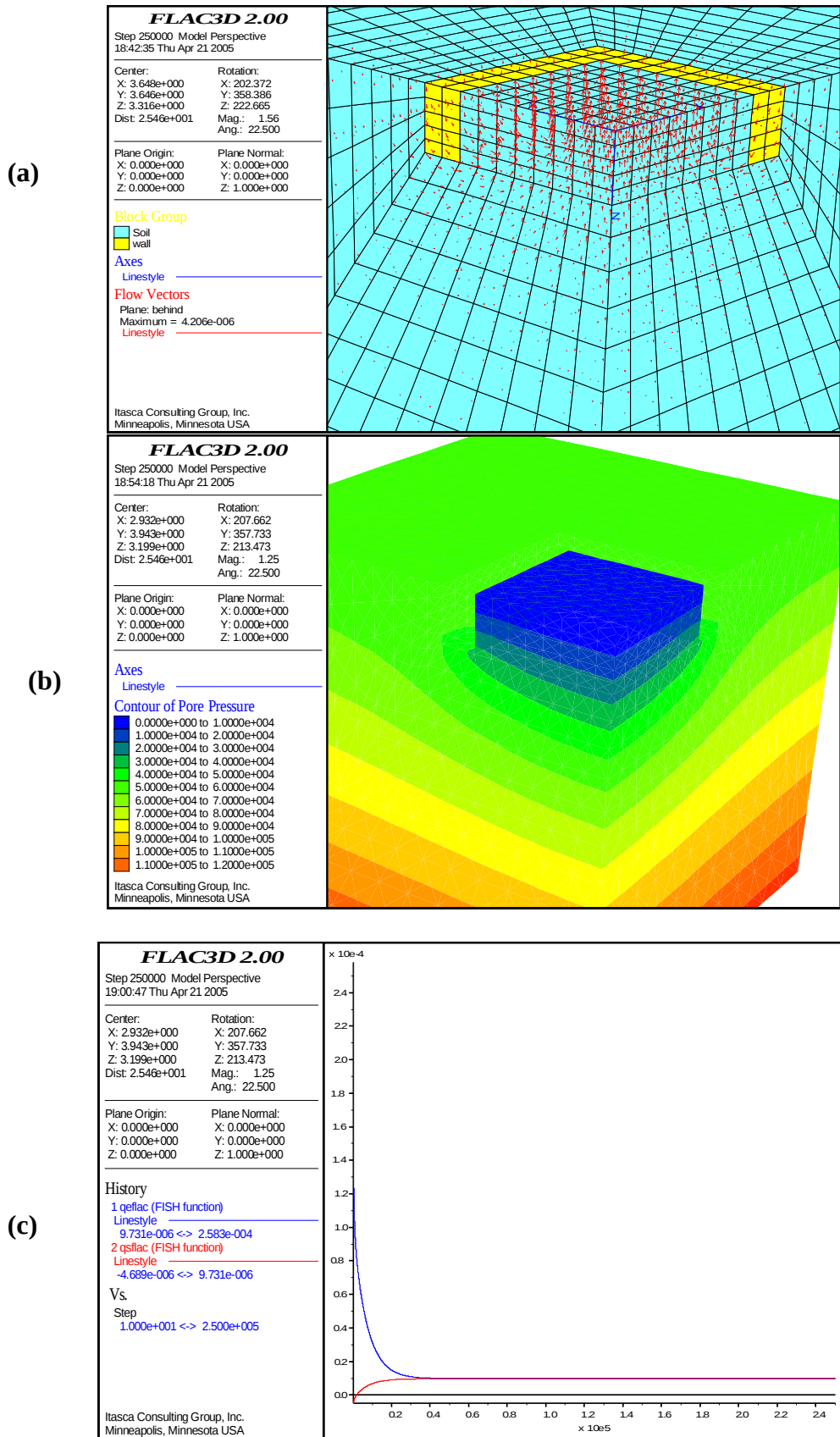
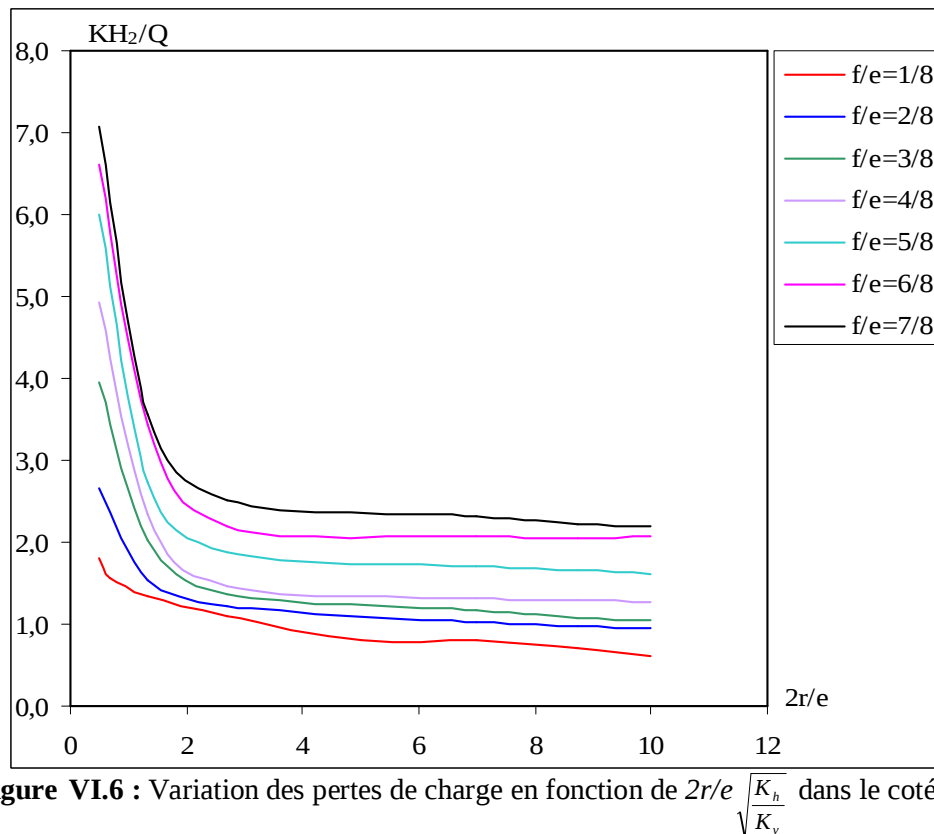
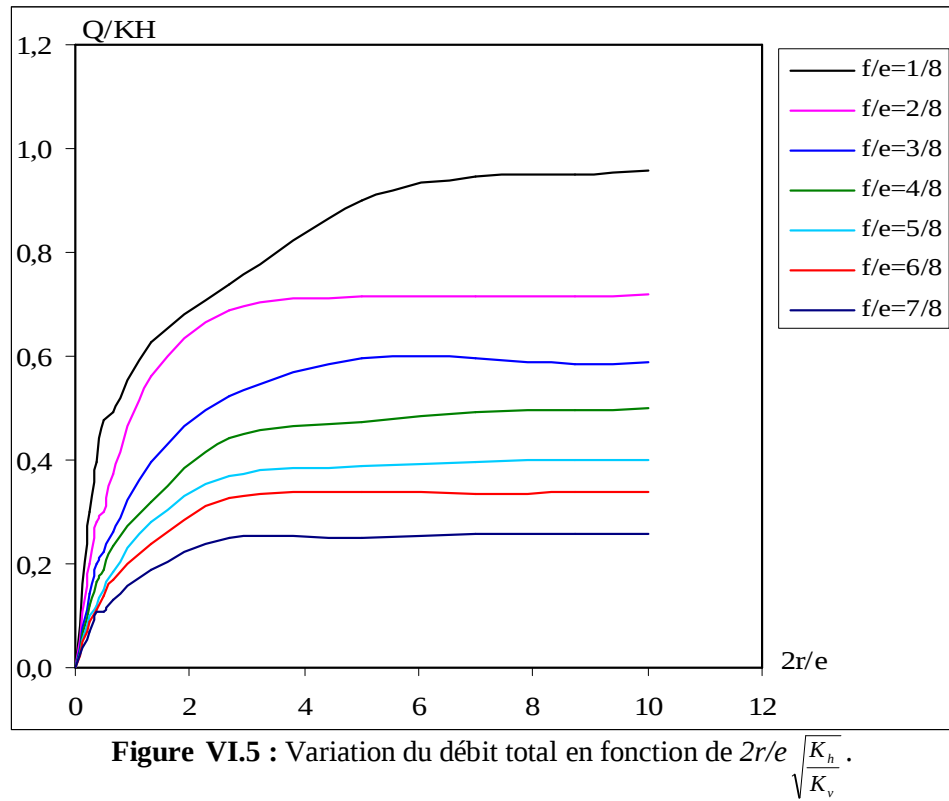


Figure IV.4 : Modèle Flac3D : $2r/e = 0.67$, $f/e = 1/8$, (a) Vecteurs de l'écoulement permanent (b) Contour de distribution des pressions interstitielles en état d'écoulement permanent, (c) Historique du débit entrant et débit sortant (convergence des calculs).



Analyse des résultats

Ø La Figure IV.5 montre clairement la penche de la courbe du débit pour les faibles valeurs de $2r/e$, ce qui permet de conclure que le débit se réduit dans le cas de petites largeurs du batardeau.

Ø La comparaison de nos 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 pour l'écoulement plan sont valables dès que $2r/e = 2.7$, c'est-à-dire à partir de cette valeur que l'effet tridimensionnel commence à disparaître mais toujours au terme du débit.

Ø La **Figure IV.6** 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.

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

Avant d'entamer la procédure de simulation numérique, il est nécessaire de rappeler l'objectif principal de cette partie de notre étude. Il s'agit donc de tester les modèles de calcul de débit que nous avons décrits précédemment mais dans le cas d'une enceinte rectangulaire, et préciser les conditions de validation des relations théoriques donnant le débit et pertes de charge en écoulement plan.

Pour ce faire, nous allons considérer dans ce cas un batardeau de forme **rectangulaire** dont les calculs sont en trois dimensions et en profitant de la symétrie du modèle, nous prenons juste un quart du domaine considéré puis on multiplie les résultats obtenus par **quatre** pour trouver le débit total. Après avoir procédé au meilleur choix du maillage, nous faisons varier la demi-longueur (R) où $L = 2R$, c'est-à-dire on varie la *troisième dimension* et la fiche relative du batardeau en fixant la demi-largeur (r) où la largeur $b = 2r$ jusqu'on arrive 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, nous procédons 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 IV.7** montre le modèle ainsi adopté en Flac3D.

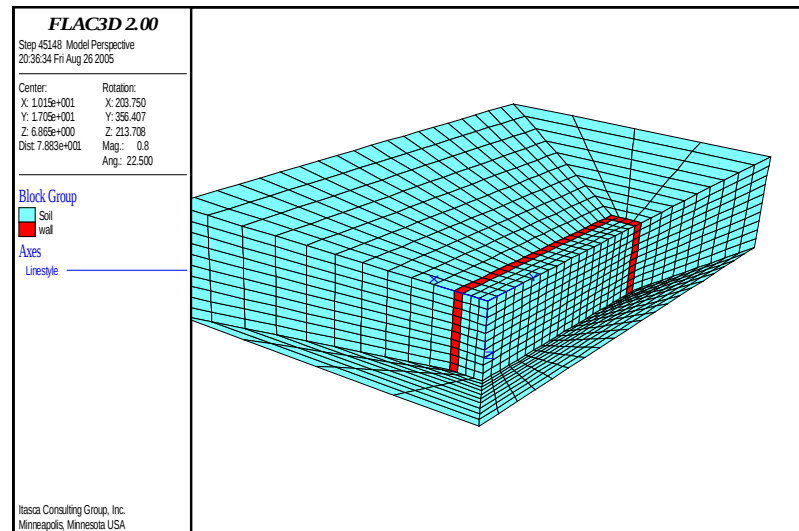


Figure IV.7 : Le maillage adopté en Flac3D
 - Batardeau rectangulaire sans fouille -

On note que, la largeur relative et la fiche du batardeau varient dans la large gamme :

$$0.1 < 2r/e < 10 \quad \text{donc} \quad 1\text{ m} < r < 40\text{ m} \quad \text{où} \quad 2\text{ m} < b = 2r < 80\text{ m}.$$

$$0.125 < f/e < 0.875$$

qui comprend la gamme de KASTNER :

$$0.67 < 2r/e < 7$$

$$0.125 < f/e < 0.875$$

Tandis que le rapport de la longueur et la largeur du batardeau est telle que :

$$1 < 2R/2r < 12$$

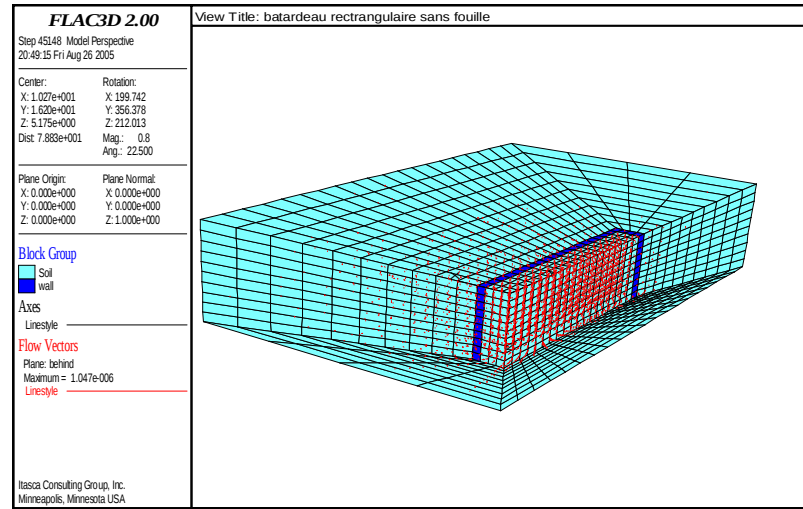
Les tests que nous avons effectués nous ont permis d'obtenir un nombre important de valeurs du débit et de pertes de charge et sur lesquels s'est reposée l'interprétation de nos résultats.

Les **Figures IV.9, IV.10, IV.11** englobent tous les résultats obtenus du calcul numérique.

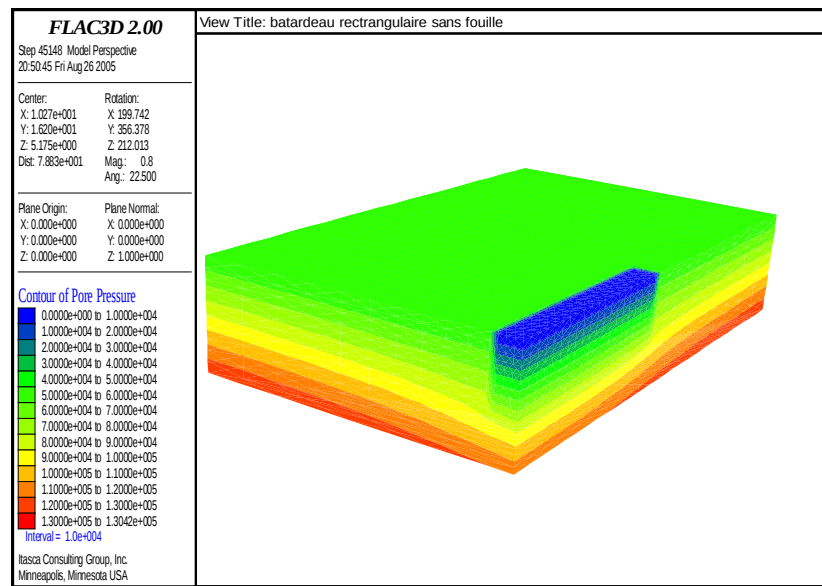
Ø Visualisation du modèle rectangulaire adopté en Flac3D

Nous présentons sur les figures suivantes quelques visualisations des vecteurs d'écoulement autour de l'écran étanche, le contour de distribution des pressions interstitielles et l'historique du débit entrant et débit sortant (convergence des calculs, c'est-à-dire lorsque $Q_e \approx Q_s$) pour une largeur relative $2r/e = 0.67$ et $f/e = 1/8$.

(a)



(b)



(c)

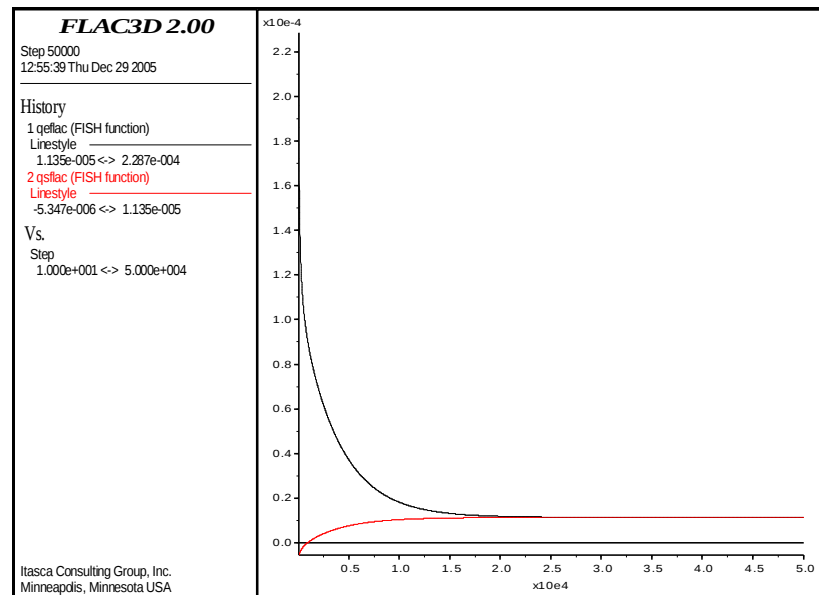


Figure IV.8 : Modèle Flac3D : $2R/e = 2.7$, $r=2m$ et $f/e = 4/8$, (a) Vecteurs d'écoulement
(b) Contour de distribution des pressions interstitielles en état d'écoulement permanent,
(c) Historique du débit entrant et débit sortant (convergence des calculs).

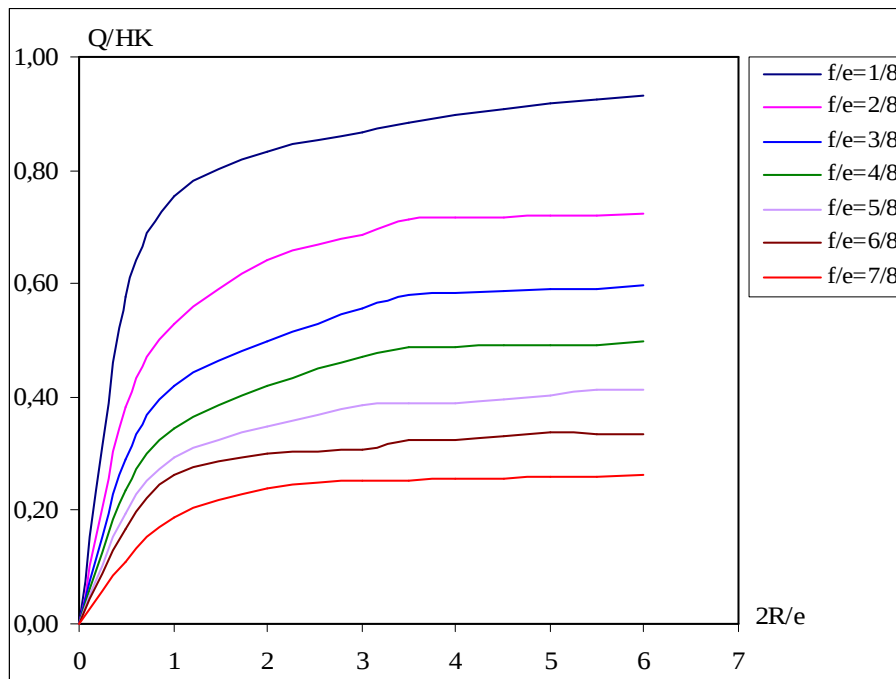


Figure IV.9 : Variation du débit total en fonction de $2R/e \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$.

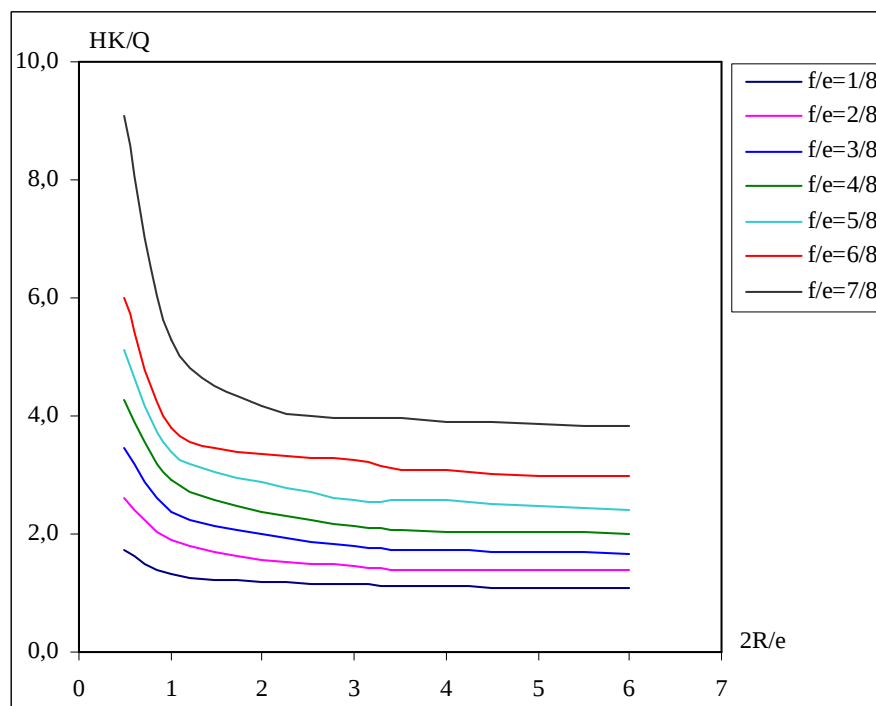


Figure IV.10 : Variation des pertes de charge totales en fonction de $2R/e \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$.

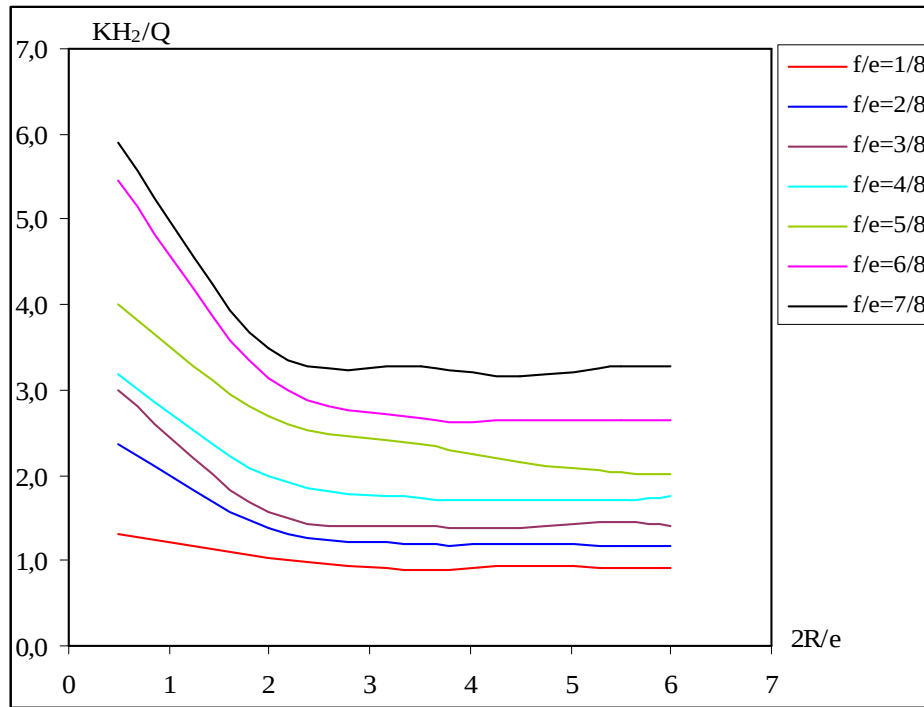


Figure IV.11 : Variation des pertes de charge en fonction de $2R/e \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté aval.

- 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 $2R/e = 2.5$ où $2R/2r = 5$ donc $R = 5r$ 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%. Il est donc possible de dire que lorsque l'effet de la troisième dimension est négligé, le calcul du débit étudié pourra être fait par un modèle *bidimensionnel*.
- Pour les valeurs de la largeur du batardeau $2R/e > 2.5$ le débit presque n'augmente plus ce qui représentent les batardeaux 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.
- Par contre, pour le cas des batardeaux étroits où $2R/e < 1$ 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 IV.11 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.

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

Dans cette partie de notre 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 M [1999]).

Ce cas a été traité par une méthode expérimentale appelée analogie électrique par R. KASTNER [1982] (de plus amples explications sur le détail de ce modèle sont données aux chapitre II dans le cas d'un sol homogène anisotrope).

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].

IV.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 en m. Cet écran a une épaisseur qui varie de 0.5 à 1.6 m (écran étanche en paroi moulée en béton armé), et 0.05 m pour le cas d'une palplanche, est soumis à une charge hydraulique H comme indiqué sur la **Figure IV.12**.

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

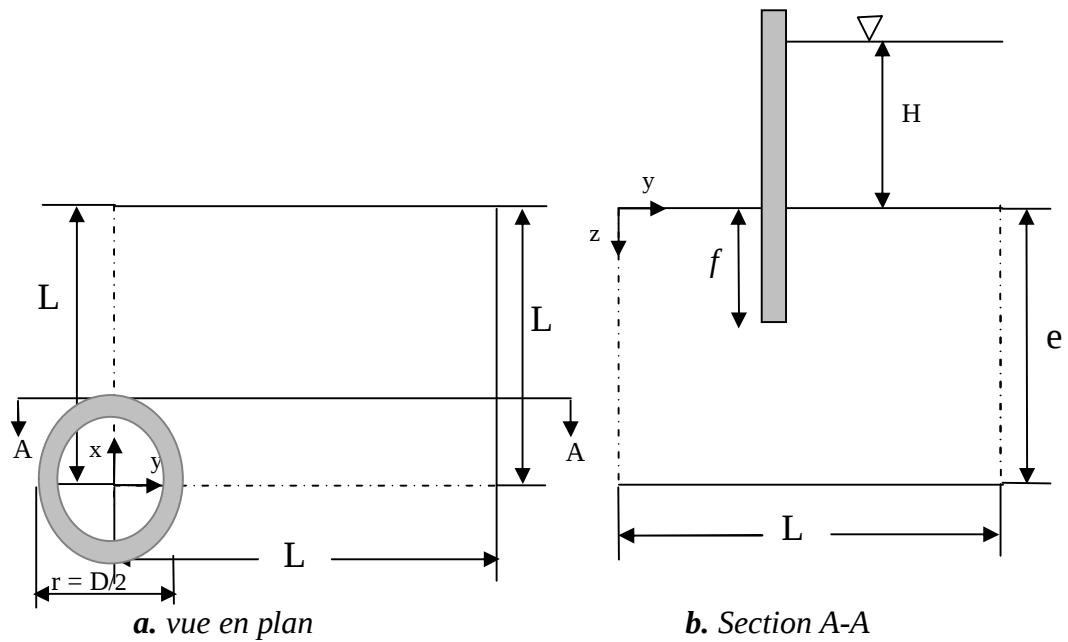


Figure IV.12 : Batardeau circulaire sans fouille.

Avec :

e : l'épaisseur de la couche perméable ;

L : l'étendu du milieu ;

r : rayon du batardeau circulaire ;

f : la fiche de l'écran étanche ;

H : la perte de charge totale.

IV.3.3.2 Maillage et conditions aux limites

Le problème est **axisymétrique** et seulement une moitié du domaine peut être considérée dans l'analyse. Le système des axes (roz) de coordonnées est défini avec l'origine au centre du côté aval dans le plan de la surface de sol. La Figure IV.12 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 1e4 MPA
- La densité sèche du sol, ρ_d 1700 kg/m³
- Le module de cisaillement, G 1e8 MPA
- La cohésion coh 1e 8
- La tension 1e10
- Le module g du vecteur de gravité peut être rapproché à 10 m/s².
- La densité de l'eau, ρ_w 1000 kg/m³
- La densité de l'écran, ρ_{wallr} 1500 kg/m³
- La perméabilité, k 10-10 m²/Pa - s
- La porosité, n 0.3
- Le module volumique du fluide, K_f 1.0 10³ PA

La **Figure IV.13** montre 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 on calcule le débit sortant. Le maillage se fait d'une manière automatique. Afin de voir l'influence du coté du batardeau (augmentation ou décroissance), on fait varier l'étendu du sol avec le rapport r/f .

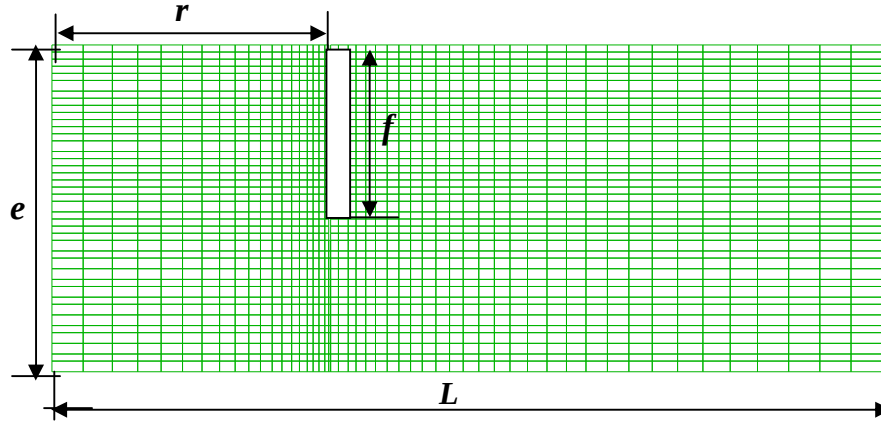


Figure VI.13 : Détail du maillage axisymétrique adopté en Flac2D.
Batardeau circulaire sans fouille.

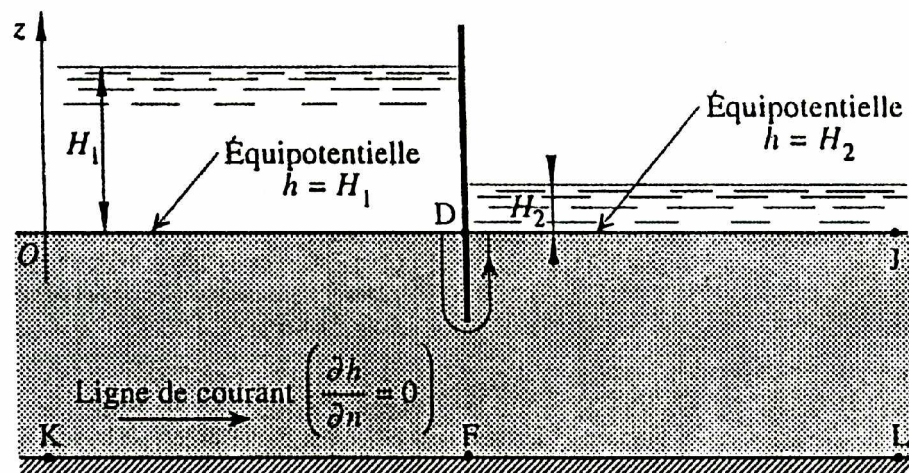


Figure VI.14 : Conditions aux limites hydrauliques.

On note que, pour des raisons numériques et afin d'accélérer la convergence du modèle, le module volumique de l'eau (K_f) est aussi pris égal à $1.0 \cdot 10^3 \text{ PA}$. 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 dans le coté aval est nulle ($H_2 = 0$) d'où la pression est nulle ($P = 0$).

L'objectif de ces simulations est de tester le modèle **axisymétrique** sur des cas proches à des situations de la pratique, par confrontation avec les méthodes de calcul analytiques en plans et l'approche **3D** en s'appuyant sur les simulations d'analogie électrique de KASTNER.

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 *tridimensionnel* devient négligeable au terme du *débit*.

IV.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, MANDEL, DAVIDONKOFF et FRANKE, nous avons exploré avec notre modèle le domaine suivant :

$$0.1 < 2r/e < 10 \quad \text{donc } 1\text{m} < r < 40\text{ m où } 2 < D=2r < 80\text{ m.}$$

$$0.125 < f/e < 0.875$$

qui comprend la gamme de KASTNER :

$$0.5 < 2r/e < 8.75$$

$$0.125 < f/e < 0.875$$

Les résultats obtenus par le code de calcul numérique Flac2D sont présentés sur les **Figures IV.16, IV.17, IV.18, IV.19, IV.20** sous formes d'abaques donnant respectivement la variation du débit et des pertes de charge en fonction de la fiche et de la largeur relative du batardeau.

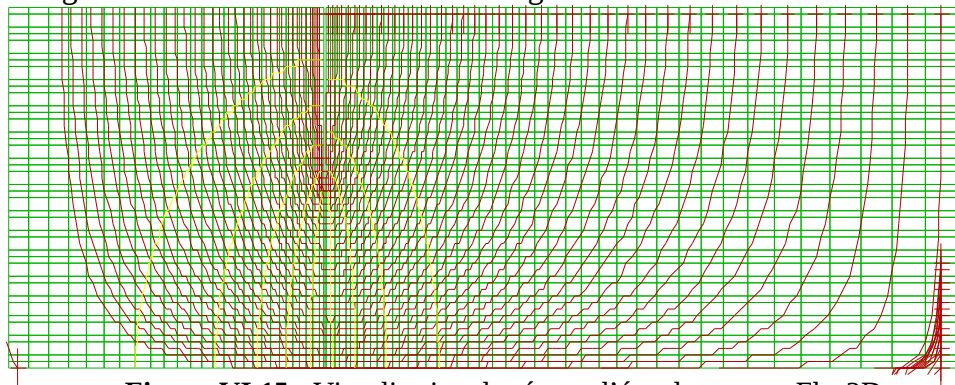


Figure VI.15 : Visualisation du réseau d'écoulement en Flac2D.

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 et quasi identiques pour les grandes fouilles comparés aux relations analytiques.

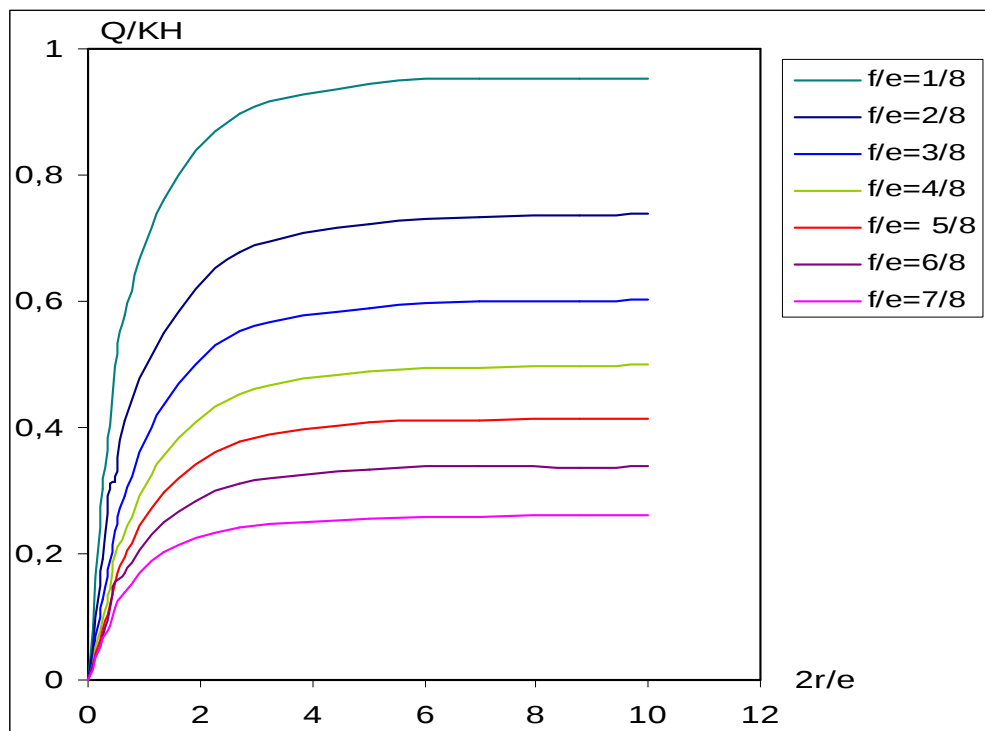


Figure VI.16 : Variation du débit total en fonction de $2r/e$.

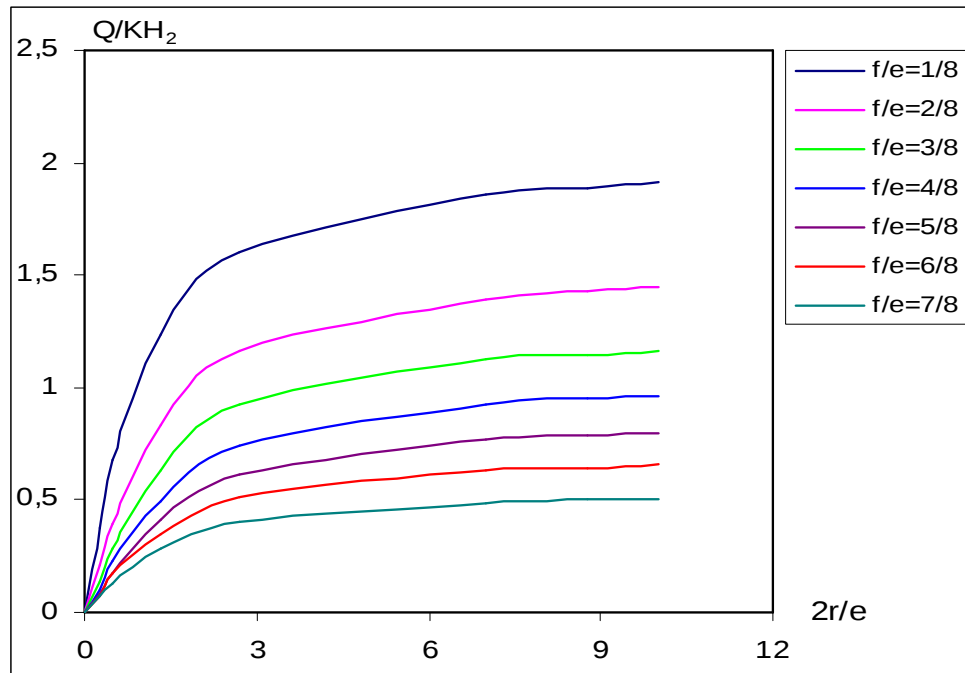


Figure VI.17 : Variation du débit en fonction de $2r/e$ dans le coté aval.

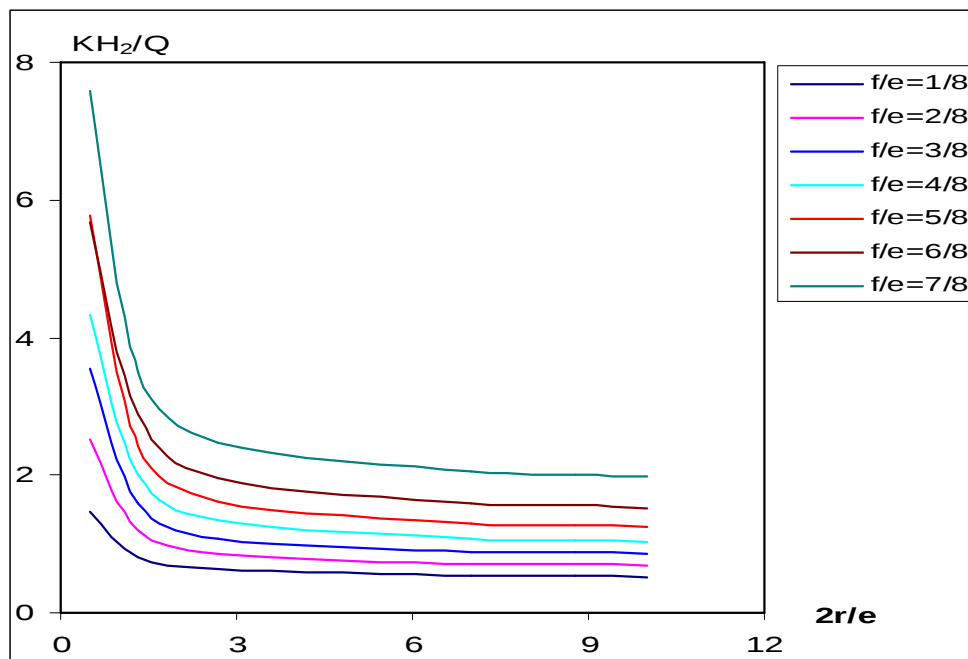


Figure VI.18 : Variation de la perte de charge en fonction de $2r/e$ dans le coté aval.

- Ø Pour le coté aval (**Figure IV.18**), on peut noter que 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 et devient constant pour des valeurs de la largeur relative supérieures à 2.7.
- Ø Pour les faibles valeurs du diamètre relative, 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.

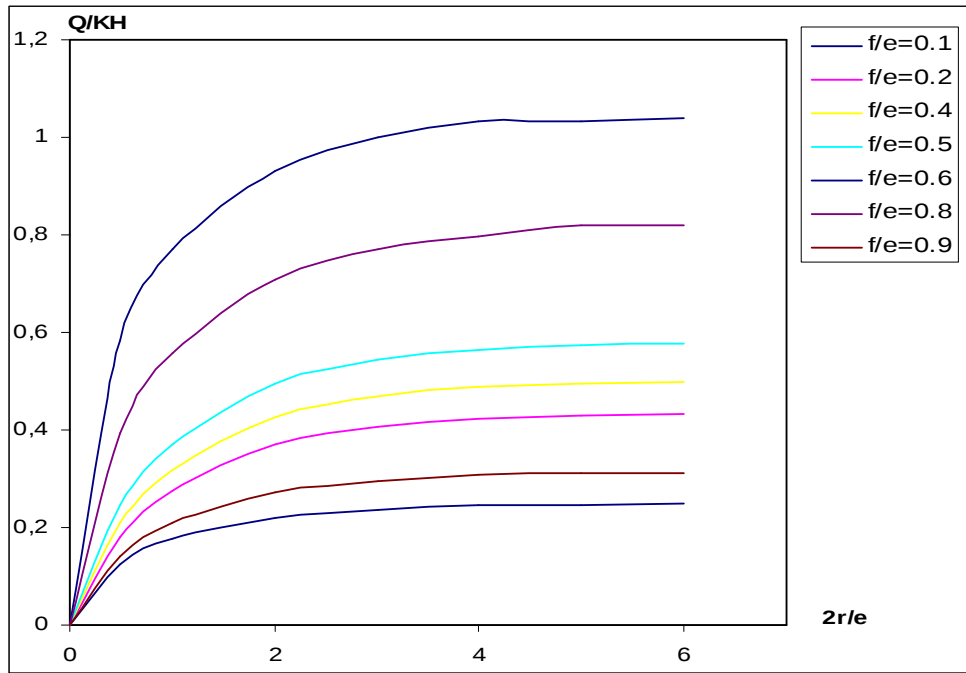


Figure IV.19 : Variation du débit total en fonction de $2r/e$.

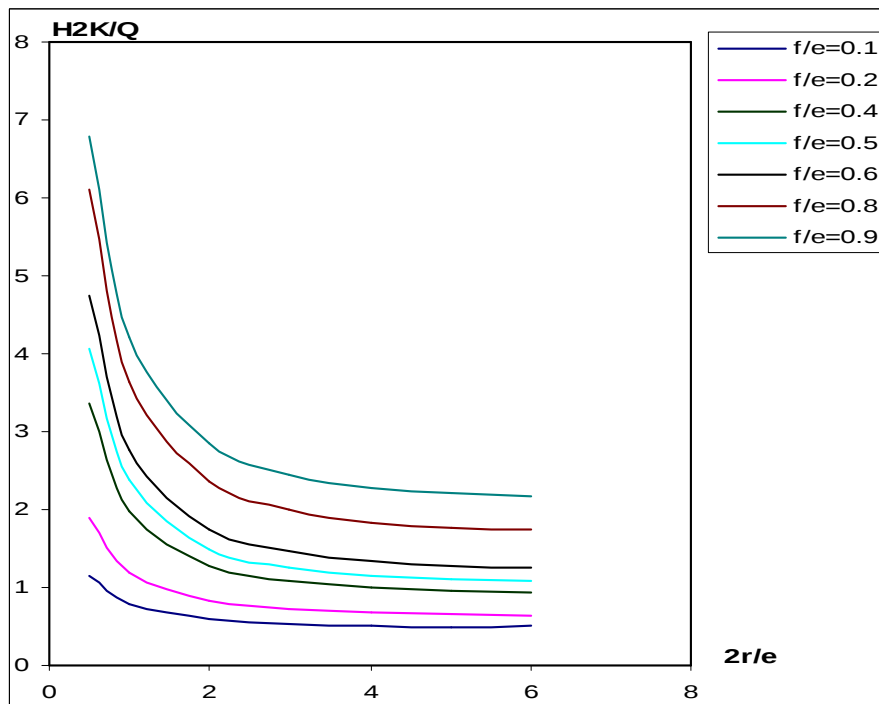


Figure IV.20 : Variation des pertes de charge en fonction de $2r/e$ dans le coté aval.

Ø Les différents résultats obtenus ci-dessus, nous montrent que le débit total augmente avec l'augmentation du diamètre et la diminution de la fiche relative du batardeau. Néanmoins, le débit n'augmente plus avec la largeur du batardeau dès que le rapport $2r/e$ est supérieur à 2.7 quelle que soit la valeur de $\frac{f}{e}$. Ce domaine caractérise les batardeaux circulaires larges.

Ø Donc, 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 IV.21**).

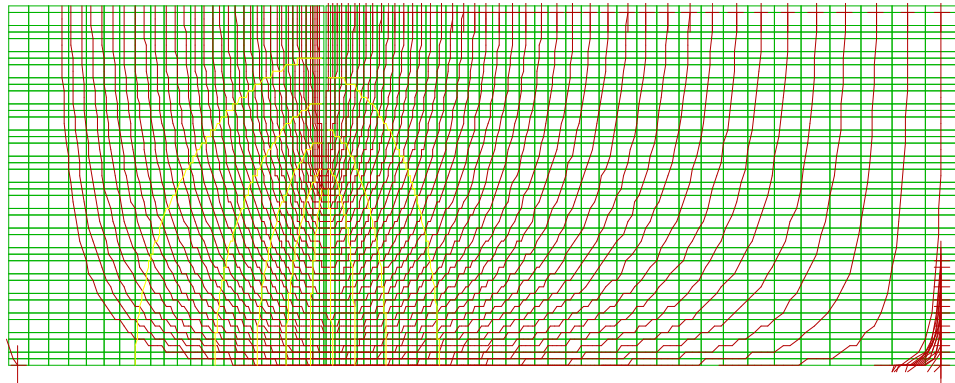


Figure IV.21 : Réseau d'écoulement pour les batardeaux larges.

Ø 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)
- $2r/e < 0.5$ pour $f/e = 0.25$ (fiche faible)

Dans ce cas, les pertes de charges 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.

IV.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, nous avons fait les calculs pour deux cas de batardeaux : l'un est en *palplanche* d'épaisseur de l'écran étanche $e' = 0.05$ m et l'autre en *paroi moulée* (béton armé) avec épaisseur $e' = 0.5$ m dans le même domaine.

Les résultats de calculs sont regroupés dans les figures **IV.22** et **IV.23** donnant respectivement la variation du débit total et les pertes de charge en fonction de la largeur et de la fiche relative du batardeau.

On note en effet, que pour les largeurs $2r/e < 1$ on marque une petite différence entre les deux résultats, et dès que $2r/e > 2$, l'écart augmente avec l'augmentation de la largeur et le débit pour un écran d'épaisseur 0.05 m est nettement supérieur à celui d'épaisseur 0.5 m et cela est bien clair sur la (**Figure IV.22**), car on voit bien que les courbes des débits avec une épaisseur de l'écran étanche $= 0.05$ m (les courbes sans points) sont au-dessus des courbes avec une épaisseur de 0.5 m (les courbes avec points). Cette différence est expliquée par la perte de charge supplémentaire provoquée par l'augmentation de l'épaisseur de l'écran étanche illustrée dans la **Figure IV.23**, qui augmente avec l'augmentation de la fiche relative du batardeau (fortes fiches).

Par conséquent, on ne doit pas négliger l'influence de l'épaisseur de l'écran étanche dans les calculs de l'écoulement contournant les écrans étanches.

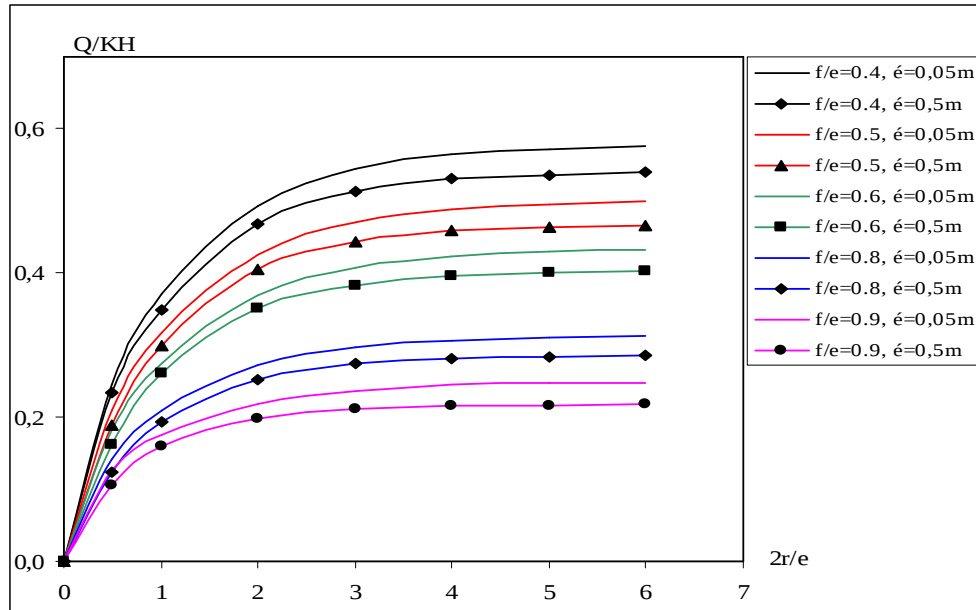


Figure VI.22 : Comparaison du débit de l'épaisseur de l'écran $e' = 0.05$ m et $e' = 0.5$ m.

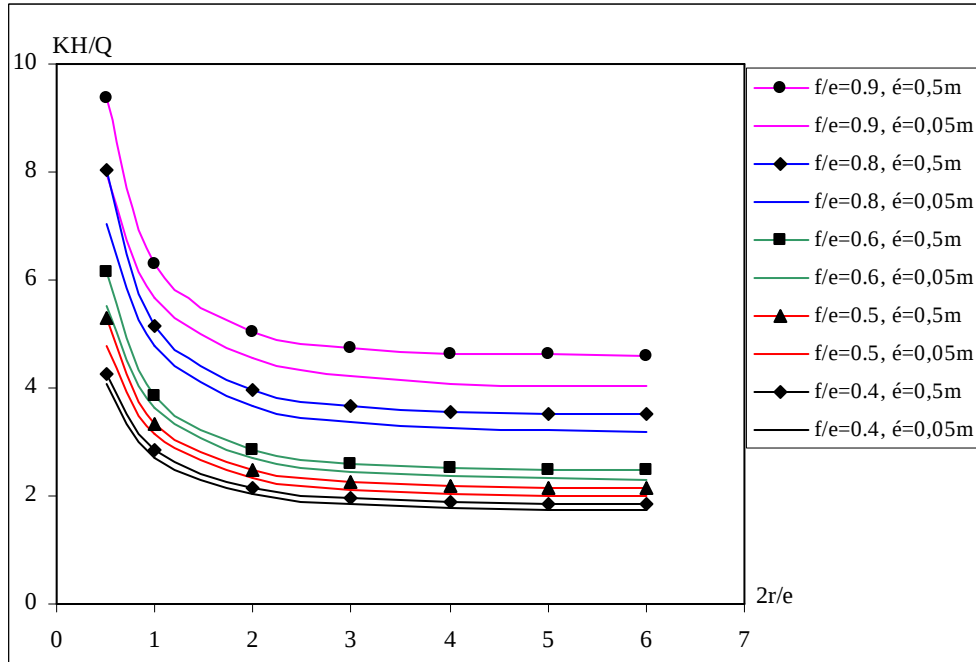


Figure VI.23: Comparaison des pertes de charge pour l'épaisseur de l'écran $e' = 0.05$ m et $e' = 0.5$ m.

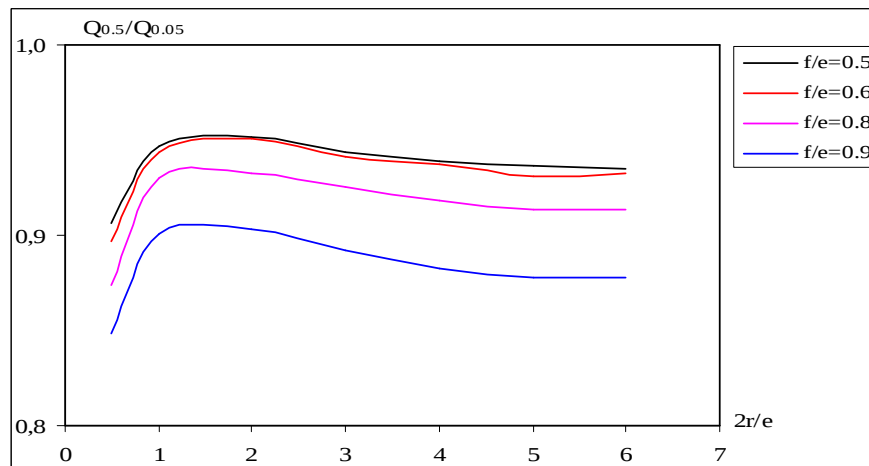


Figure VI.24 : Variation du rapport des débits $Q_{0.5}/Q_{0.05}$ m.

- La **Figure IV.24** qui présente la variation du rapport des débits d'exhaure en fonction de la largeur et de la fiche relative du batardeau pour une épaisseur de l'écran étanche = 0.5 m sur $Q_{e=0.05}$ m, montre bien que ce rapport augmente avec l'augmentation de la largeur pour $2r/e < 2.5$ ce qui représentent les fouilles étroites, et sa valeur diminue à partir de $2r/e = 2.7$ qui représentent les fouilles larges.
- Pour les fortes fiches du batardeau, le rapport des deux débits décroît ce qui montre que plus que la fiche augmente plus que l'influence de l'épaisseur de l'écran devient importante.

IV.4 Confrontation aux résultats existants

IV.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 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 résumé dans le tableau ci-après (KASTNER [1982]).

$2 r/e$	0.67	1.34	2.7	7
$Q_{\text{fouille carrée}}$	0.93	0.91	0.87	0.77
$Q_{\text{fouille ronde}}$				

Tableau IV.2 : Variation du rapport des débits en fonction de la largeur relative du batardeau. D'après KASTNER, [1982].

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 **1** lorsque $2 r/e$ devient très grand (KASTNER, [1982]).

Les hypothèses ci-dessus mentionnées 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.

f/e	$2r/e$	Le débit unitaire - Fouille carrée - d'après Flac3D Q_{3D}	Le débit unitaire plan d'après KASTNER $Q_{kastner}$	Le débit unitaire d'après DAVIDONKOFF et FRANKE $Q = Q_{plan} * 0.75$	Erreur *100 %	Le débit unitaire - Fouille circulaire - d'après 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
1/8	10	0,95	0,959	0,7192	0.25	0,952	0,99
2/8	0.67	0,373	0,51	0,3825	0,02	0,411	0.90
2/8	1.34	0,55	0,72	0,54	0,03	0,56	0.98
2/8	5	0,715	0,73	0,547	0,234	0,723	0,989
2/8	8.75	0,714	0,73	0,5475	0,23	0,735	0,971
2/8	10	0,720	0,73	0,5475	0,24	0,738	0,98
3/8	1.34	0,397	0,53	0,3975	0,00028	0,436	0,91
3/8	2.7	0,523	0,57	0,4275	0,18	0,551	0.95
3/8	5	0,59	0,6	0,45	0,24	0,595	0,99
3/8	8.75	0,586	0,6	0,45	0,23	0,60	0,976
3/8	10	0,588	0,6	0,45	0,24	0,60	0,976
4/8	0.5	0,190	0,26	0,195	0,002	0,196	0,96
4/8	0.67	0,23	0,33	0,2475	0,05	0,235	0,97
4/8	1.34	0,321	0,44	0,33	0,02	0,356	0,90
4/8	2.7	0,443	0,49	0,3675	0,17	0,453	0,97
4/8	5	0,475	0,50	0,375	0,21	0,487	0,97
4/8	7	0,493	0,50	0,375	0,24	0,494	0,99
4/8	8.75	0,494	0,50	0,375	0,24	0,497	0,99
4/8	10	0,49	0,50	0,375	0,25	0,499	0,98
5/8	0.37	0,120	0,17	0,1275	0,05	0,120	0,99
5/8	0.67	0,183	0,26	0,195	0,06	0,193	0,95
5/8	1.34	0,280	0,36	0,27	0,03	0,298	0,94
5/8	2.7	0,370	0,41	0,3075	0,17	0,379	0,97
5/8	5	0,390	0,41	0,3075	0,21	0,407	0,96
5/8	10	0,400	0,41	0,3075	0,23	0,412	0,97
6/8	0.37	0,113	0,16	0,12	0,06	0,114	0,99
6/8	0.67	0,168	0,23	0,1725	0,02	0,170	0,98
6/8	1.34	0,239	0,31	0,2325	0,02	0,25	0,95
6/8	2.7	0,31	0,33	0,2475	0,24	0,32	0,96
6/8	5	0,33	0,34	0,255	0,24	0,338	0,976
6/8	8.75	0,331	0,34	0,255	0,24	0,337	0,98
6/8	10	0,338	0,34	0,255	0,25	0,34	0,99
7/8	0.25	0,068	0,10	0,075	0,06	0,07	0,97
7/8	0.67	0,131	0,18	0,135	0,03	0,138	0,94
7/8	1.34	0,187	0,24	0,18	0,03	0,201	0,92
7/8	5	0,250	0,26	0,195	0,22	0,256	0,97
7/8	8.75	0,257	0,26	0,195	0,24	0,260	0,98
7/8	10	0,258	0,26	0,195	0,25	0,26	0,99

Tableau IV.3 : Comparaison avec l'écoulement tridimensionnel : DAVIDONKOFF et FRANKE.

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.

Confrontations aux résultats en écoulement plan

Ø KASTNER (1982) a proposé un abaque pour les écrans fichés dans un *milieu fini* (**Figure IV.25**). La comparaison avec nos résultats vis-à-vis du débit, montre que tous ces calculs se sont révélés très précis, l'erreur 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 une erreur inférieure à 01%.

Ø Pour un écran unique fiché dans une couche d'épaisseur limitée, MANDEL (1939) propose deux relations dont l'erreur avec nos résultats ne dépasse pas 04.7 %.

$$\begin{aligned} \frac{f}{e} < 0.5 & \quad \frac{Q}{H\sqrt{K_vKh}} = \frac{1}{\pi} \ln 2 \cot g \frac{\pi}{4} \frac{f}{e} \\ \frac{f}{e} > 0.5 & \quad \frac{Q}{H\sqrt{K_vKh}} = \frac{\pi}{4} \frac{1}{\ln 2 \cot g(\frac{\pi}{4}(1 - \frac{f}{e}))} \end{aligned} \quad \text{II.3}$$

f/e	$2r/e$	Le débit - Fouille carrée - d'après Flac3D	Le débit d'après KASTNER	Erreur *100 %	Le débit d'après MANDEL	Erreur *100 %
1/8	7	0,946	0,959	0,013	0,959	0,013
1/8	8.75	0,948	0,959	0,010	0,959	0,010
1/8	10	0,957	0,959	0,001	0,959	0,001
2/8	2.7	0,70	0,73	0,041	0,735	0,047
2/8	5	0,715	0,73	0,020	0,735	0,027
2/8	7	0,714	0,73	0,021	0,735	0,028
2/8	8.75	0,714	0,73	0,021	0,735	0,028
2/8	10	0,720	0,73	0,013	0,735	0,020
3/8	5	0,595	0,6	0,01	0,600	0,009
3/8	7	0,596	0,6	0,01	0,600	0,007
3/8	8.75	0,586	0,6	0,02	0,600	0,025
3/8	10	0,588	0,6	0,02	0,600	0,022
4/8	7	0,493	0,50	0,01	0,501	0,017
4/8	8.75	0,494	0,50	0,01	0,501	0,014
4/8	10	0,500	0,50	0,00	0,501	0,003
5/8	8.75	0,400	0,41	0,024	0,416	0,038
5/8	10	0,400	0,41	0,024	0,416	0,03
6/8	2.7	0,327	0,33	0,01	0,340	0,03
6/8	5	0,338	0,34	0,01	0,340	0,007
6/8	7	0,336	0,34	0,01	0,340	0,012
6/8	8.75	0,337	0,34	0,01	0,340	0,008
6/8	10	0,338	0,34	0,01	0,340	0,007
7/8	2.7	0,251	0,26	0,03	0,260	0,03
7/8	5	0,250	0,26	0,04	0,260	0,04
7/8	7	0,257	0,26	0,01	0,260	0,013
7/8	8.75	0,257	0,26	0,01	0,260	0,013
7/8	10	0,258	0,26	0,01	0,260	0,012

Tableau IV.4 : Comparaison avec l'écoulement plan : KASTNER et MANDEL.

IV.4.2 Batardeau rectangulaire sans fouille en milieu fini

1- En l'absence de solutions exactes ou de résultats expérimentaux, nous avons obtenu à notre connaissance la solution de référence avec un modèle **tridimensionnel** conçu à l'aide du code Flac3D. Les tests de calculs ont été vérifiés pour un grand nombre de cas et avec un maillage raffiné dans les zones les plus importantes où on calcule les différents paramètres hydrauliques.

C'est pourquoi nous allons proposer 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

- Ø Par comparaison avec l'abaque de KASTNER (1982) **Figure IV.25** et à partir des résultats reportés dans le **Tableau IV.5** on peut déduire que la précision est excellente pour les fortes largeurs relatives du batardeau (l'erreur est inférieure à 4,3 % lorsque $3 < 2R/e < 6$).
- Ø La comparaison avec MANDEL (1939, relation II.3) nous montre que celle-ci donne le débit avec une erreur inférieure à 4,4 %.

f/e	$2R/e$	$2R/2r$	Le débit - Fouille rectangulaire - d'après Flac3D	Le débit plan d'après KASTNER	Erreur *100 %	Le débit Plan d'après MANDEL	Erreur *100 %
1/8	5	10	0,917	0,959	0,043	0,95905845	0,043
1/8	5.5	11	0,923	0,959	0,037	0,95905845	0,037
1/8	6	12	0,931	0,959	0,029	0,95905845	0,029
2/8	3.5	7	0,713	0,72	0,01	0,735209697	0,03
2/8	5	10	0,720	0,73	0,01	0,735209697	0,02
2/8	6	12	0,723	0,73	0,009	0,735209697	0,01
3/8	3.5	7	0,580	0,60	0,03	0,600816485	0,035
3/8	5	10	0,591	0,60	0,02	0,600816485	0,016
3/8	6	12	0,597	0,60	0,01	0,600816485	0,006
4/8	3.5	7	0,488	0,50	0,03	0,501619098	0,028
4/8	5	10	0,491	0,50	0,02	0,501619098	0,021
4/8	6	12	0,498	0,50	0,003	0,501619098	0,006
5/8	5	10	0,400	0,41	0,024	0,416100433	0,038
5/8	6	12	0,409	0,41	0,002	0,416100433	0,016
6/8	3.5	7	0,325	0,33	0,02	0,340039041	0,044
6/8	5	10	0,336	0,34	0,01	0,340039041	0,01
6/8	6	12	0,335	0,34	0,01	0,340039041	0,01
7/8	3.5	7	0,253	0,26	0,029	0,260672328	0,035
7/8	5	10	0,258	0,26	0,007	0,260672328	0,018
7/8	6	12	0,262	0,26	0,006	0,260672328	0,003

Tableau IV.5 : Comparaison avec l'écoulement plan KASTNER et MANDEL.

Comme l'indique le **Tableau IV.5**, nous nous sommes plus particulièrement intéressés dans cette comparaison aux grandes et fortes valeurs du paramètre $2R/e$. En effet, les faibles valeurs de $2R/e$

entraîne de grandes valeurs des 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 $2R/e = 2.5$ où $2R/2r = 5$ donc $R = 5r$ avec une erreur qui ne dépasse pas 05%.

Le facteur de réduction du débit

f/e	$2R/e$	$2R/2r$	Le débit unitaire - Fouille rectangulaire - d'après Flac3D	Le débit unitaire plan d'après KASTNER Q_{plan}	Le facteur réducteur de débit $Q_{\text{Flac3D}} / Q_{\text{Plan}}$
2/8	0.5	1	0,383	0,44	0,8705
2/8	1	2	0,528	0,6	0,8800
2/8	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
4/8	0.5	1	0,234	0,27	0,8667
4/8	1	2	0,345	0,40	0,8617
4/8	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
6/8	0.5	1	0,167	0,20	0,8350
6/8	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

Tableau IV.6 : Variation du facteur de réduction de débit en fonction de la largeur et de la fiche relative du batardeau.

Enfin, ces tests mettent en évidence l'intérêt du modèle **tridimensionnel** dans le calcul de débit et les pertes de charge puisqu'il permet d'obtenir des résultats proches à la réalité.

IV.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 fichés dans un milieu fini **Figure IV.25**, l'erreur comparée à nos résultats est comprise entre 0.1 et 4% (voir **Tableau VI.7**).

Le résultat en terme de débit du calcul axisymétrique est comparable au résultat du calcul 3D en analogie électrique réalisé par KASTNER.

La **Figure IV.27** présente l'évolution du débit d'exhaure en fonction de la fiche relative du batardeau donnée par KASTNER et le code numérique Flac2D, elle montre une bonne concordance entre les deux approches, l'écart ne dépassant pas 04.1 % montrant ainsi l'aptitude du modèle axisymétrique à décrire correctement le comportement d'un modèle *tridimensionnel* à symétrie de révolution.

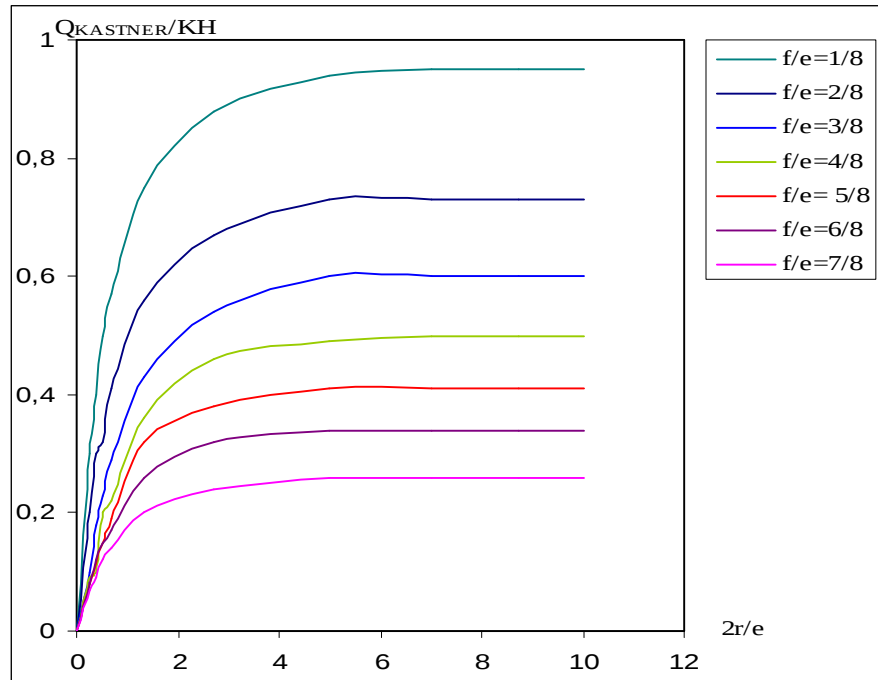


Figure IV.25 : Variation du débit total en fonction de $2r/e \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ d'après KASTNER.

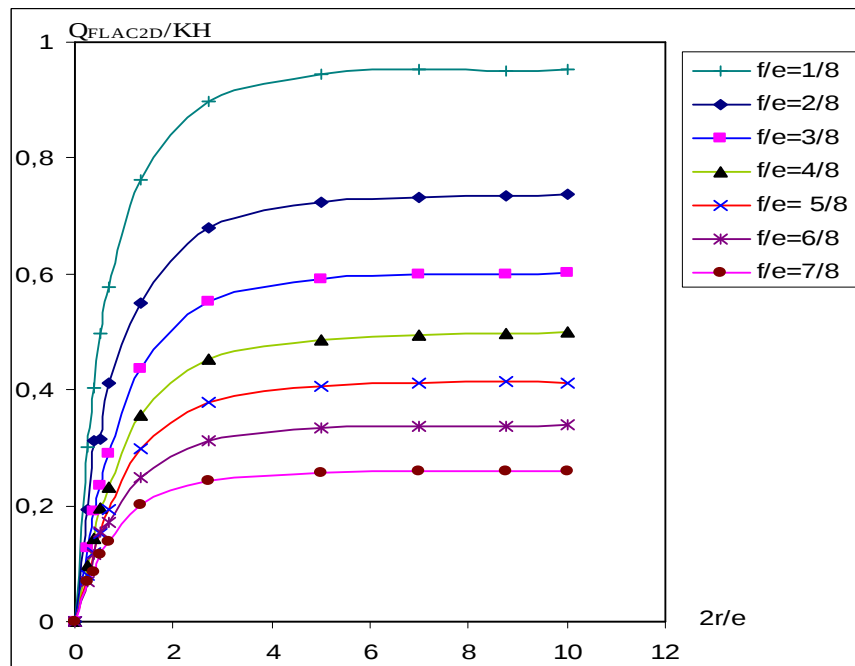


Figure IV.26 : Variation du débit total en fonction de $2r/e \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ d'après Flac2D.

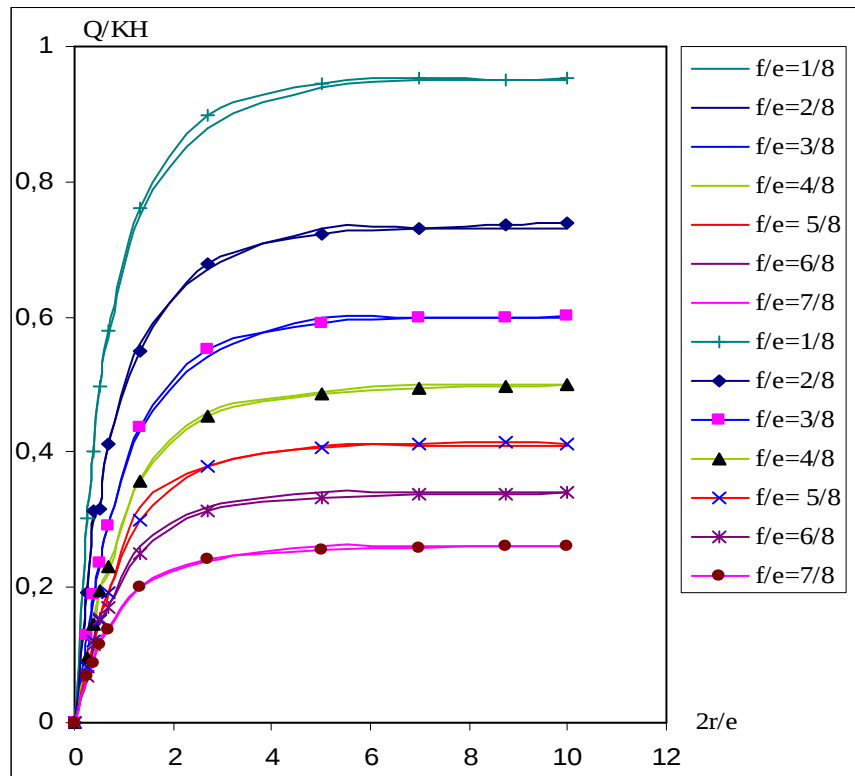


Figure IV.27 : Comparaison du débit total en fonction de $2r/e \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ KASTNER et Flac2D.

Les tableaux suivants montrent clairement que les écarts entre les calculs numériques et ceux de la partie bibliographique n'excèdent pas 04.1 %.

$f/e = 0.5$

$2r/e$	r (m)	Le débit unitaire - Fouille circulaire - d'après Flac2D	Le débit unitaire - Fouille circulaire - d'après KASTNER	Erreur *100 %
0.5	2.5	0.20872	0.2	0.041
1	5	0.3169	0.31	0.021
2	10	0.4255	0.425	0.001
3	15	0.46966	0.46	0.02
4	20	0.488	0.48	0.001
5	25	0.4956	0.49	0.01
6	30	0.49916	0.5	0.001

Tableau IV.7 : Ecart entre les deux approches au niveau des débits d'exhaure.

- Les résultats de DAVIDONKOFF et FRANKE 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 DAVIDENKOFF et FRANKE est bonne (voir **Tableau IV.8**), mettant toutefois en évidence l'erreur systématique liée à l'épaisseur de l'écran dans leur modèle.

$f/e = 0.5$

$2r/e$	r (m)	Le débit unitaire - Fouille circulaire - d'après Flac2D	Le débit unitaire Plan d'après KASTNER	Le débit réduit d'après DAVIDENKOFF et FRANKE $Q_{\text{plan}} * 0.8$	Erreur *100 %
0.5	2.5	0.20872	0.26	0.208	0.003
1	5	0.3169	0.4	0.32	0.009
3	15	0.46966	0.5	0.4	0.149
4	20	0.488	0.5	0.4	0.18
5	25	0.4956	0.5	0.4	0.193
6	30	0.49916	0.5	0.4	0.199

Tableau IV.8 : Ecart entre les deux approches au niveau des débits d'exhaure.

• La comparaison de nos 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 2.5 % près dès que le rayon relatif $2r/e$ est égal à 4 alors que le débit est réduit d'environ 50 % quand : $2r/e = 0.5$. Si l'on admet une erreur maximale de 5 % (toujours par excès donc dans le sens de la sécurité), les relations établies par MANDEL pour l'écoulement plan sont valables dès que $2r/e = 2.7$.

$f/e = 0.125$

$2r/e$	r (m)	Le débit unitaire - Fouille circulaire - d'après Flac2D	Le débit unitaire plan d'après MANDEL	Erreur *100 %
0.25	1	0,302	0,959058455	0,685
0.375	1.5	0,402	0,959058455	0,581
0.5	2	0,4975	0,959058455	0,481
0.67	2.68	0,578358209	0,959058455	0,397
1.34	5.36	0,76119403	0,959058455	0,206
2.7	10.8	0,900001	0,959058455	0,05
5	20	0,945	0,959058455	0,015
7	28	0,953571429	0,959058455	0,006
8.75	35	0,951428571	0,959058455	0,008
10	40	0,9525	0,959058455	0,007

Tableau IV.9 : Ecart entre les deux approches au niveau des débits d'exhaure.

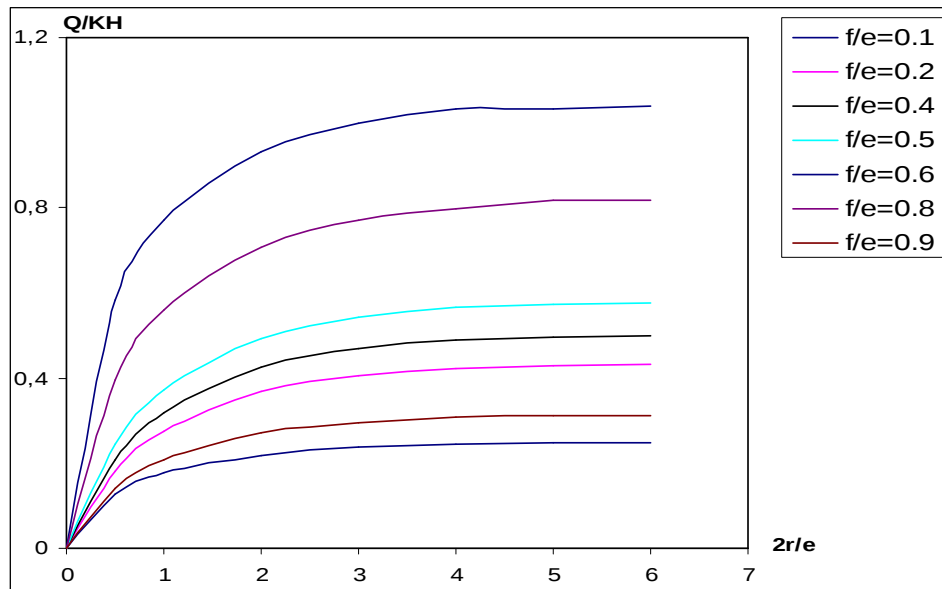
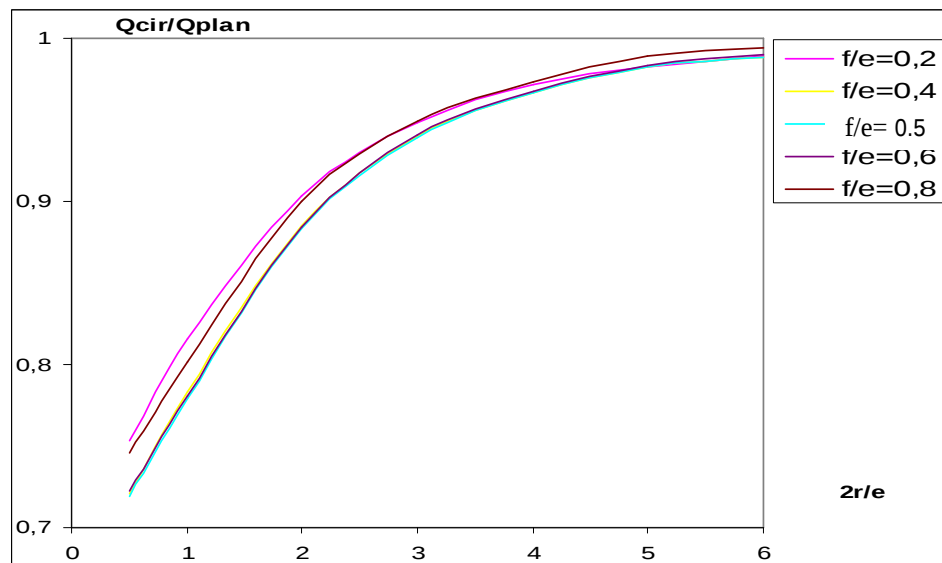
- Ø Ainsi autant pour les fortes largeurs du batardeau que pour les petites valeurs, l'approche *axisymétrique* donne des résultats voisins de l'approche *tridimensionnelle* de KASTNER, et des méthodes de calcul en écoulement plan pour les batardeaux larges.
- Ø D'une manière générale, les batardeaux *circulaires* de grandes largeurs sont souvent considérés comme de batardeaux *plans*. Pour vérifier cette hypothèse, on a effectué une comparaison de nos résultats obtenus par le logiciel Flac2D en *axisymétrie* avec ceux obtenus par le même logiciel et les mêmes programmes en symétrie *plane* (**Tableau IV.10**).

$f/e = 0.5$

$2r/e$	r (m)	Le débit unitaire - Fouille circulaire - d'après Flac2D	Le débit unitaire plan d'après Flac2D	$Q_{\text{circulaire}}/Q_{\text{plan}}$
0.5	2.5	0.20872	0.2902	0.72
1	5	0.3169	0.40675	0.78
2	10	0.4255	0.48175	0.88
3	15	0.46966	0.50025	0.93
4	20	0.488	0.50575	0.96
5	25	0.4956	0.50445	0.98
6	30	0.49916	0.50485	0.99

Tableau IV.10 : Comparaison entre les batardeaux plans et circulaires pour $f/e = 0.5$.

Le **Tableau IV.10** et la **Figure IV.29** confirment que le batardeau *circulaire* peut être considéré comme *plan* vis-à-vis les calculs du débit pour les batardeaux dont le diamètre relatif supérieur à 2.7 avec une erreur inférieure à 5 %.

**Figure IV.28** : Variation du débit plan en fonction de $2r/e \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$.**Figure IV.29** : Variation du rapport $Q_{\text{cir}}/Q_{\text{plan}}$ en fonction de $2r/e \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$.

Dans la **Figure IV.29** les courbes ne sont pas classées en ordre et trois courbes sont confondues ce qui nous permettra de représenter ce rapport par une courbe unique.

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.

IV.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 on fait varier l'épaisseur du sol jusqu'on arrive à une valeur où le débit reste constant.

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

On fixe la valeur de demi-largeur (par exemple : $r = 2 \text{ m}$) et on varie la fiche du batardeau telle que :

$$0.1 < f/2r < 1.75 \text{ donc } 0.4 < f < 6$$

La variation du débit en fonction de la fiche relative est illustrée sur la **Figure IV.30**.

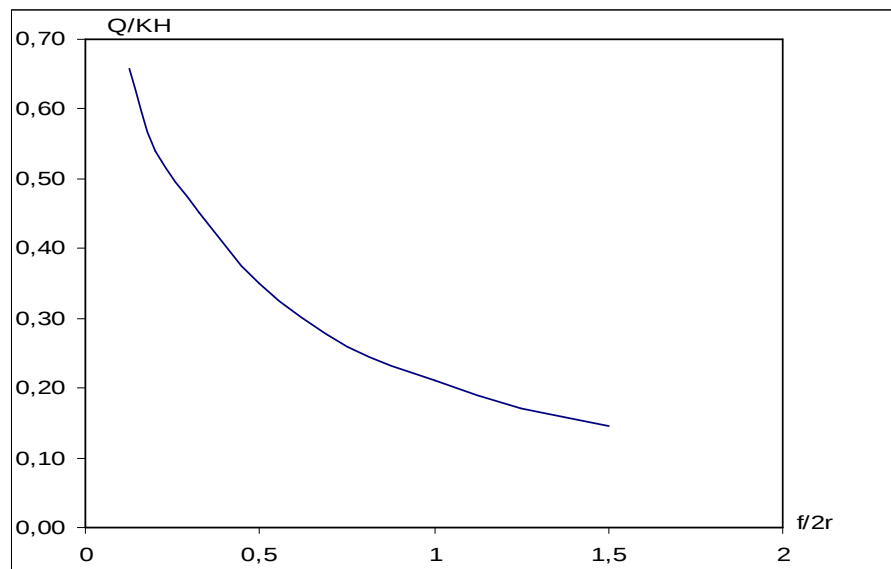


Figure VI.30 : Variation du débit total en fonction de $f/2r$.

IV.5.2 Cas de batardeaux tridimensionnels rectangulaires

Dans ce cas, on fixe aussi la valeur de $r = 2 \text{ m}$ et la fiche du batardeau $f = 3 \text{ m}$, et en faisant varier la troisième dimension, c'est-à-dire la demi-longueur R telle que :

$$0.125 < f/R < 1.5 \text{ donc } 2 < R < 24$$

Nous avons représenté sur la **Figure IV.31**, la variation des débits en fonction de la fiche relative.

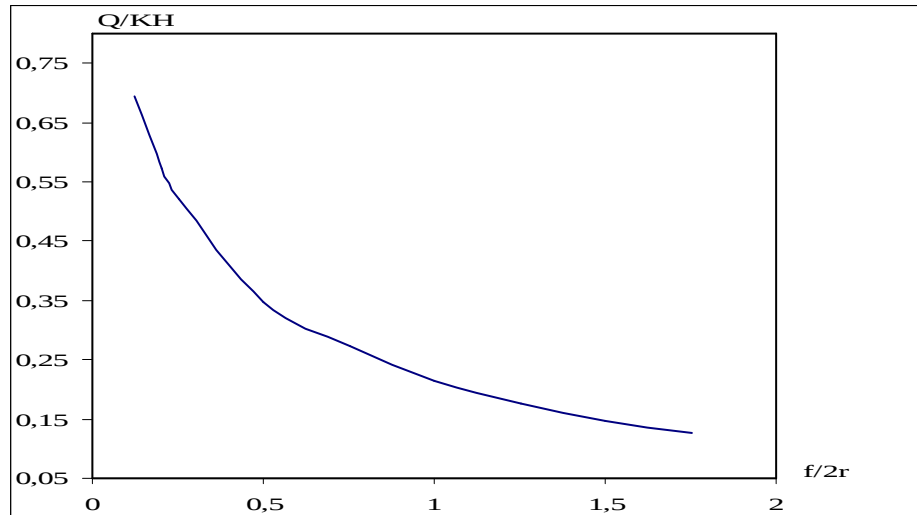


Figure IV.31 : Variation du débit en fonction de $f/2r$ dans un milieu semi-infini.

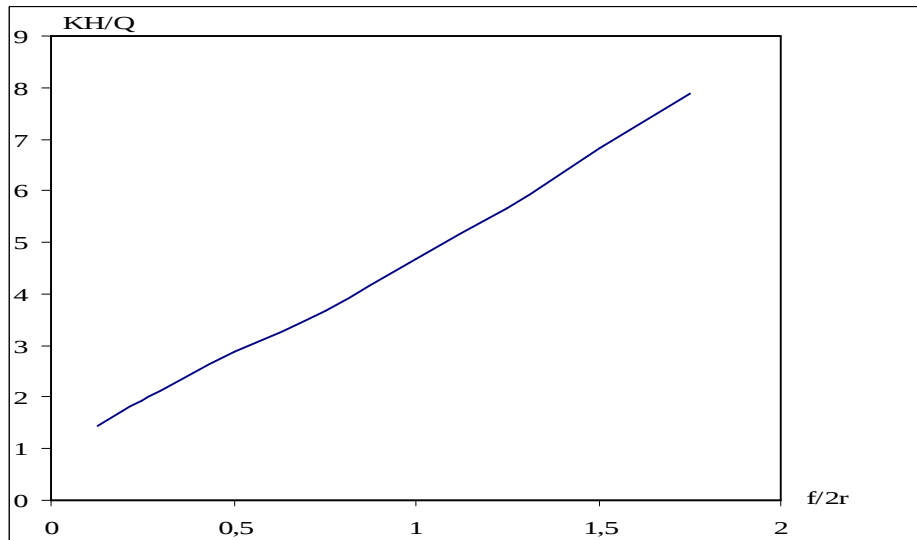


Figure IV.32 : Variation des pertes de charge totales en fonction de $f/2r$.

IV.5.3 batardeaux axisymétriques circulaires sans fouille dans un milieu semi-infini

IV.5.3.1 Calcul du débit d'exhaure

De même, on fixe la valeur de $r = 2 \text{ m}$ et on fait varier la fiche du batardeau.

$$0.1 < f/2r < 1.5 \text{ donc } 0.4 < f < 7$$

La Figure IV.33 donne la variation des débits en fonction de la fiche relative du batardeau.

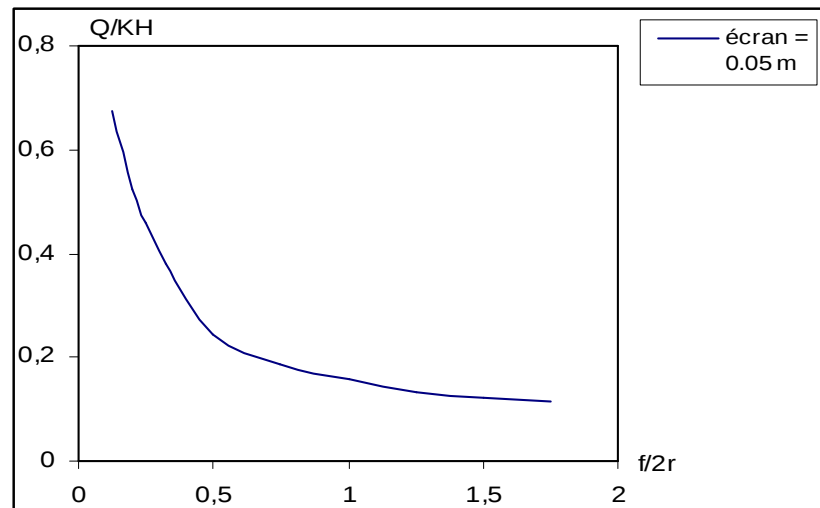


Figure VI.33 : Variation du débit en fonction de la fiche relative du batardeau.

IV.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 sera étudiée.

La **Figure IV.34** 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 : avec épaisseur de l'écran étanche = 0.05 m et 0.5 m dans un milieu semi-infini. Les résultats de calcul sont présentés dans la **Figure IV.34** donnant deux différentes courbes de variation du débit d'exhaure en fonction de la fiche relative du batardeau.

Ces résultats montrent que le débit pour les batardeaux d'une épaisseur de l'écran = 0.05 m est plus grand qu'avec une épaisseur de l'écran = 0.5 m. De plus, on note une très faible différence entre les deux cas, mais pour des faibles largeurs qui représente les batardeaux étroits et les fiches faibles, l'écart observé est très petit et les deux courbes semblent être confondues pour de très petites largeurs. L'influence de l'épaisseur de l'écran étanche semble donc relativement être peu importante pour les batardeaux étroits.

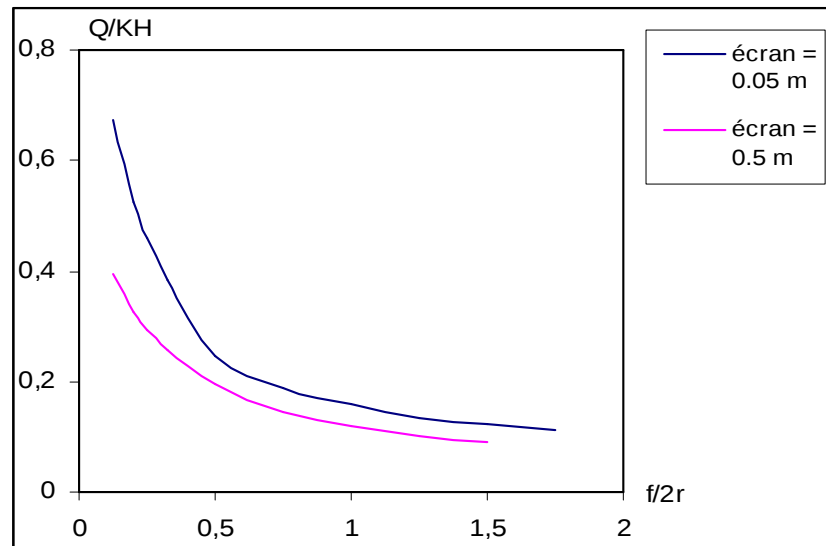


Figure VI.34 : Comparaison du débit de $e' = 0.05$ m et $e' = 0.5$ m.

Analyse des résultats

L'analyse de tous les résultats ainsi obtenus nous montrent que le débit d'exhaure diminue avec l'augmentation du rapport $f/2r \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$, et il ne dépend pratiquement plus de l'épaisseur de la couche perméable mais il dépend à la fois du rapport adimensionnel $f/2r \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ et de la perméabilité verticale surtout.

Par contre, on voit que les pertes de charge augmentent avec $f/2r$ et en mesure que le rapport $f/2r \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ 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.

IV.6 Confrontation avec les résultats existants

IV.6.1 Batardeau carré sans fouille dans un milieu semi-infini -

Ø Confrontation avec les résultats en écoulement plan

A partir des résultats théoriques concernant l'écoulement autour d'un écran unique fiché dans un milieu semi-infini, SCHNEEBLI (1966) a proposé les deux relations suivantes :

$$\begin{aligned}
 e > \sqrt{f^2 + b^2} & \quad \frac{q}{KH} = \frac{2}{\pi} \ln \left[\frac{b}{f} + \sqrt{\left(\frac{b}{f}\right)^2 + 1} \right] \\
 b > \sqrt{\frac{e^2}{f^2}} & \quad \frac{q}{KH} = \frac{2}{\pi} \ln \left[\frac{e}{f} + \sqrt{\left(\frac{e}{f}\right)^2 - 1} \right]
 \end{aligned}
 \tag{II.5}$$

$f/2r$	Le débit - Fouille carrée - d'après Flac3D	Le débit plan d'après SCHNEEBILI Q/KH	Le facteur de réduction de débit Q/KH*0.75 DAVIDENKOFF	Erreur *100 %
0.125	0,66	0,884226841	0,663170131	0,0093
0.2	0,54	0,736445332	0,552333999	0,0223
0.325	0,45	0,586781851	0,440086389	0,0242
0.5	0,35	0,459756521	0,344817391	0,0148
0.75	0,26	0,349876525	0,262407394	0,0092
1	0,21	0,280692225	0,210519169	0,0025
1.25	0,17	0,23333384	0,17500038	0,0286
1.5	0,15	0,199090802	0,149318101	0,0289

Tableau IV.11 : Comparaison avec SCHNEEBILI.

Ø On remarque dans ce cas que la majorité du débit est réduit d'environ 25 %, ce qui permet de dire que le facteur réducteur du débit proposé par DAVIDENKOFF et qui est égal à 0.75 est valable dans ce cas avec une erreur inférieure à 2.89 %.

Ø Les résultats de simulations de KASTNER (1982) sont résumés (**Figure II.6** Page 35) sous forme de la variation du débit en fonction de la fiche et de la largeur du batardeau.

La comparaison de nos résultats aux résultats de KASTNER nous mène aux constatations suivantes :

Ø Le débit est réduit aussi d'environ 25 %, et par conséquent, le facteur réducteur du débit proposé par DAVIDENKOFF (0.75) est valable dans ce cas avec une erreur inférieure à 4.4 %. Cependant, dès que $f/b = 1$, le débit est réduit de 30 % et dans ce cas le facteur réducteur de débit devient 0.7.

$f/2r$	Le débit d'après Flac3D	Le débit plan d'après KASTNER	Le débit d'après DAVIDENKOFF et FRANKE $Q_{\text{plan Kastner}} * 0.75$	Erreur *100 %
0.125	0,66	0,88	0,66	0,00455
0.2	0,54	0,73	0,5475	0,01370
0.25	0,52	0,665	0,49875	0,04454
0.325	0,45	0,58	0,435	0,03548
0.5	0,35	0,46	0,345	0,01429
0.75	0,26	0,35	0,2625	0,00952
1	0,21	0,3	0,225	0,06667
1.25	0,17	0,24	0,18	0,05556
1.5	0,15	0,21	0,1575	0,07937

Tableau IV.12 : Comparaison avec DAVIDENKOFF et FRANKE.

IV.6.2 Batardeau rectangulaire sans fouille dans un milieu semi-infini

Ø Confrontation avec les résultats en écoulement plan

- v La comparaison de nos résultats et ceux obtenus par réduction du débit avec un facteur de 0.78 en se basant sur les relations théoriques (II.5) de SCHNEEBILI (1966) nous montre que l'erreur commise est inférieure à 3.4%. Cependant, ce facteur prend la valeur de 0.75 lorsque $f/b > 1.5$.

f/b	Le débit - Fouille rectangulaire - d'après Flac3D	Le débit plan d'après SCHNEEBILI Q/KH	Le facteur de réduction de débit Q/KH*0.78	Erreur *100 %
0.125	0,69	0,884226841	0,690	0,005
0.2	0,57	0,736445332	0,574	0,002
0.25	0,52	0,667105907	0,520	0,001
0.5	0,35	0,459756521	0,359	0,034
0.75	0,27	0,349876525	0,273	0,002
1	0,21	0,280692225	0,219	0,026
1.25	0,18	0,23333384	0,182	0,030
1.5	0,15	0,199090802	0,155	0,059
1.75	0,13	0,173302941	0,135	0,067

Tableau IV.13 : Comparaison avec SCHNEEBILI.

- v De même, le débit est réduit d'environ 22 % à cause de fortes pertes de charge engendrées au niveau des singularités. Le facteur réducteur peut être estimé à 0.78 par comparaison de nos résultats aux résultats de KASTNER en écoulement plan.

f/b	Le débit - Fouille rectangulaire - d'après Flac3D	Le débit plan d'après KASTNER Q/KH	Le facteur de réduction Q/KH*0.78	Erreur *100 %
0.125	0,69	0,88	0,686	0,010
0.2	0,57	0,73	0,569	0,007
0.25	0,52	0,665	0,519	0,002
0.5	0,35	0,46	0,359	0,034
0.75	0,27	0,35	0,273	0,001
1.25	0,18	0,24	0,187	0,056
1.5	0,15	0,21	0,164	0,105
1.75	0,13	0,20	0,156	0,188

Tableau IV.14 : Le facteur réducteur du débit comparé avec KASTNER.

Représentons ainsi, sur le même graphique, la variation théorique et numérique du débit Q/KH en fonction du rapport adimensionnel $f/2r$, illustré sur la **Figure IV.35**.

Il ressort de la **Figure IV.35** une coïncidence de la courbe du débit obtenu par le code numérique **Flac3D** avec la courbe de réduction du débit avec un facteur de 0.78 comparé aux résultats de KASTNER en écoulement plan avec une erreur qui ne dépasse pas 5.6 %. Néanmoins on remarque un petit décalage au niveau des deux derniers points qui sont les grandes fiches, autrement dit qu'à partir de $f/b = 1.5$ ce facteur réducteur change de valeur, car l'erreur dans ce cas dépasse 10.5 %.

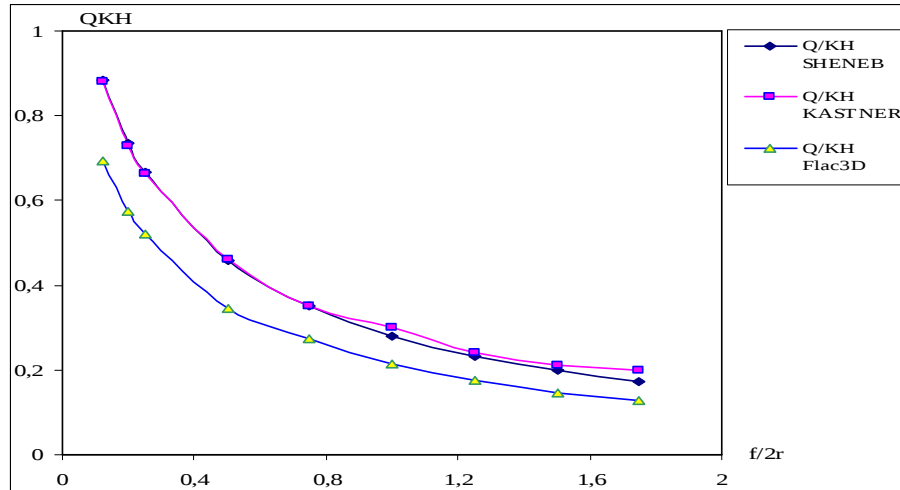


Figure IV.35 : Comparaison avec les résultats en écoulement plan.

IV.6.3 Batardeau axisymétrique circulaire sans fouille dans un milieu semi-infini

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

relation :

$$\frac{Q}{KH} = \frac{1}{\pi} \left\{ \ln \frac{4r}{f} - 0.167 \right\}$$

Par comparaison avec nos résultats et ceux de BRILLANT, son domaine d'application à 02 % près peut être défini par :

$$f/2r < 0.5$$

$$2r/e < 1.5$$

$$f/e < 0.125$$

f/b	Le débit d'après Flac2D	Le débit d'après BRILLANT	Erreur *100 %
0.125	0.675	0.687	0.018
0.2	0.525	0.537	0.023
0.25	0.46	0.466	0.01
0.325	0.382	0.383	0.003
0.5	0.245	0.246	0.004

Tableau IV.15 : Comparaison avec BRILLANT.

On remarque que pour ces fiches faibles, l'erreur ne dépasse pas 2.3 %.

IV.7 Propositions pour le calcul du débit dans les batardeaux carrés sans fouille

Les différentes méthodes que nous venons de passer en revue en écoulement *plan* 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 IV.5) donne le débit Q en fonction de la fiche relative f/e et la largeur relative B/e dans le domaine suivant :

$$0.125 < f/e < 0.875$$

$$0.1 < 2r/e < \infty.$$

Le second (Figure IV.30) concerne une zone où le débit n'est pratiquement fonction que de $f/2r$: il s'agit du domaine tel que :

$$0.125 < f/2r < 1.5$$

IV.8 Propositions pour le calcul du débit dans les batardeaux rectangulaire sans fouille

Les différentes méthodes que nous venons de passer en revue en écoulement *plan* 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 IV.9**) donne le débit Q en fonction de la fiche relative f/e et la largeur relative B/e dans le domaine suivant :

$$0.125 < f/e < 0.875$$

$$0.1 < 2R/e < \infty.$$

$$1 < 2R/2r < 12$$

Enfin, pour les batardeaux de faibles largeurs, nous proposons de calculer le débit à l'aide de la relation : $Q = Q_{\text{plan}} * B$ où B est un facteur de réduction dépendant à la fois de f/e et de $2r/e$. on peut estimer ce facteur à environ $B = 0.85$.

Le second (**Figure IV.31**) concerne une zone où le débit n'est pratiquement fonction que de $f/2r$: il s'agit du domaine tel que :

$$0.125 < f/2r < 1.5 \text{ donc } 2 < R < 24$$

IV.9 Débit 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.

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

Nous avons adopté 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) sera introduit dans tous les modèles de simulation qui suivent. Le niveau de la surface phréatique (surface libre) 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 m. La fouille est entourée par des écrans étanches verticaux d'épaisseur e' en m qui se prolongent de f_2 en m 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 IV.37** illustre le modèle adopté en Flac3D et le maillage avec une excavation.

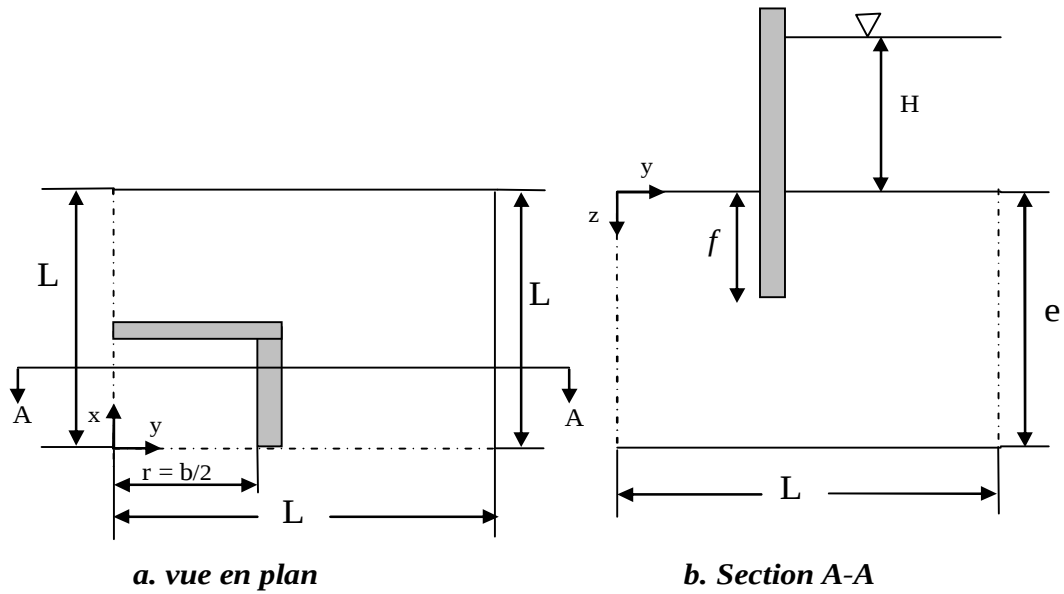


Figure IV.36 : Batardeau carré avec fouille- Excavation –
Un quart de la section.

Puisque nous sommes intéressés 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.

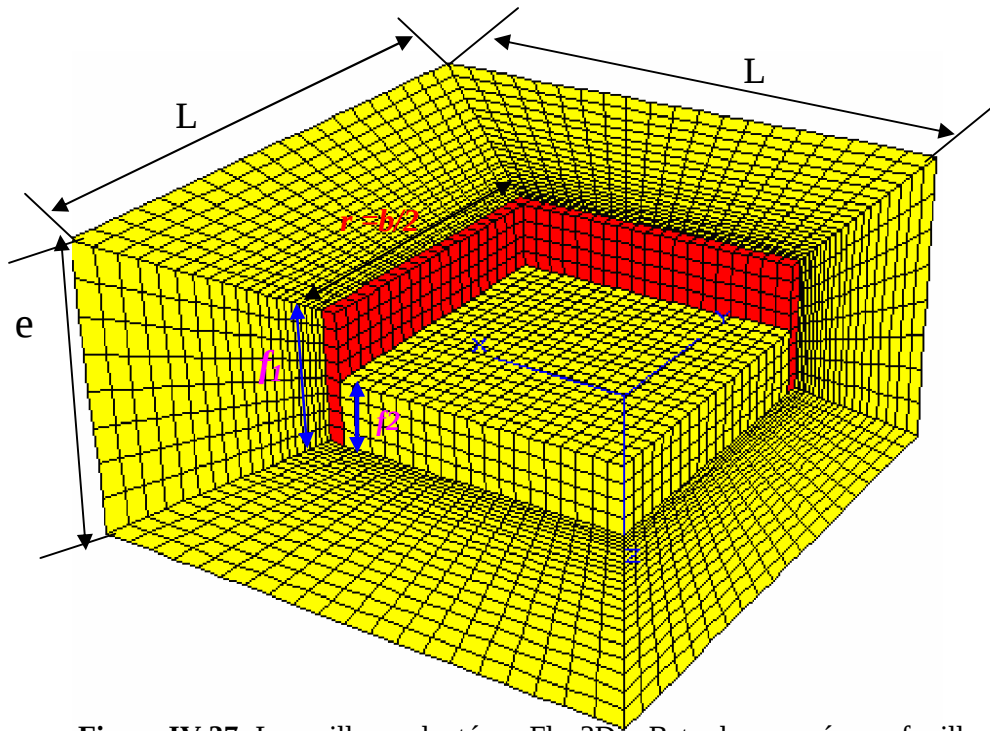


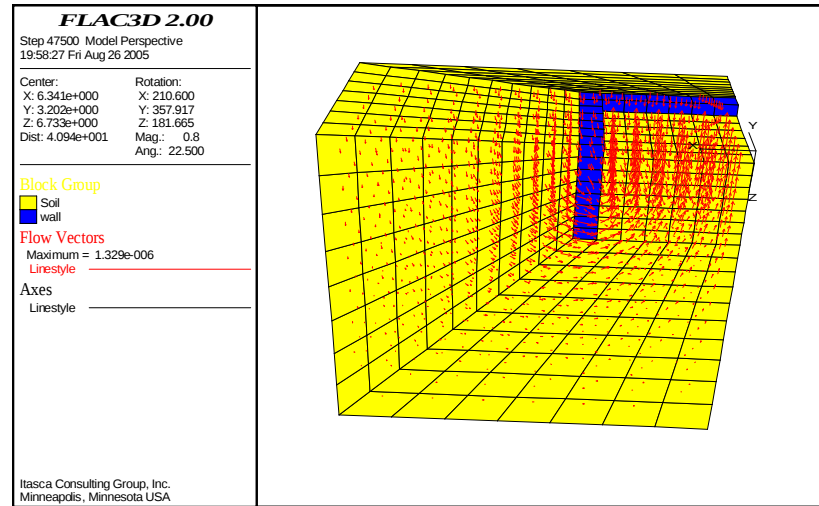
Figure IV.37: Le maillage adopté en Flac3D - Batardeau carré avec fouille.

La valeur du débit que nous avons ainsi calculée est transcrite sur l'abaque de la **Figure IV.39** donnant la variation du débit total en fonction de $2r/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$.

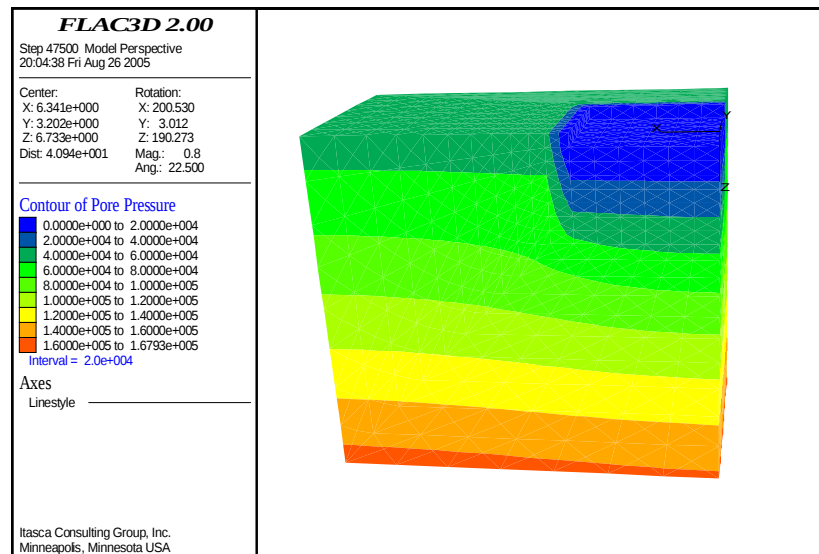
Il révèle que la méthode numérique conduit à de bons résultats. On notera qu'à partir de $2r/e = 2.7$, l'influence de la largeur du batardeau devient quasi négligeable, ce qui représente les fouilles larges.

Ø Visualisation du modèle adopté en Flac3D

(a)



(b)



(c)

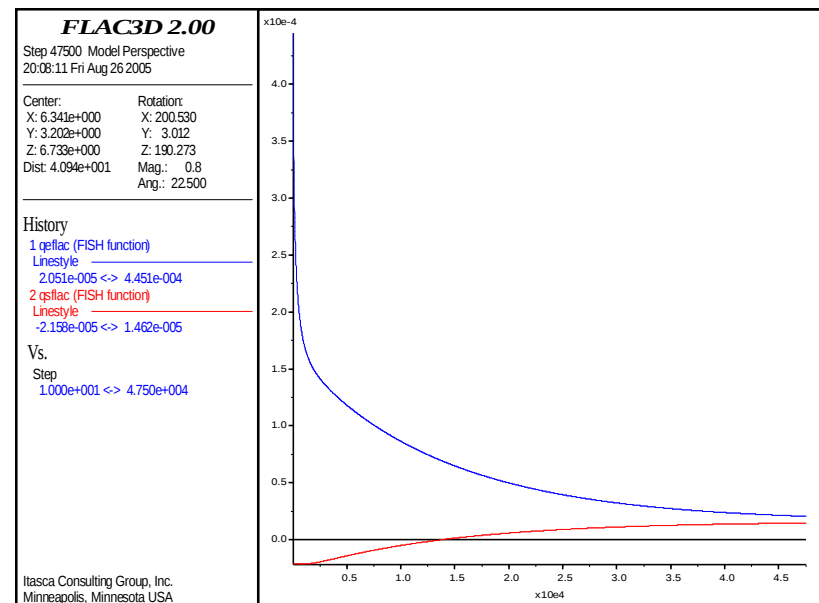


Figure IV.38 : Modèle Flac3D : $2r/e = 1.34$, $f/e = 1/8$, (a) Vecteurs d'écoulement (b) Contour de distribution des pressions interstitielles en état d'écoulement permanent, (c) Historique du débit entrant et débit sortant (convergence des calculs).

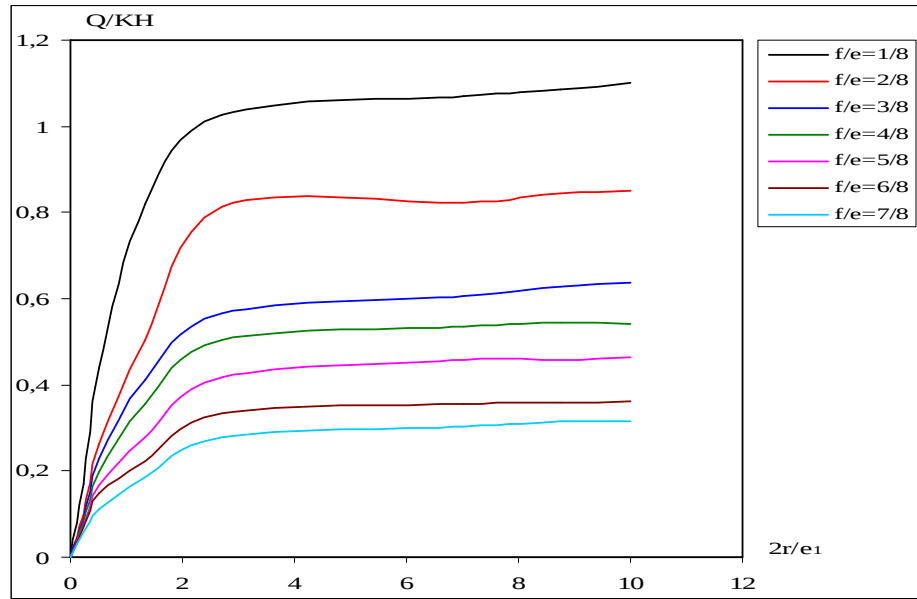


Figure IV.39 : Variation du débit total en fonction de $2r/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$.

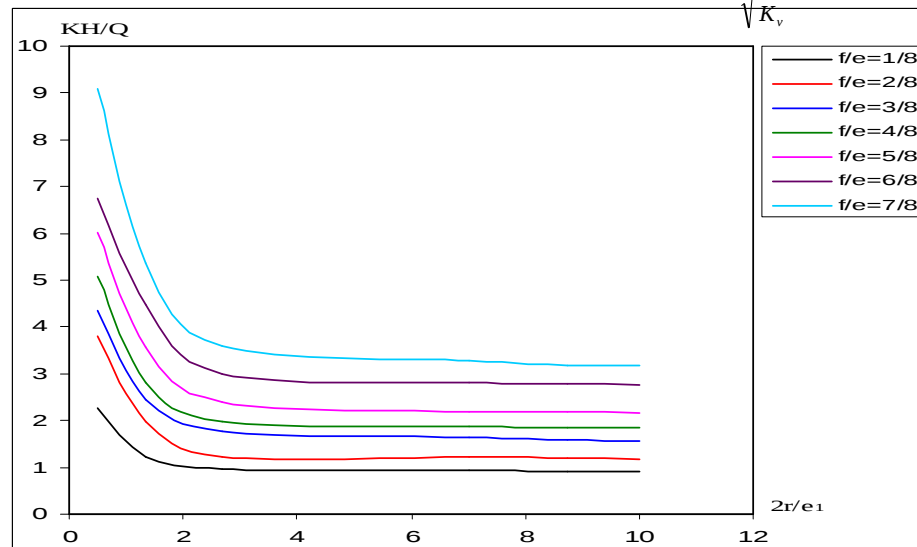


Figure IV.40 : Variation des pertes de charge totales en fonction de $2r/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$.

Le calcul des pertes de charge de l'écoulement à l'intérieur et à l'extérieur du modèle de batardeau testé est un élément important dans l'évaluation du coefficient de sécurité. La valeur de la perte de charge du côté aval correspond également, dans le cas qui intéresse notre étude, à la perte de charge entre le pied de l'écran étanche et le fond de la fouille calculée dans les zones de ses **coins**. Plus le calcul de cette valeur s'effectue avec précision et plus l'évaluation du gradient moyen est acceptable, car, la détermination du gradient moyen se limite à la détermination de cette valeur. Il est donc recommandé de procéder aux calculs des pertes de charge aussi précis que possible par un modèle *tridimensionnel* où l'écoulement vers la fouille est à filets convergents, ce qui introduit une perte de charge supplémentaire.

Dans tous nos calculs, nous avons utilisé un modèle *tridimensionnel* avec un maillage raffiné. Il s'agit donc d'un modèle dont la précision est tout à fait requise pour la nature des tests envisagés. De plus, la géométrie des modèles testés a pour particularité de la prendre quasi identique au cas de la réalité, prenant en compte la troisième dimension dans tous nos calculs. Ceci induit sans doute à une meilleure précision des calculs du débit d'exhaure et les pertes de charge.

Il ressort des figures ainsi représentées les principales constatations suivantes :

- 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 la fiche relative du celui-ci. Cependant le débit reste constant à partir de la valeur de $2r/e = 2.7$ quelque soit la valeur de f_2/e_2 (Figure IV.41).
- Quant au coté amont, il est clair que le débit augmente avec l'augmentation de la largeur relative du batardeau $2r/e_1$, et diminue avec l'augmentation de la fiche relative du celui-ci. Néanmoins, le débit reste également constant à partir de la valeur de $2r/e = 2.7$ quelque soit la valeur de f_2/e_2 (Figure IV.42).

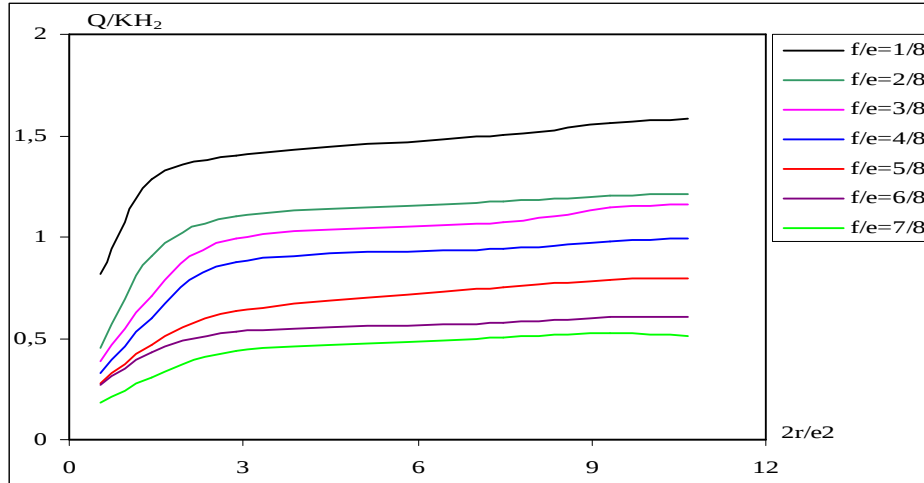


Figure IV.41 : Variation du débit en fonction de $2r/e_2 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté aval.

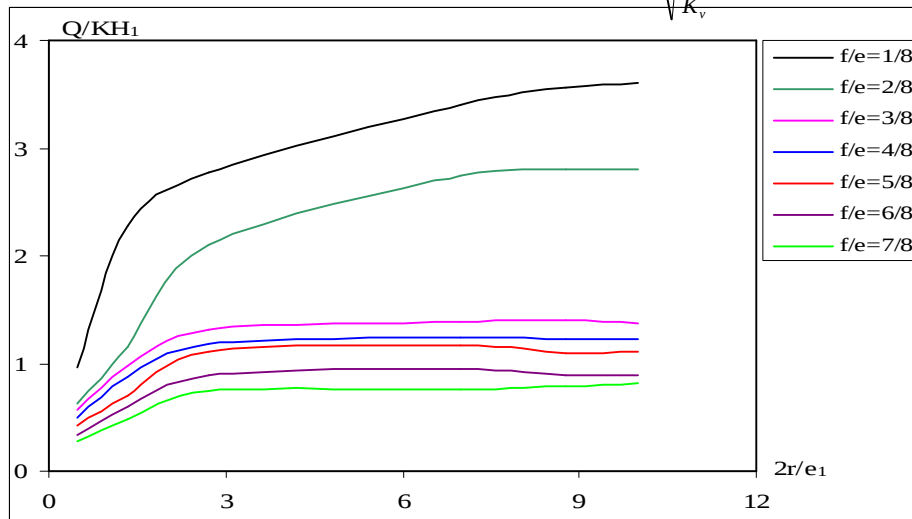


Figure IV.42: Variation du débit en fonction de $2r/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté amont.

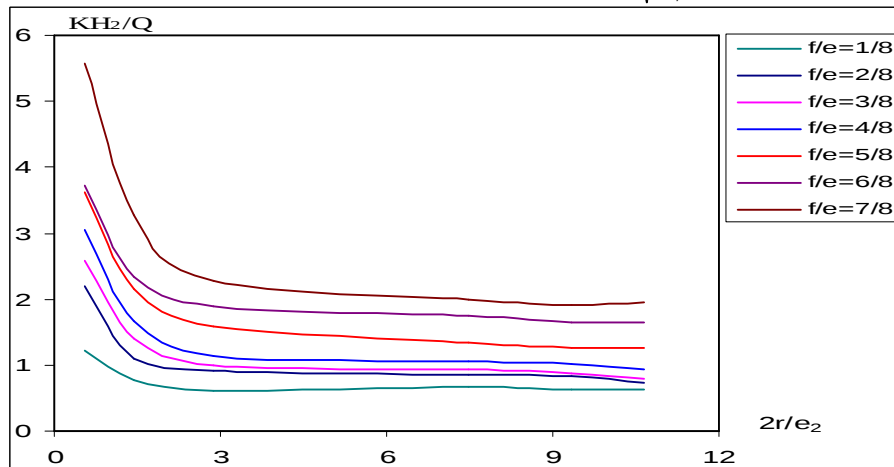


Figure IV.43 : Variation des pertes de charge en fonction de $2r/e_2 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté aval.

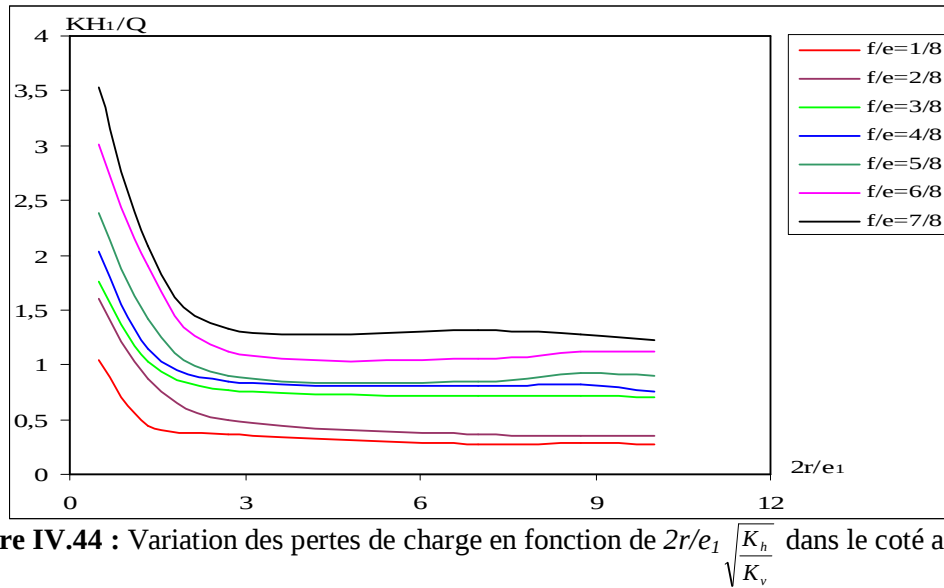


Figure IV.44 : Variation des pertes de charge en fonction de $2r/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté amont.

- Il apparaît des figures **IV.45**, **IV.55** et **IV.64** 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.

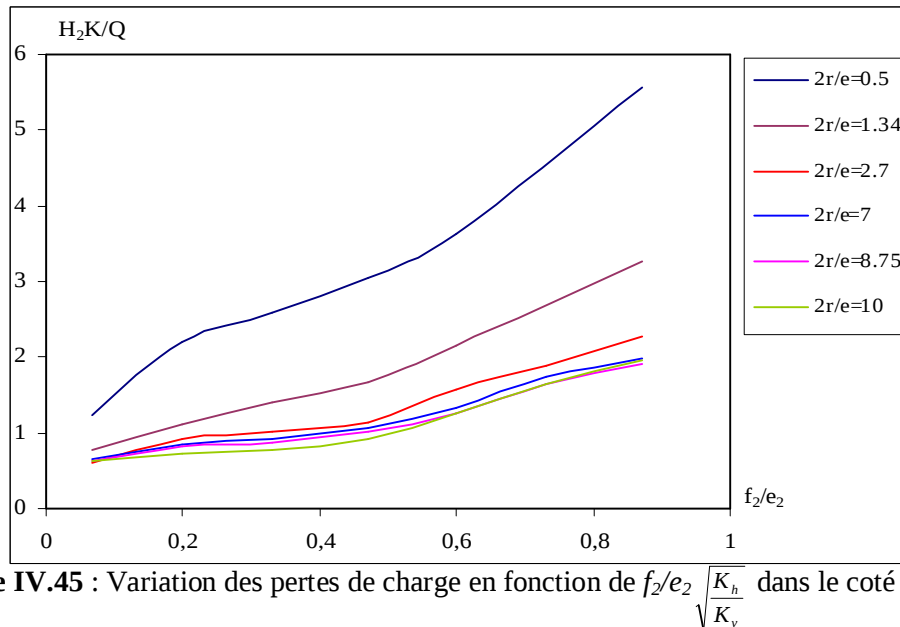


Figure IV.45 : Variation des pertes de charge en fonction de $f_2/e_2 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté aval.

- Quant au coté amont, les pertes de charge augmentent avec l'augmentation de f_1/e_1 , c'est-à-dire avec la longueur du trajet d'écoulement (**Figure IV.46**, **Figure IV.56** et **Figure IV.65**), 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.

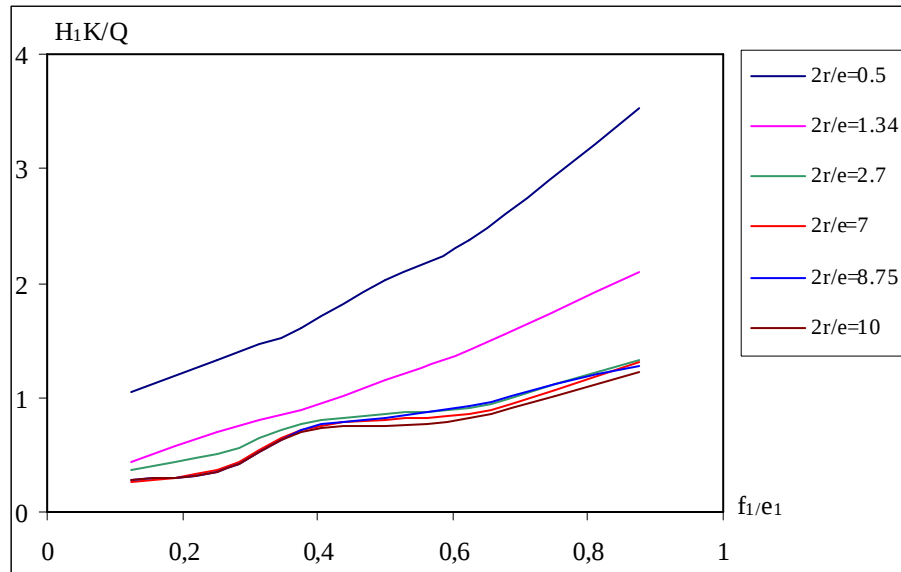


Figure IV.46 : Variation des pertes de charge en fonction de $f_1/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté amont.

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

Dans ce cas, nous allons considérer le 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 IV.47 illustre le modèle ainsi le maillage adopté.

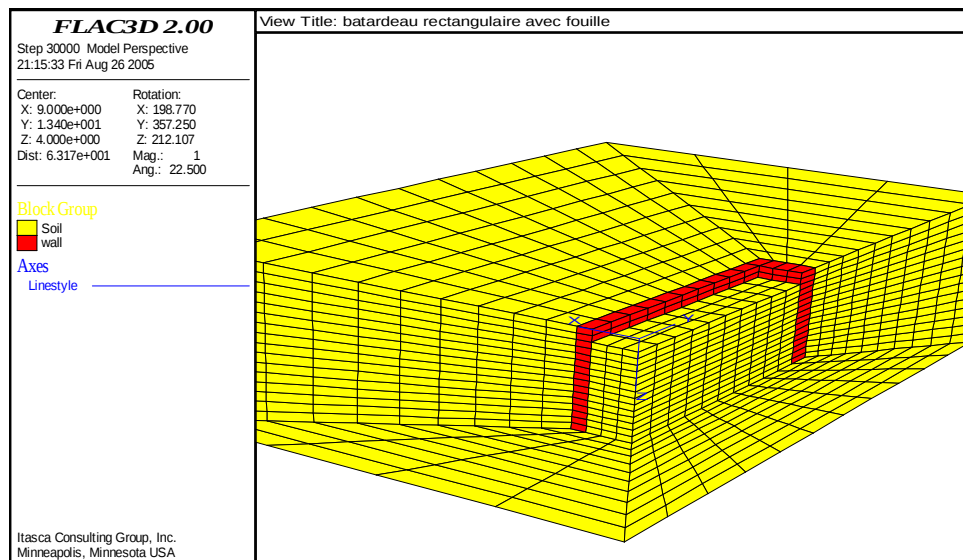


Figure IV.47 : Le maillage adopté en Flac3D - Batardeau rectangulaire avec fouille.

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 IV.49, IV.50, IV.51, IV.52, IV.53, IV.54, IV.55, IV.56.

Ø Visualisation du modèle adopté en Flac3D

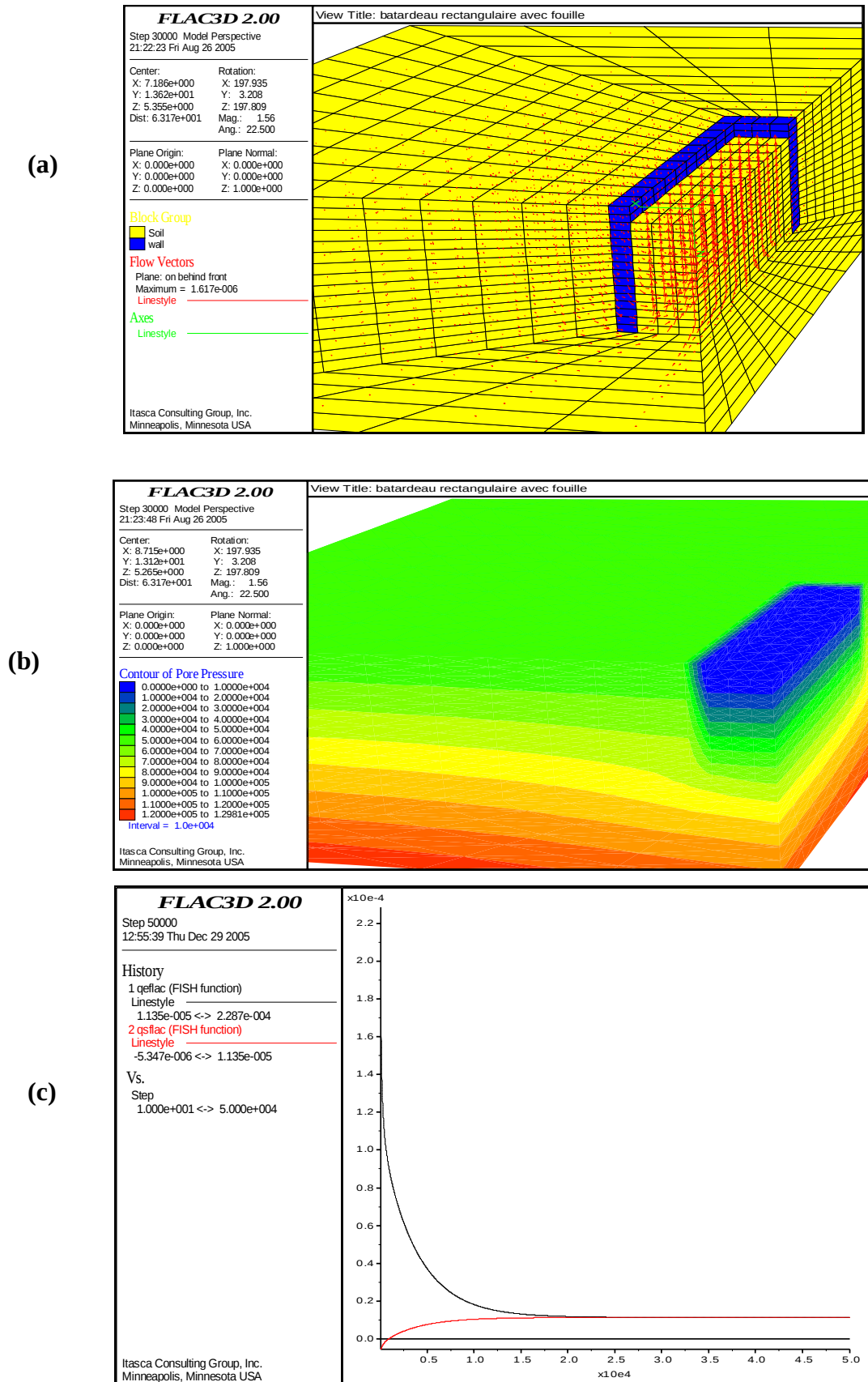


Figure IV.48 : Modèle Flac3D : $2R/e = 0.2.7$, $r=2m$ et $f/e = 4/8$, (a) Vecteurs d'écoulement, (b) Contour de distribution des pressions interstitielles en état d'écoulement permanent, (c) Historique du débit entrant et débit sortant (convergence des calculs).

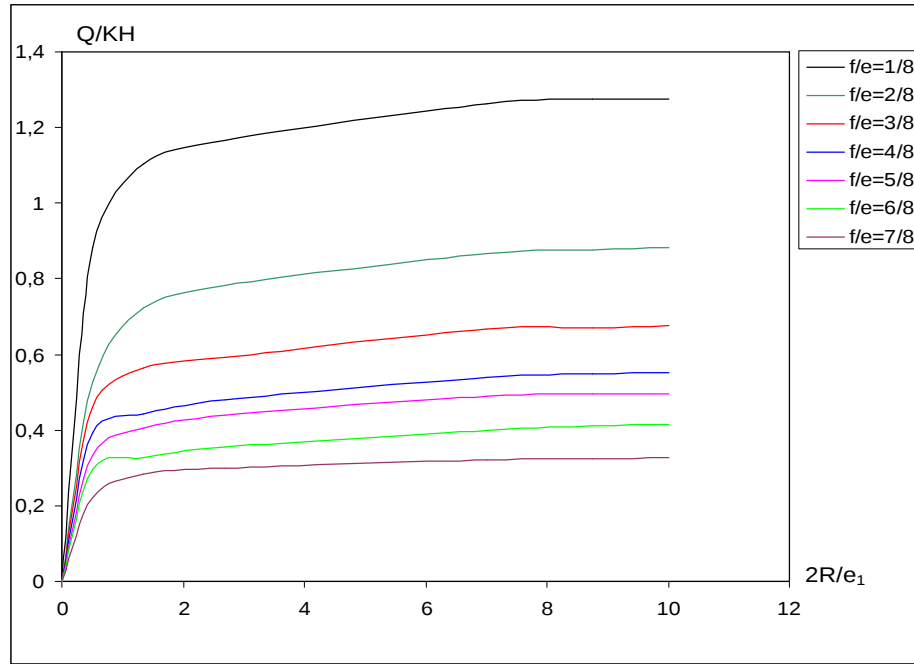


Figure IV.49 : Variation du débit total en fonction de $2R/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$.

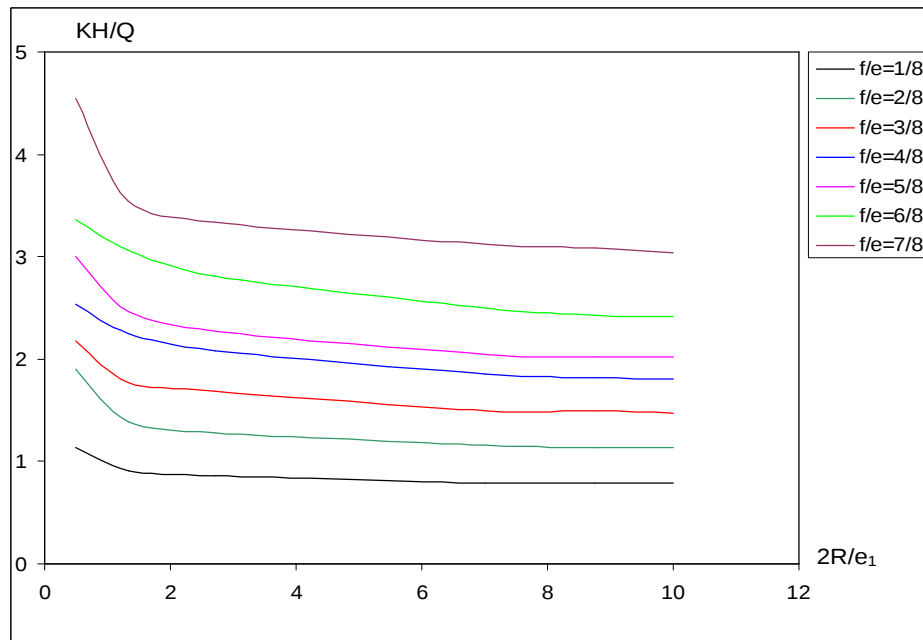
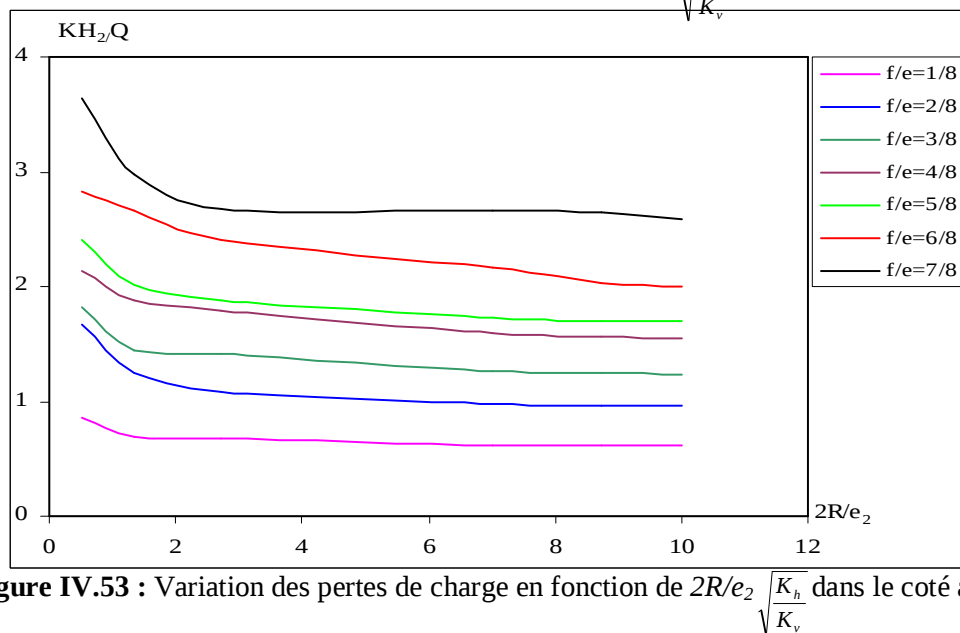
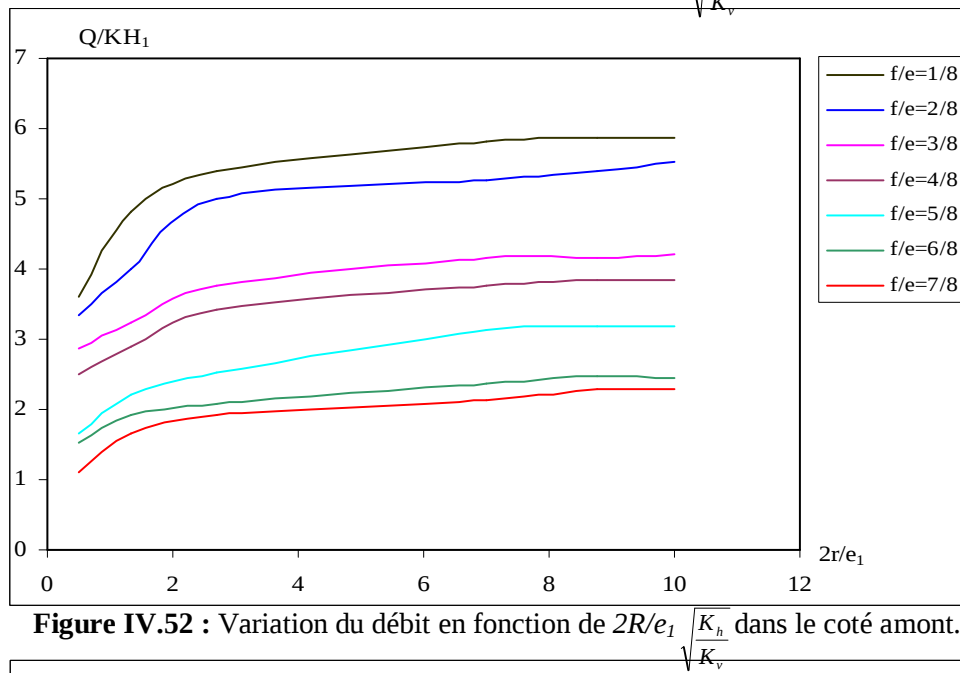
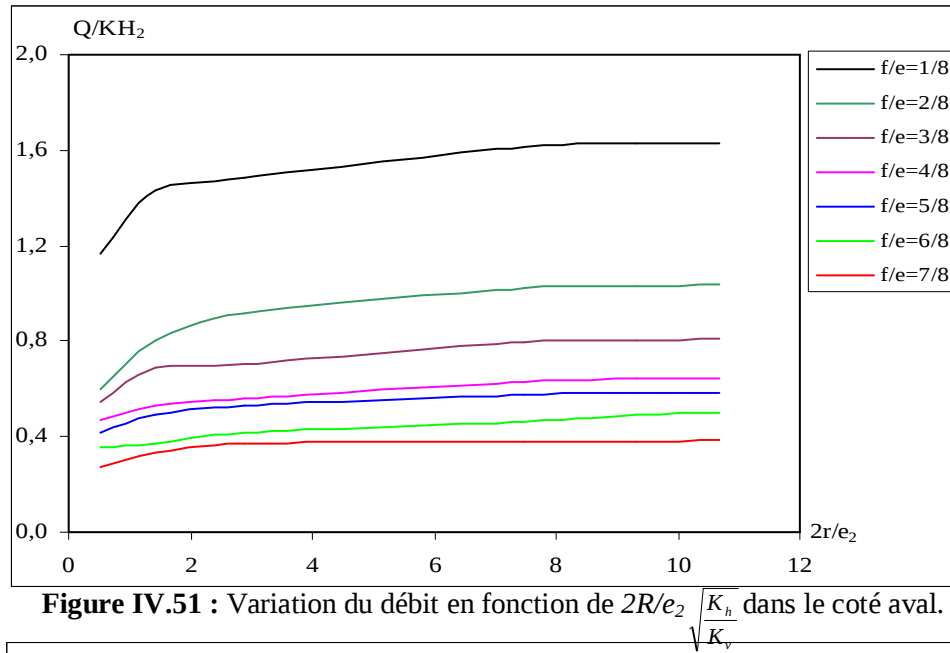


Figure IV.50 : Variation des pertes de charge totales en fonction de $2R/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$.

- Dans le coté aval, on note les mêmes constatations que la **Figure IV.41**. Bien que dans ce cas le débit reste constant à partir de la valeur de $2R/e = 2.5$ où $2R/2r = 5$ donc $R = 5r$ quelque soit la valeur de f_2/e_2 (**Figure IV.51**).
- Quant au coté amont, on note aussi les mêmes constatations que la **Figure IV.42**. Néanmoins, le débit reste également constant à partir de la valeur de $2R/e = 2.5$ quelque soit la valeur de f_2/e_2 (**Figure IV.52**).



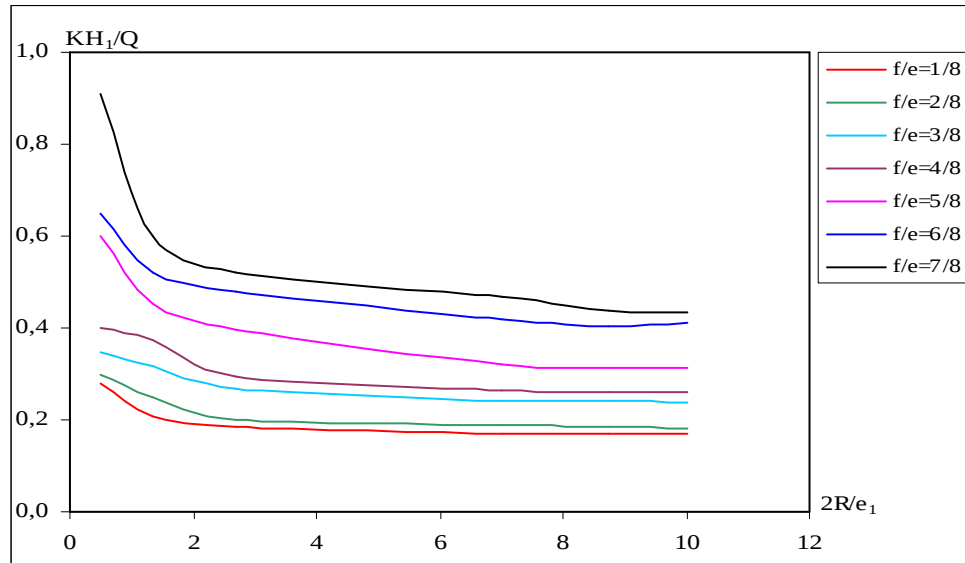


Figure IV.54 : Variation des pertes de charge en fonction de $2R/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté amont.

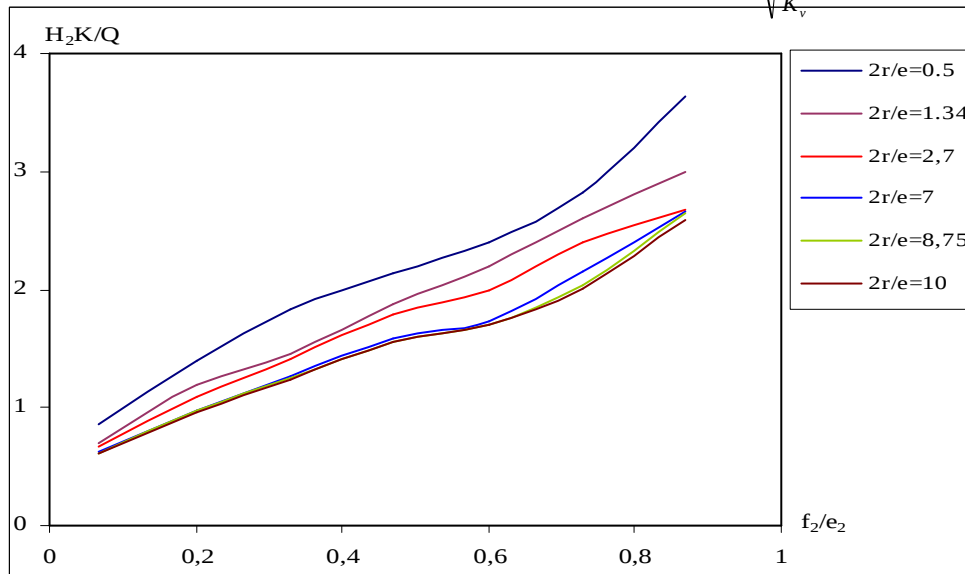


Figure IV.55 : Variation des pertes de charge en fonction de $f_2/e_2 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté aval.

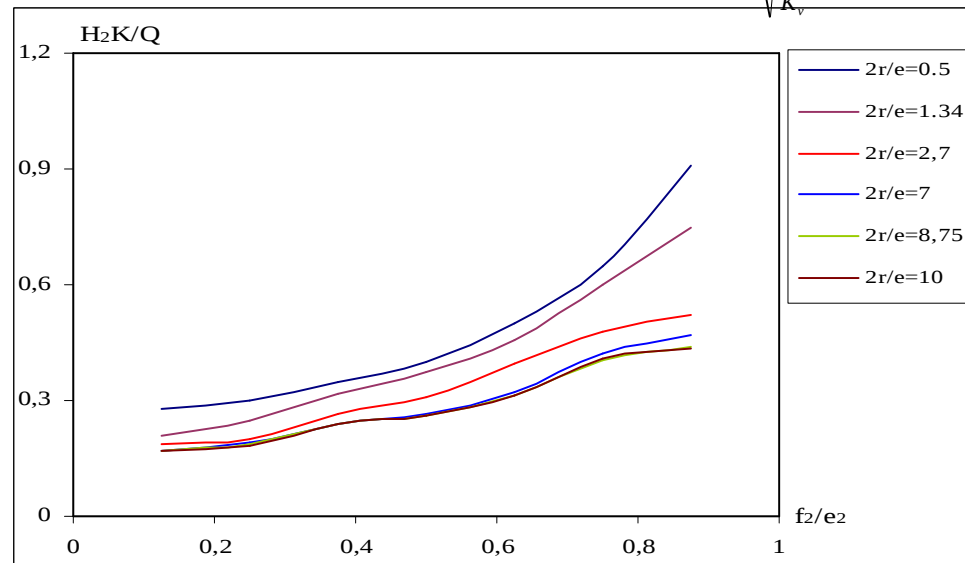


Figure IV.56 : Variation des pertes de charge en fonction de $f_1/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté amont.

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

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

Nous avons adopté 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 pour un écoulement plan sont applicables aussi à ce cas pour peu que la fouille soit large.

Les valeurs du débit que nous avons ainsi calculée sont représentées sur l'abaque de La **Figure IV.58** donnant la variation du débit total en fonction de $2r/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$.

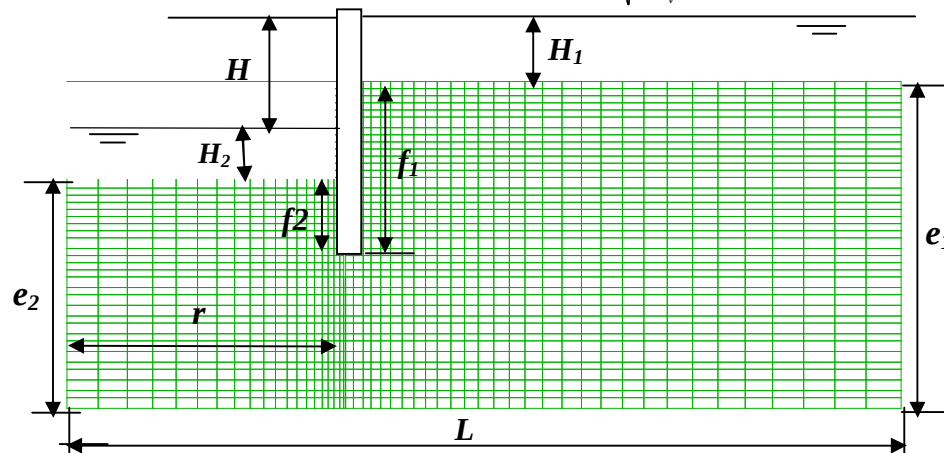


Figure VI.57 : Détail du maillage axisymétrique adopté en Flac2D.
- Batardeau circulaire avec fouille -

Il apparaît que la méthode numérique conduit à de bons résultats, l'écart entre le débit calculé et celui mesuré directement par analogie électrique en **3D** étant au maximum 05 %.

On note qu'à partir de $2r/e = 2.7$, l'influence de la largeur du batardeau devient quasi négligeable, ce qui représente le cas des fouilles larges.

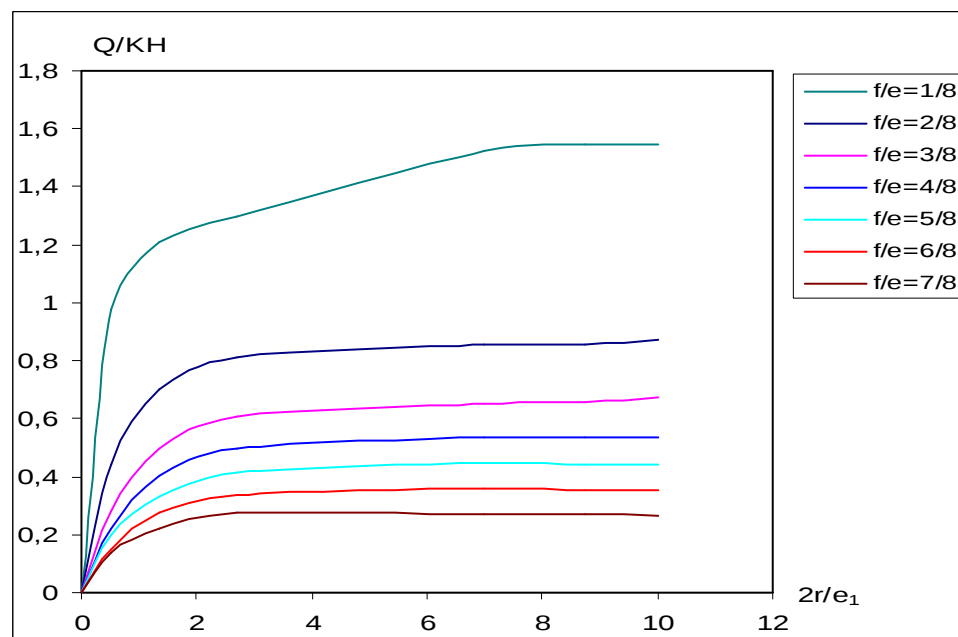


Figure IV.58 : Variation du débit total en fonction de $2r/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$.

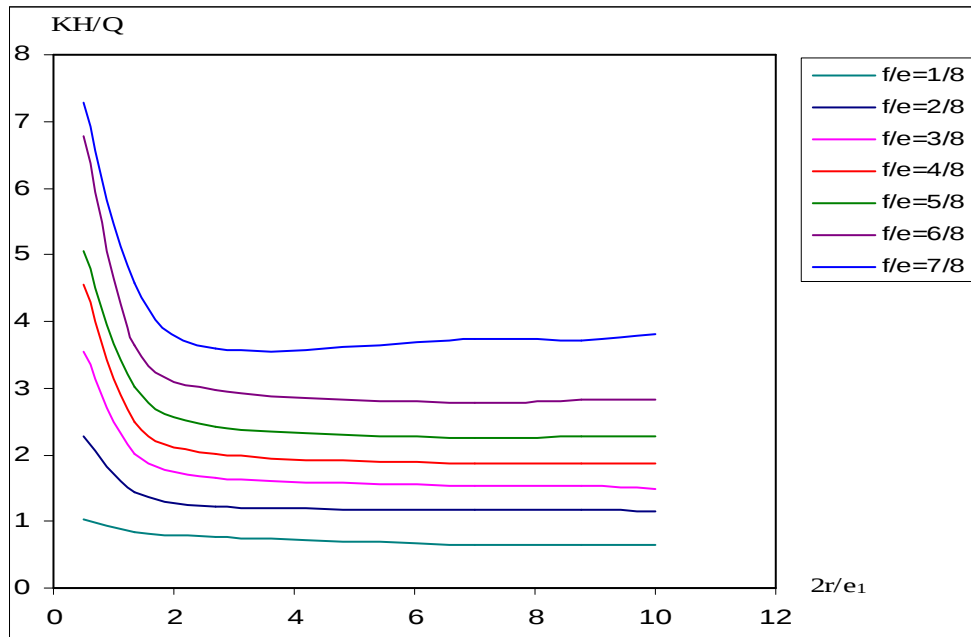


Figure IV.59 : Variation des pertes de charge totales en fonction de $2r/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$.

- Dans le coté aval, on peut voir les mêmes constatations que les figures IV.41 et IV.51. Cependant, le débit reste constant à partir de la valeur de $2r/e = 2.7$ (Figure IV.60).

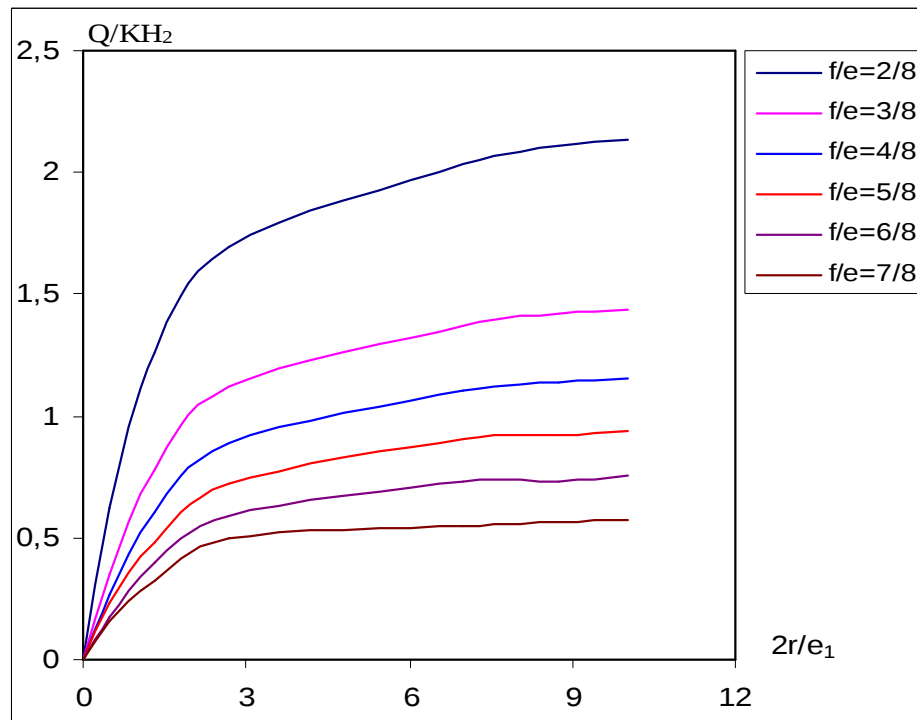


Figure IV.60: Variation du débit en fonction de $2r/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté aval.

- En ce qui concerne le coté amont, la Figure IV.61 apparaît les même constatations que les figures IV.42 et IV.52. Alors que dans ce cas dès que $2r/e > 2.7$ les valeurs des pertes de charge se stabilisent et devient presque constantes, ce qui permet de dire que ce sont des fouilles larges.

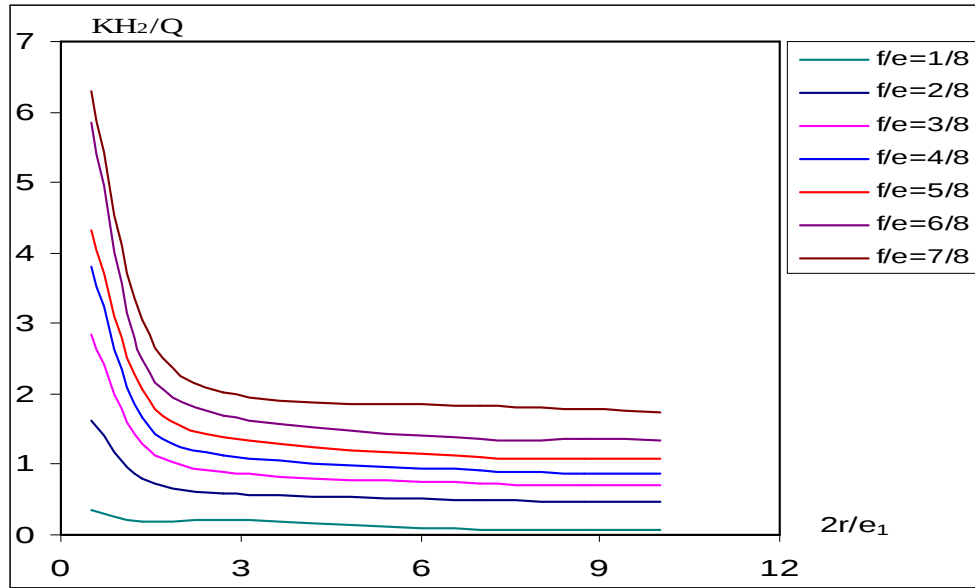


Figure IV.61: Variation des pertes de charge en fonction de $2r/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ coté amont.

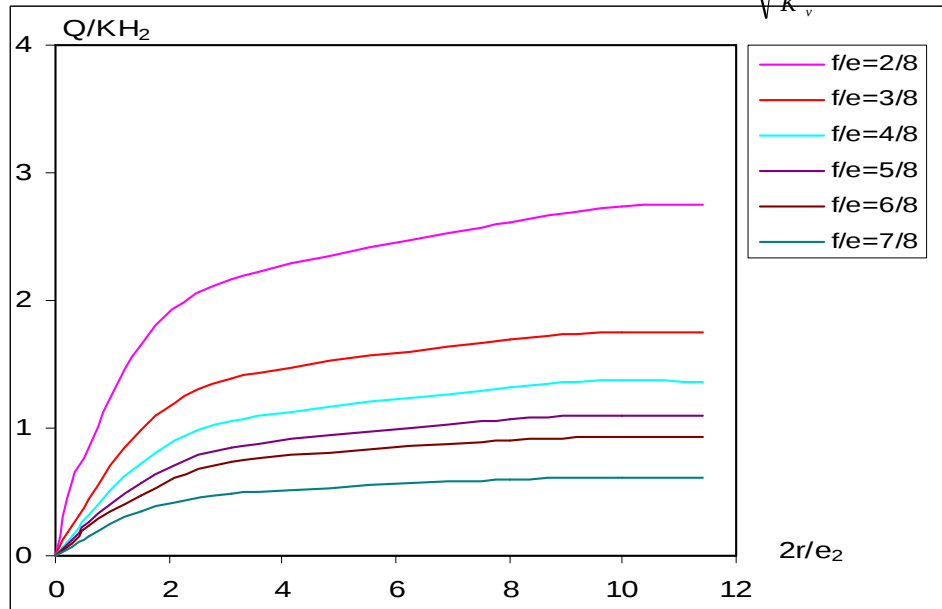


Figure IV.62 : Variation du débit en fonction de $2r/e_1$ dans le coté aval.

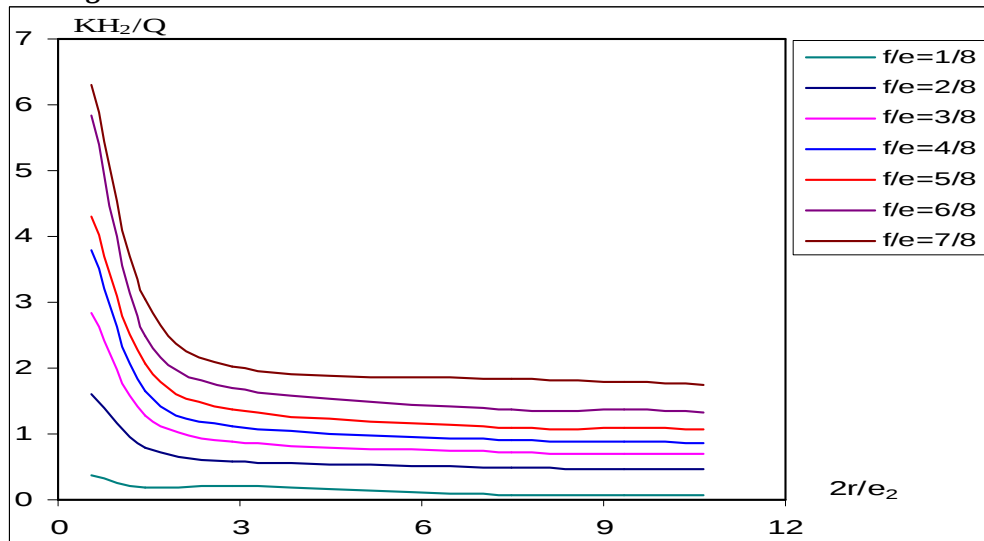


Figure IV.63 : Variation des pertes de charge en fonction de $2r/e_2 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ coté aval.

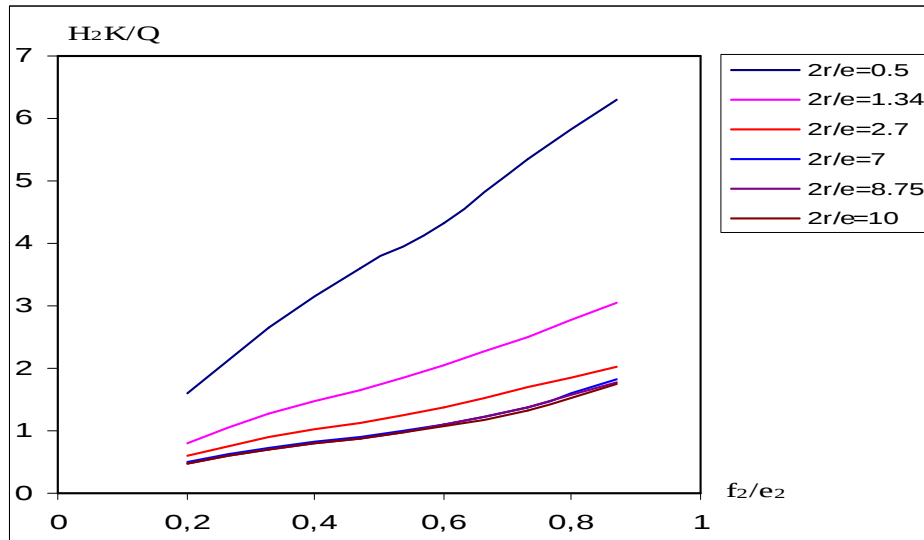


Figure IV.64 : Variation des pertes de charge en fonction de $f_2/e_2 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté aval.

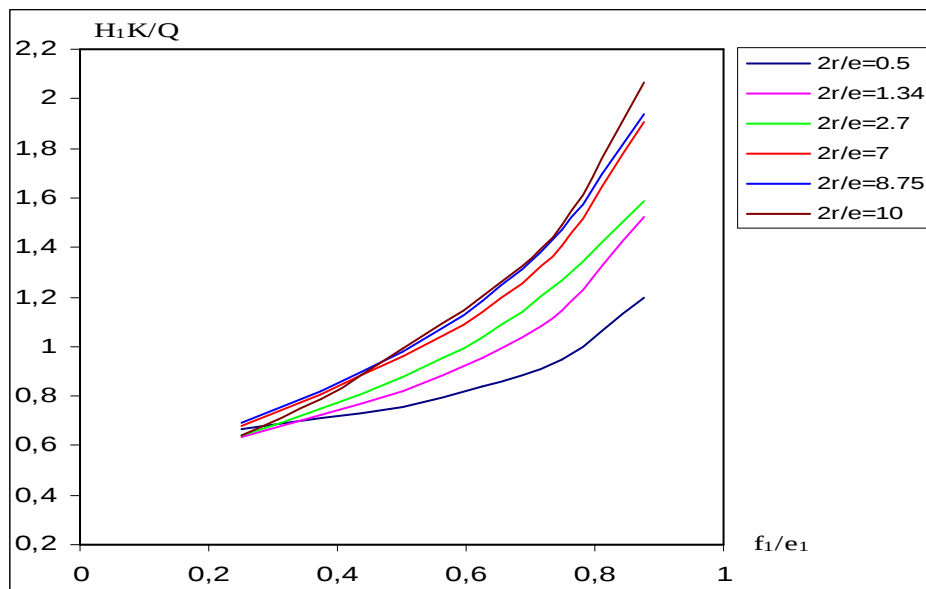


Figure IV.65 : Variation des pertes de charge en fonction de $f_1/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté amont.

IV.9.3.2 Influence de l'épaisseur de l'écran étanche

La vitesse de résolution obtenue par un modèle numérique en *axisymétrie* permet d'effectuer des études en un court laps du temps tout en obtenant des résultats similaires à ceux du calcul **3D**. Nous allons donc maintenant nous intéresser à l'influence de l'épaisseur de l'écran étanche sur les résultats du débit d'exhaure, en faisant les calculs pour deux cas de batardeaux dans le même domaine : avec épaisseur de l'écran étanche ($e' = 0.05$ m en palplanche) et ($e' = 0.5$ m en paroi moulée) dans un milieu fini pour le même domaine de variation.

Les résultats du calcul numérique sont illustrés dans les figures **IV.66** et **IV.67** donnant respectivement la variation du débit total et les pertes de charge en fonction de la largeur et de la fiche relative du batardeau.

On constate en effet, pour les largeurs $2r/e < 1.5$ une petite différence entre les deux résultats, et dès que $2r/e > 2$, l'écart augmente avec l'augmentation de la largeur et le débit pour un écran d'épaisseur 0.05 m est nettement supérieur à celui d'épaisseur 0.5 m et cela est bien confirmé sur la (**Figure IV.66**), car on voit bien que les courbes des débits avec une épaisseur de l'écran étanche =

0.05 m (les courbes sans points) sont au-dessus des courbes avec une épaisseur de 0.5 m (les courbes avec points). Cette différence peut être expliquée par la perte de charge supplémentaire provoquée par l'augmentation de l'épaisseur de l'écran étanche illustrée dans la **Figure IV.67**, qui croît avec l'augmentation de la fiche relative du batardeau (fortes fiches).

On peut noter aussi, que l'influence de l'épaisseur de l'écran sur les calculs dans ce cas est remarquable comparé au batardeau sans fouille. Par conséquent, on ne doit pas négliger l'influence de l'épaisseur de l'écran étanche dans les calculs de l'écoulement contournant ces écrans.

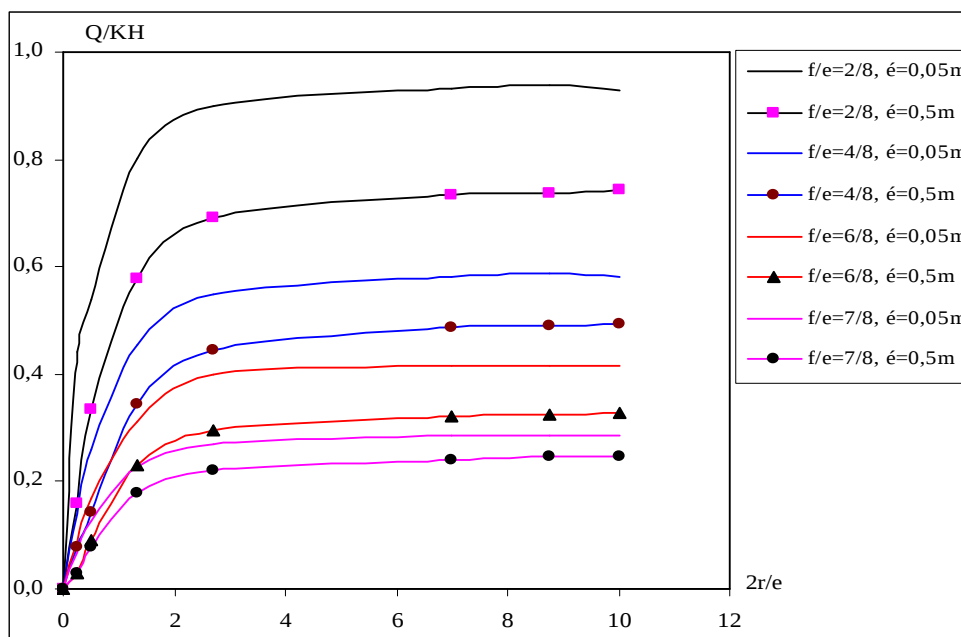


Figure IV.66 : Comparaison du débit de l'écran $e' = 0.05$ m et $e' = 0.5$ m.

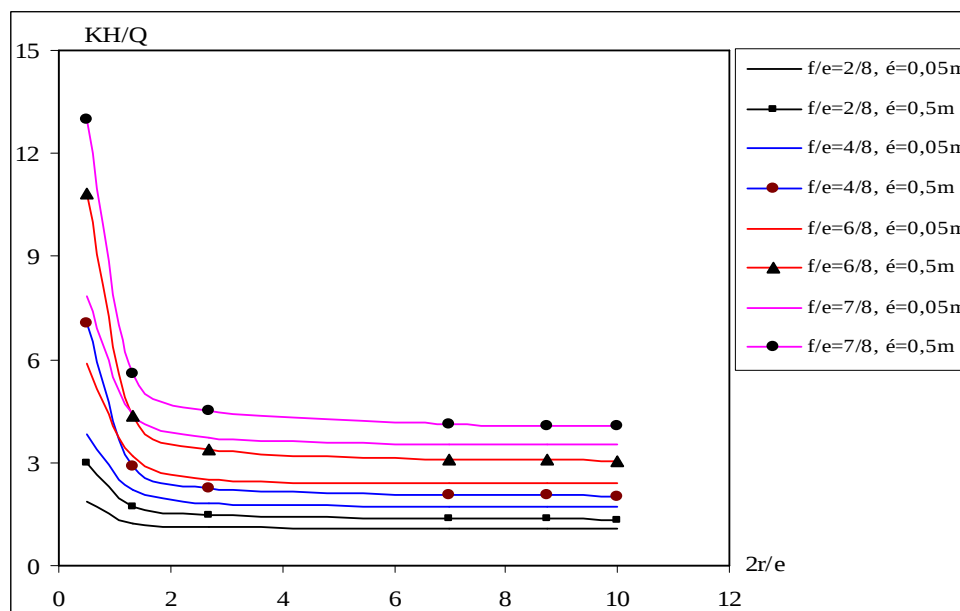


Figure IV.67 : Comparaison des pertes de charge pour l'épaisseur de l'écran $e' = 0.05$ m et $e' = 0.5$ m.

La **Figure IV.68** présente quant à elle le rapport des débits d'exhaure pour une épaisseur de l'écran étanche 0.5 m sur $Q_{\text{écran}=0.05}$ m. Elle montre que ce rapport augmente avec l'augmentation de la largeur pour $2r/e < 2.5$ ce qui représentent les fouilles étroites, et il devient constant à partir de

$2r/e = 2.7$ pour la même fiche, donc, pour les batardeaux larges l'influence de l'épaisseur de l'écran étanche est presque négligeable, car dans ce cas le rapport des deux débits reste presque constant. On note aussi, que ce rapport décroît pour les fortes fiches du batardeau, ainsi, il apparaît que plus que la fiche augmente plus que l'influence de l'épaisseur de l'écran devient importante.

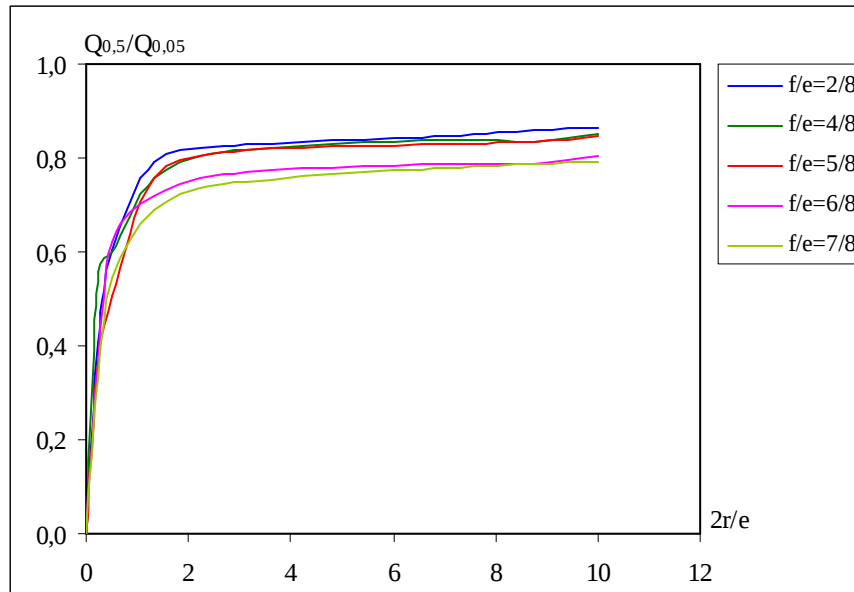


Figure IV.68 : Variation du rapport des débits $Q_{0,5}/Q_{0,05}$.

IV.10 Confrontation aux résultats existants

IV.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.

f/e	$2r/e$	Le débit unitaire - fouille carrée - d'après Flac3D	Le débit - fouille circulaire - d'après Flac2D	Q_{3D}/Q_{2D}
2/8	2.7	0,81	0,812	0,99
2/8	8.75	0,842	0,857	0,983
2/8	10	0,85	0,87	0,98
3/8	1.34	0,410	0,498	0,83
3/8	2.7	0,564	0,608	0,93
3/8	7	0,607	0,65	0,934
3/8	8.75	0,628	0,657	0,96
4/8	0.5	0,197	0,2195	0,90
4/8	1.34	0,354	0,402	0,88
4/8	7	0,53	0,535	0,99
5/8	0.5	0,17	0,19	0,89
5/8	1.34	0,28	0,332	0,85
5/8	2.7	0,41	0,413	0,99
6/8	0.5	0,145	0,147	0,98
6/8	2.7	0,333	0,337	0,97
6/8	7	0,357	0,360	0,99
7/8	0.5	0,11	0,13	0,85
7/8	1.34	0,186	0,218	0,85
7/8	2.7	0,27	0,28	0,96

Tableau IV.16 : Variation du rapport des débits en fonction de la fiche et de la largeur relative du batardeau.

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.

Ø 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 :

$$\text{Si } f < e/2 \quad \frac{H \sqrt{K_v \cdot Kh}}{Q} = \frac{\pi}{2 \ln(2 \cot g(\pi f / 4e))} \quad (\text{II.7})$$

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

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 remarque que le rapport entre les pertes de charges *tridimensionnelles* 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*.

$f/e = 1/8$

$2r/e$	r (m)	Les pertes de charge - Fouille carrée - d'après Flac3D	Les pertes de charge - Batardeau plan - d'après MANDEL	$H_{2\text{plan}} / H_{2\text{carré}}$
0.5	2	1,225879682	0,431039757	0,35161669
1.34	5.36	0,778418182	0,431039757	0,553738038
2.7	10.8	0,612	0,431039757	0,704313328
7	28	0,6636	0,431039757	0,649547554
8.75	35	0,640131579	0,431039757	0,673361182
10	40	0,631818182	0,431039757	0,682221198

$f/e = 3/8$

$2r/e$	r (m)	Les pertes de charge - Fouille carrée - d'après Flac3D	Les pertes de charge - Batardeau plan - d'après MANDEL	$H_{2\text{plan}} / H_{2\text{carré}}$
0.5	2	2,582608696	0,780847421	0,302348328
1.34	5.36	1,413090909	0,780847421	0,552581165
2.7	10.8	1,005639344	0,780847421	0,776468647
7	28	0,928941176	0,780847421	0,840577897
8.75	35	0,875	0,780847421	0,892397052
10	40	0,784313725	0,780847421	0,995580461

$f/e = 7/8$

$2r/e$	r (m)	Les pertes de charge - Fouille carrée - d'après Flac3D	Les pertes de charge Plan d'après MANDEL	$H_{2\text{plan}} / H_{2\text{carré}}$
0.5	2	5,563636364	1,876726558	0,337320133
1.34	5.36	3,2696	1,876726558	0,573992708
2.7	10.8	2,268	1,876726558	0,827480845
7	28	1,983058824	1,876726558	0,946379671
8.75	35	1,909090909	1,876726558	0,983047244
10	40	1,949206349	1,876726558	0,962815742

Tableau IV.17 : Ecart entre les deux approches au niveau des pertes de charge (coté aval).

IV.10.2 Batardeau rectangulaire avec fouille dans un milieu fini

De même que le batardeau rectangulaire sans fouille, on pense que ce cas n'a pas été traité en calcul tridimensionnel, c'est pourquoi nous allons proposer le facteur réducteur du débit en multipliant les résultats en écoulement plan par ce facteur pour trouver les résultats en *trois dimensions*.

Ø Pertes de charge dans le coté aval

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 plan et ceci même pour les fortes largeurs du batardeau, et on remarque que 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 $2r/e$.

$f/e = 1/8$

$2r/e$	Les pertes de charge – coté aval - - Fouille rectangulaire – d'après Flac3D	Les pertes de charge - Batardeau plan - d'après MANDEL	$H_{2\text{plan}} / H_{2\text{rectangle}}$
0.5	0,86	0,431039757	0,50
1.34	0,70	0,431039757	0,62
2.7	0,67	0,431039757	0,64
7	0,62	0,431039757	0,70
8.75	0,61	0,431039757	0,70
10	0,61	0,431039757	0,70

$f/e = 5/8$

$2r/e$	Les pertes de charge - coté aval- - Fouille rectangulaire - d'après Flac3D	Les pertes de charge - Batardeau plan - d'après MANDEL	$H_{2\text{plan}} / H_{2\text{rectangle}}$
0.5	2,40	1,157876708	0,48
1.34	2,02	1,157876708	0,57
2.7	1,87	1,157876708	0,62
7	1,73	1,157876708	0,67
8.75	1,70	1,157876708	0,68
10	1,70	1,157876708	0,68

$f/e = 7/8$

$2r/e$	Les pertes de charge -coté aval - - Fouille rectangulaire - d'après Flac3D	Les pertes de charge - Batardeau plan - d'après MANDEL	$H_{2\text{plan}} / H_{2\text{rectangle}}$
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
8.75	2,65	1,876726558	0,71
10	2,59	1,876726558	0,73

Tableau IV.18 : Ecart entre les deux approches au niveau des pertes de charge (coté aval).

IV.10.3 Batardeau circulaire avec fouille dans un milieu fini

1- KASTNER [1982] a proposé un abaque pour les écrans fichés dans un milieu fini (**Figure II.16**), l'erreur comparée à nos résultats est comprise entre 0.6 et 06 % (voir **Tableau IV.19**).

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 (**Relation II.7**).

3- DAVIDONKOFF et FRANKE [1965] proposent de calculer le débit comme pour le batardeau plan, puis de multiplier le résultat par un facteur réducteur égal à 0.8.

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.

Ø Le débit dans le coté aval

1. Comparaison du débit avec KASTNER

f_2/e_2	$2r/e_2$	Le débit - Fouille circulaire - D'après Flac2D	Le débit - Fouille circulaire - D'après KASTNER	Erreur *100 %
0,2	2.88	1,114969136	1.15	0,03
0.46	0.53	0,263189448	0.28	0,06
0.73	0.53	0,171113689	0.17	0,006
0.73	1.43	0,400370411	0.38	0,05
0.87	1.43	0,327261742	0.32	0,022
0.87	10.67	0,546498906	0.5	0,05

Tableau IV.19 : Ecart entre les deux approches au niveau des débits d'exhaure.

2. Comparaison avec MANDEL

Ø Pertes de charge dans le coté aval

Dans ce cas l'erreur peut atteindre 23.28 % dans le cas des grandes fouilles. Donc les pertes de charge partielles 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, Les relations de MANDEL ne sont valables qu'à partir de $2r/e > 2.7$ et elles portent un grand risque si on les applique aux batardeaux étroits, car dans ce cas l'erreur peut dépasser 50 %.

f/e	$2r/e$	Les pertes de charge - Fouille circulaire - d'après Flac2D	Les pertes de charge - Batardeau plan - d'après MANDEL	Erreur *100 %
2/8	0.5	1,609090909	0,618989314	0,615317375
2/8	1.34	0,789744681	0,618989314	0,216215912
3/8	0.5	2,841918295	0,780847421	0,725239314
3/8	1.34	1,282786517	0,780847421	0,391288098
3/8	2.7	0,894246575	0,780847421	0,126809717
4/8	0.5	3,799544419	0,950841186	0,749748633
4/8	1.34	1,660111111	0,950841186	0,427242442
4/8	2.7	1,126085343	0,950841186	0,155622447
5/8	0.5	4,313131313	1,157876708	0,73154615
5/8	1.34	2,059685393	1,157876708	0,437838074
5/8	2.7	1,382690583	1,157876708	0,1625916
6/8	0.5	5,844067797	1,428163408	0,755621691
6/8	1.34	2,497687075	1,428163408	0,42820563
6/8	2.7	1,689534247	1,428163408	0,154699935
7/8	0.5	6,290909091	1,876726558	0,701676414
7/8	1.34	3,05565812	1,876726558	0,385819197
7/8	2.7	2,016	1,876726558	0,069084049

Tableau IV.20 : Ecart entre les deux approches au niveau des pertes de charge (coté aval).

Ø Pertes de charge dans le coté amont

1. Comparaison avec l'abaque de KASTNER

Pour le coté amont, l'erreur entre nos résultats et les calculs de **KASTNER** ne dépasse pas 5.3 %.

<i>f/e</i>	<i>2r/e</i>	Les pertes de charge - Coté amont - - Fouille circulaire - D'après Flac2D	Les pertes de charge - Coté amont - D'après KASTNER	Erreur *100 %
2/8	7	0,680669456	0.68	0.00098
2/8	8.75	0,691833333	0.68	0.017
2/8	10	0,693333333	0.68	0.002
3/8	7	0,809230769	0.8	0.011
3/8	8.75	0,818695652	0.8	0.022
3/8	10	0,785185185	0.8	0.018
4/8	8.75	0,981117021	1.03	0.047
4/8	10	0,995348837	1.03	0.033
7/8	7	1,90	2.0	0.05
7/8	8.75	1,939893617	2.05	0.053
7/8	10	2,068571429	2.05	0.009

Tableau IV.21 : Ecart entre les deux approches au niveau des pertes de charge (coté amont).

2. Comparaison avec les relations de MANDEL

De même que pour le coté aval, l'erreur dans le coté amont peut atteindre 17.41 % dans le cas des grandes fouilles.

Donc les pertes de charge partielles restent toujours *inférieures* aux pertes de charge en écoulement plan même pour les batardeaux larges.

<i>f/e</i>	<i>2r/e</i>	Les pertes de charge - Coté amont - - Fouille circulaire - D'après Flac2D	Les pertes de charge - Coté amont - plan D'après MANDEL	Erreur *100 %
3/8	2.7	0,749589041	0,832200867	0,099269094
3/8	7	0,809230769	0,832200867	0,027601627
3/8	8.75	0,818695652	0,832200867	0,016228311
3/8	10	0,785185185	0,832200867	0,020206962
4/8	2.7	0,877625232	0,996772256	0,119532846
4/8	7	0,961333333	0,996772256	0,035553681
4/8	8.75	0,981117021	0,996772256	0,015705929
4/8	10	0,995348837	0,996772256	0,001428028
5/8	2.7	1,038834081	1,201632971	0,135481378
5/8	7	1,14016	1,201632971	0,05115786
5/8	8.75	1,184090909	1,201632971	0,014598519
6/8	2.7	1,269369863	1,470419393	0,136729379
6/8	7	1,408316832	1,470419393	0,042234591
7/8	2.7	1,584	1,91811691	0,174190065
7/8	7	1,904	1,91811691	0,007359775

Tableau IV.22 : Ecart entre les deux approches au niveau des débits d'exhaure.

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 une erreur inférieure à 05 % pour les batardeaux carrés.
- $2R/e = 2.5$ où $2R/2r = 5$ donc $R = 5 r$ avec une erreur inférieure à 05% pour les batardeaux rectangulaires.
- $2r/e_1$ est égal à 2.7 avec une erreur inférieure à 05 % pour les batardeaux circulaires.

IV.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.

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

La variation des débits et les pertes de charge en fonction de la fiche relative obtenue par nos diverses simulations est illustrée dans la **Figure IV.69** et **Figure IV.70**.

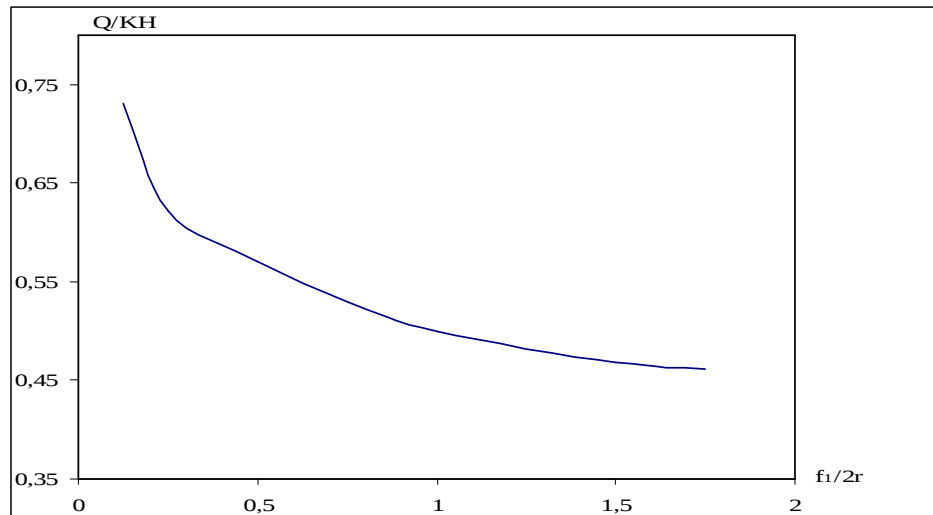


Figure IV.69 : Variation du débit total en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

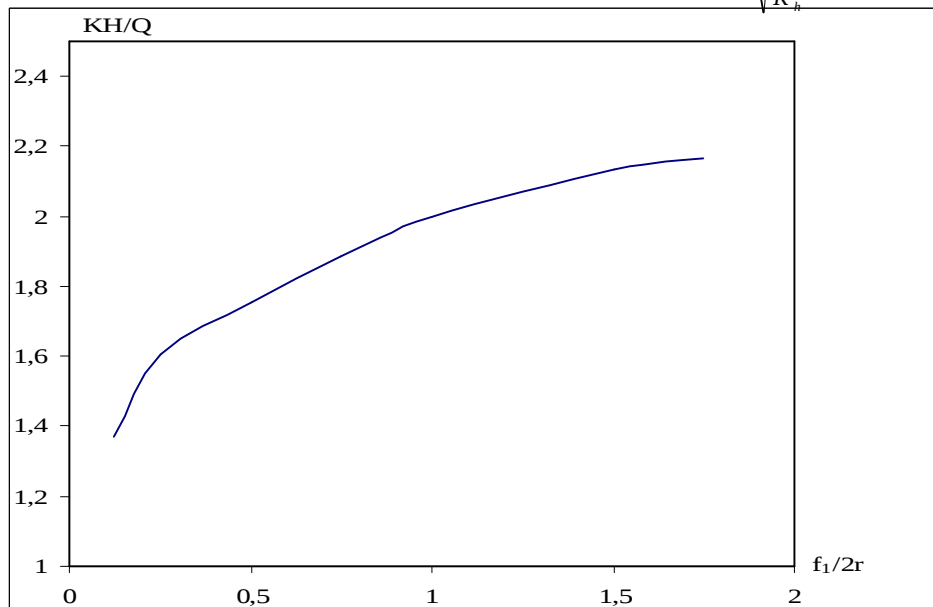


Figure IV.70 : Variation des pertes de charge totales en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

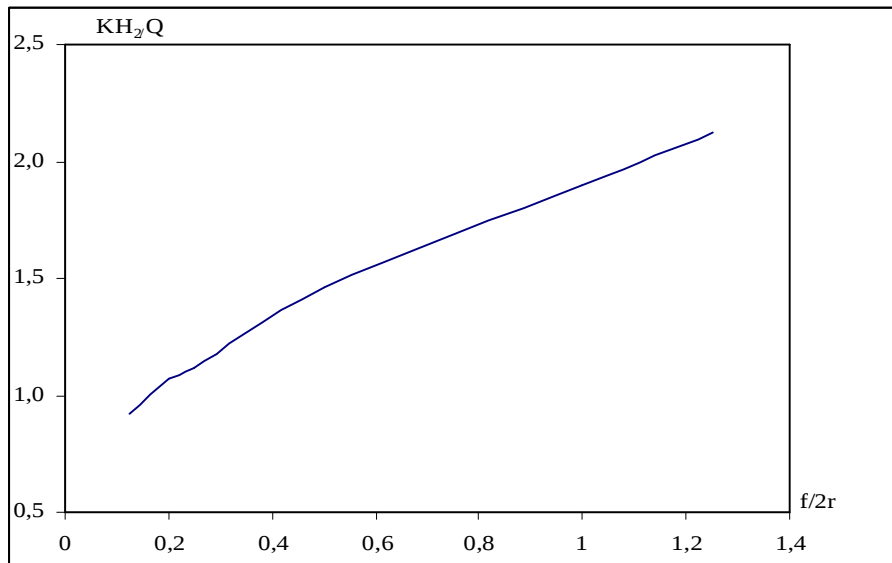


Figure IV.71 : Variation des pertes de charge en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$ coté aval.

IV.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 IV.72**.

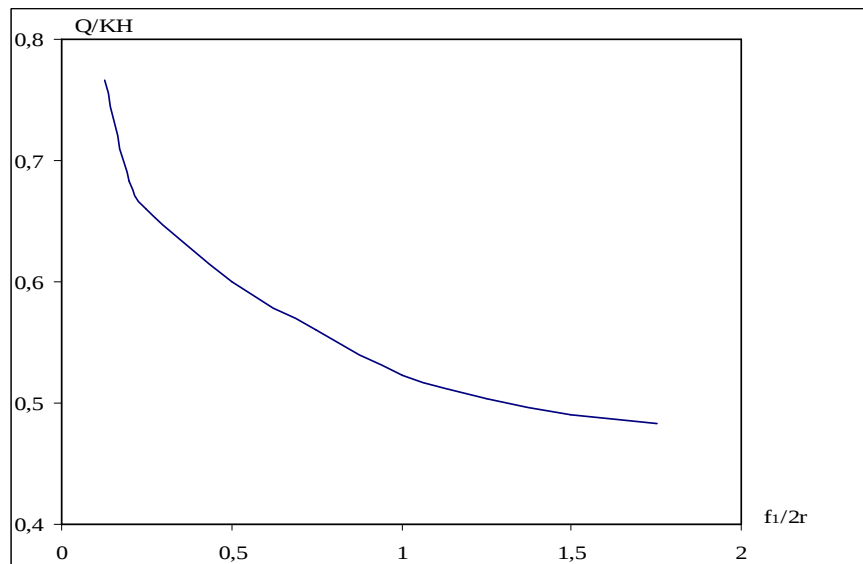


Figure IV.72 : Variation du débit total en fonction de $f_1/2r$.

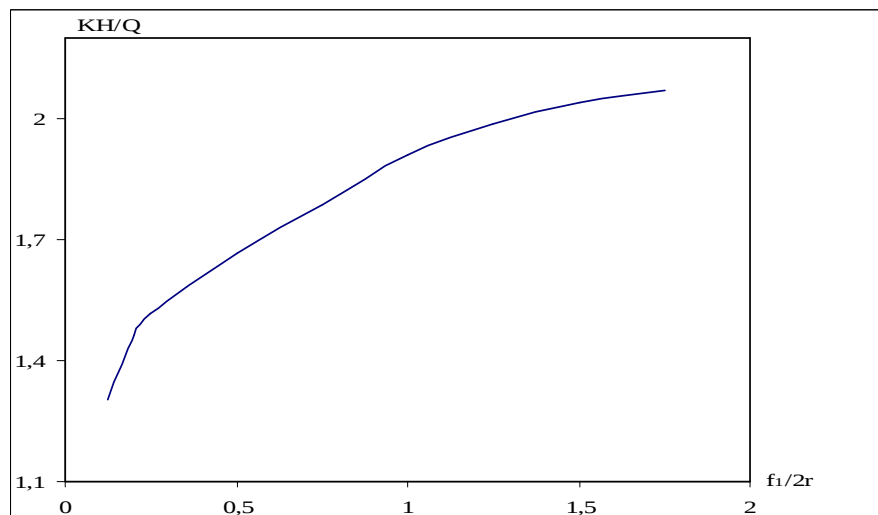


Figure IV.73 : Variation des pertes de charge totales en fonction de $f_1/2r$.

Les figures **IV.74** et **IV.75** 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.

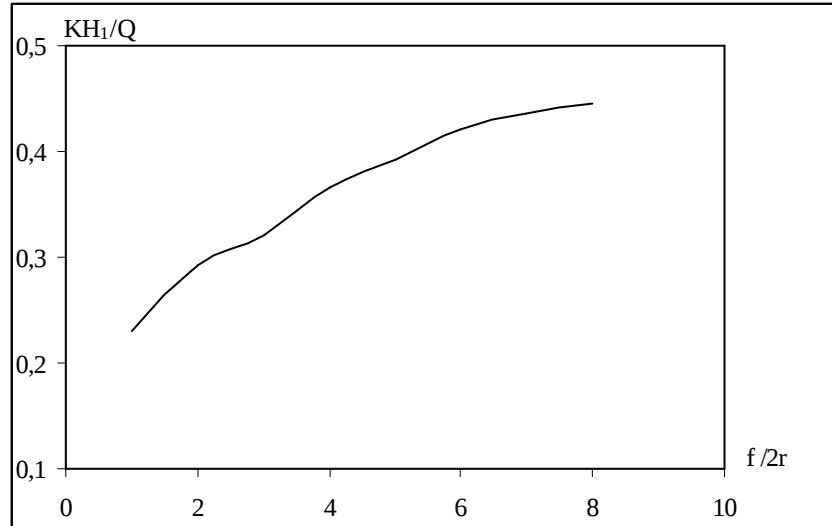


Figure IV.74 : Variation des pertes de charge en fonction de $f/2r$ dans le coté amont.

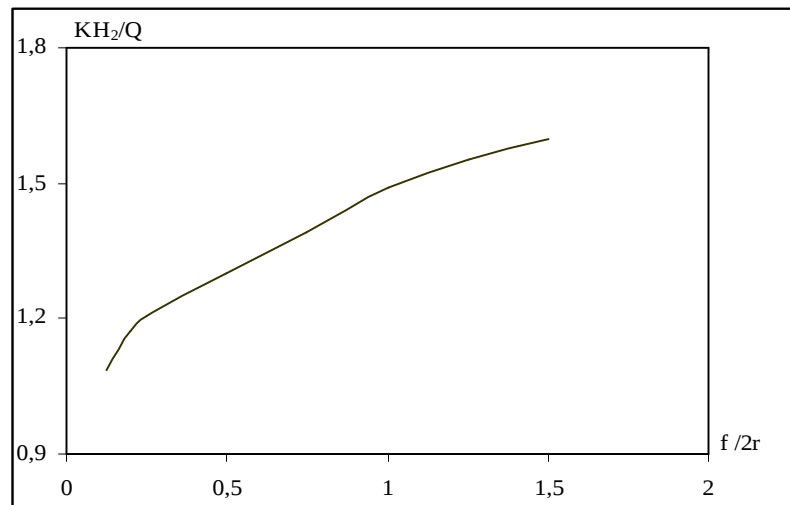


Figure IV.75 : Variation des pertes de charge en fonction de $f/2r$ dans le coté aval.

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

On présente dans la figure suivante (**Figure IV.76**) la variation du débit total en fonction de la fiche relative du batardeau $f/2r$, et dans la **Figure IV.77**, la variation de la perte de charge totale en fonction de la fiche relative du batardeau $f/2r$.

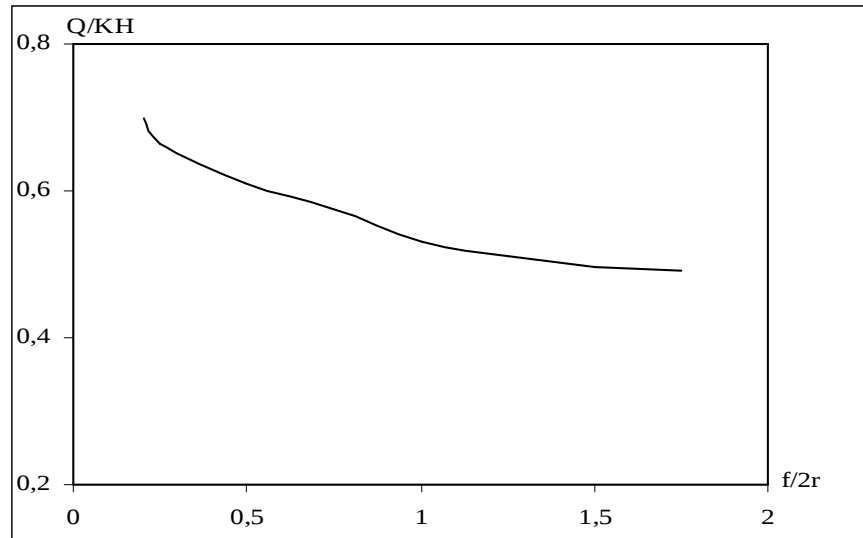


Figure IV.76 : Variation du débit total en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

Par contre, les valeurs des pertes de charge totales augmentent avec l'augmentation des valeurs de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$, et dès que $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}} = 1.5$ les pertes de charge devient constantes quelques soient $f/2r$ (**Figure IV.76**).

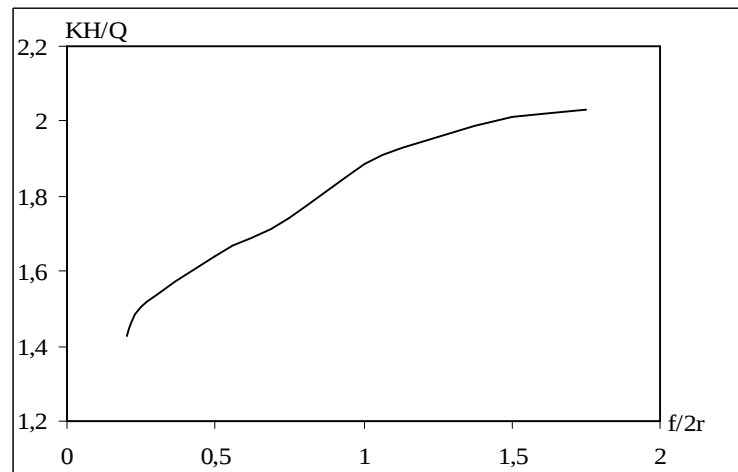


Figure IV.77 : Variation des pertes de charge totales en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

Les figures **IV.78** et **IV.79** représentent respectivement la variation des pertes de charge en fonction de la fiche relative du batardeau $f/2r$, dans le coté amont et aval.

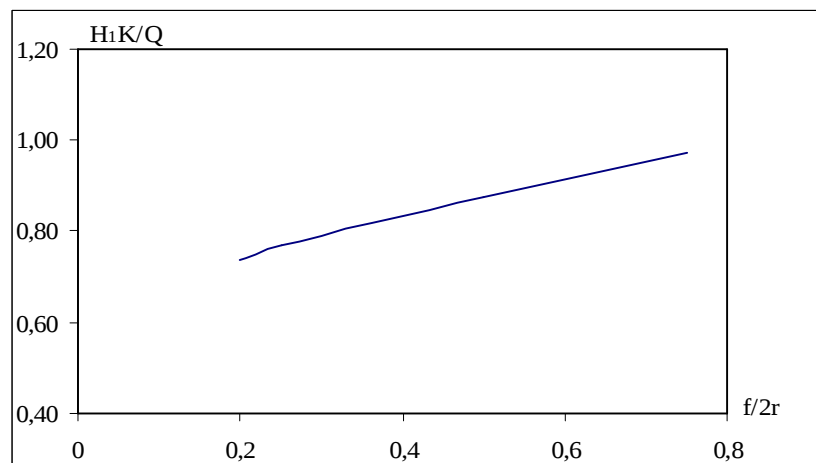


Figure IV.78 : Variation des pertes de charge en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$ dans le coté amont.

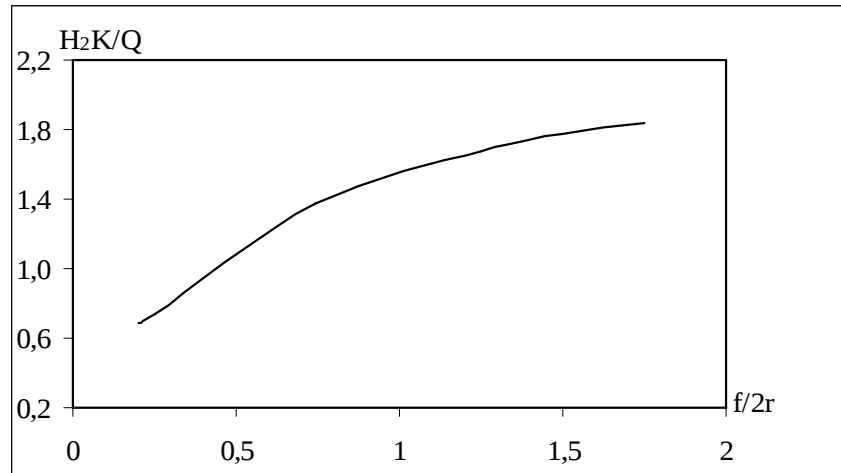


Figure IV.79 : Variation des pertes de charge en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$ dans le coté aval.

IV.12 Confrontations aux résultats existants

CARDINAL et CASENOV, pour les batardeaux plans dans un milieu semi-infini proposent un abaque donnant la variation des pertes de charge en fonction de la fiche relative du batardeau (**Figure IV.81** ou **Figure IV.83**).

Nous avons représenté sur les figures (**IV.80**, **IV.82**, **IV.84**) et figures (**IV.81**, **IV.83**) respectivement la variation du débit Q/KH et les pertes de charge KH/Q en fonction de la fiche relative $f/2r$ du batardeau calculé par trois différentes méthodes.

IV.12.1 Batardeau carré avec fouille - Milieu semi-infini

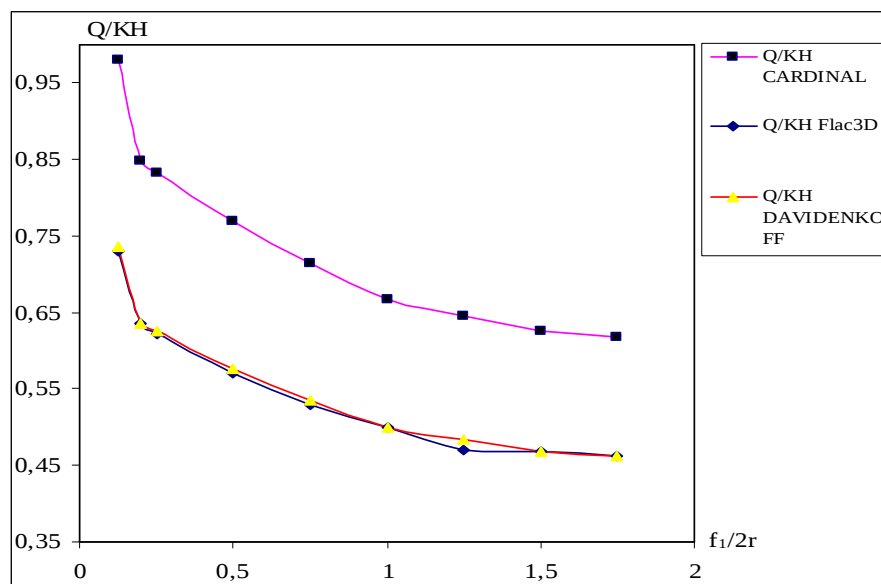


Figure IV.80 : Comparaison du débit total en fonction de $f_1/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

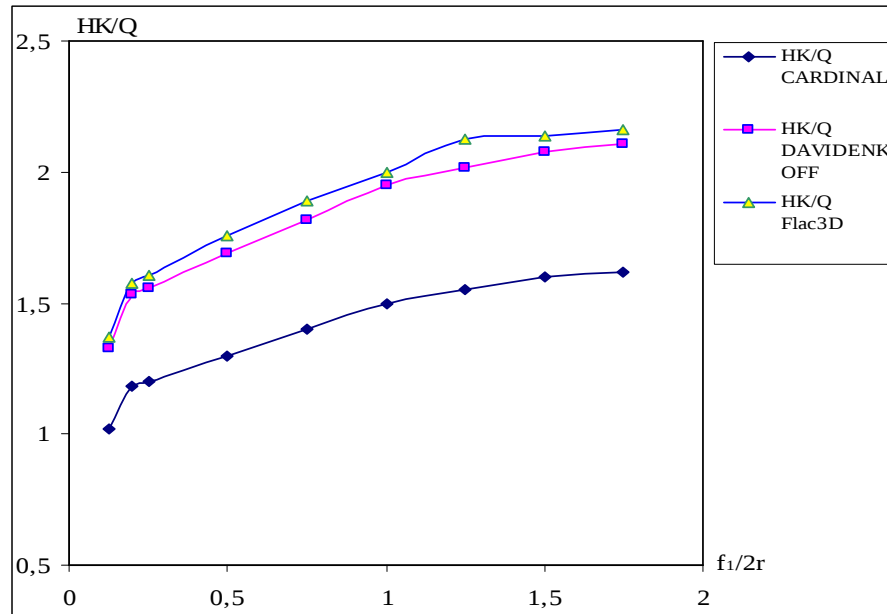


Figure IV.81 : Comparaison des pertes de charge totales en fonction de $f_1/2r \frac{K_v}{\sqrt{K_h}}$.

La **Figure IV.80**, montre que les points numériques sont dans la globalité sur la courbe théorique donnée par DAVIDENKOFF, en allant vers les grandes valeurs de $f/2r$, les points numériques s'éloignent de cette dernière.

Les calculs ainsi faits montrent que l'écart maximal entre les valeurs du débit obtenues par des simulations numériques tridimensionnelles et ceux obtenues par réduction du débit en écoulement plan avec un facteur égal à 0.75 est de l'ordre de 3,70 %.

La **Figure IV.81** quant à elle montre que les points numériques se coïncident avec la courbe théorique de DAVIDENKOFF pour les faibles valeurs de $f/2r$ et plus que cette dernière augmente, plus que les points numériques s'éloignent des courbes théoriques. Enfin, il est clair que les courbes théoriques de CARDINAL sont très éloignées par rapport aux deux autres courbes, ce qui montre que la perte de charge augmente avec un facteur de 1.3 à une erreur qui ne dépasse pas 3.7 %.

Les tableaux **IV.23** et **IV.24** représentent respectivement la comparaison des résultats de la perte de charge et du débit, ainsi que l'erreur commise.

$f/2r$	Les pertes de charge totales - Fouille carrée - d'après Flac3D	Les pertes de charge totales plan d'après CARDINAL et CASENOV	Les pertes de charge totales d'après DAVIDONKOFF et FRANKE $(HK/Q)_{\text{plan}} * 1.3$	Erreur *100 %
0.125	1,369863014	1,02	1,326	0,032
0.2	1,57480315	1,18	1,534	0,026
0.25	1,606425703	1,2	1,560	0,029
0.5	1,754385965	1,3	1,690	0,037
0.75	1,886792453	1,4	1,820	0,035
1	2	1,5	1,950	0,025
1.5	2,134471718	1,6	2,080	0,026
1.75	2,164502165	1,62	2,106	0,027

Tableau IV.23 : Comparaison des pertes de charge totales avec DAVIDONKOFF et FRANKE.

$f/2r$	Le débit total - Fouille carrée - d'après Flac3D	Le débit total plan d'après CARDINAL et CASENOV	Le débit total d'après DAVIDONKOFF et FRANKE $Q/KH * 0.75$	Erreur *100 %
0.125	0,73	0,980	0,735	0,007
0.2	0,635	0,847	0,636	0,001
0.25	0,623	0,833	0,625	0,004
0.5	0,570	0,769	0,577	0,012
0.75	0,530	0,714	0,536	0,011
1	0,500	0,667	0,500	0,000
1.25	0,470	0,645	0,484	0,029
1.5	0,469	0,625	0,469	0,001
1.75	0,462	0,617	0,463	0,002

Tableau IV.24 : Comparaison du débit total avec DAVIDONKOFF et FRANKE.

IV.12.2 Batardeau rectangulaire avec fouille dans un milieu semi-infini

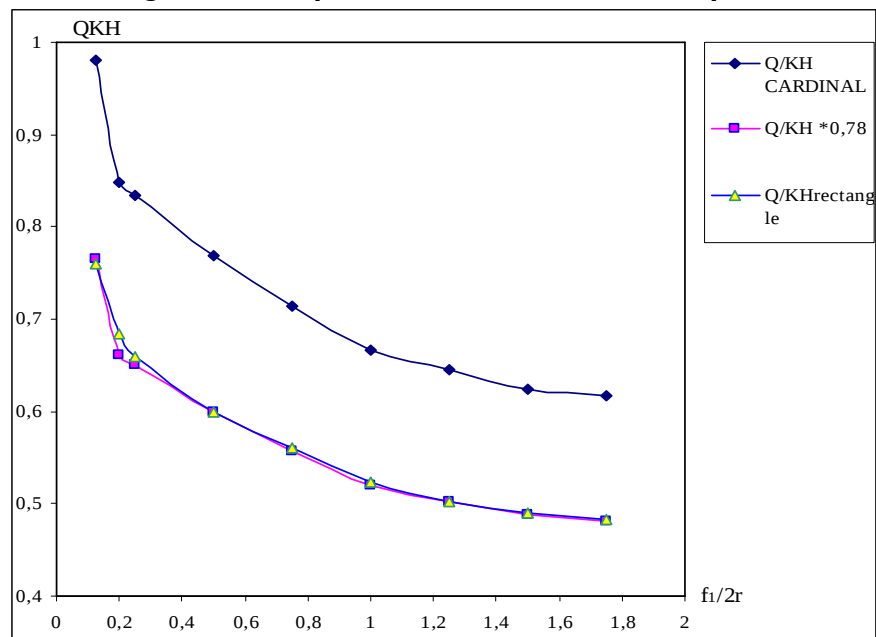


Figure IV.82 : Comparaison du débit total en fonction de $f_1/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

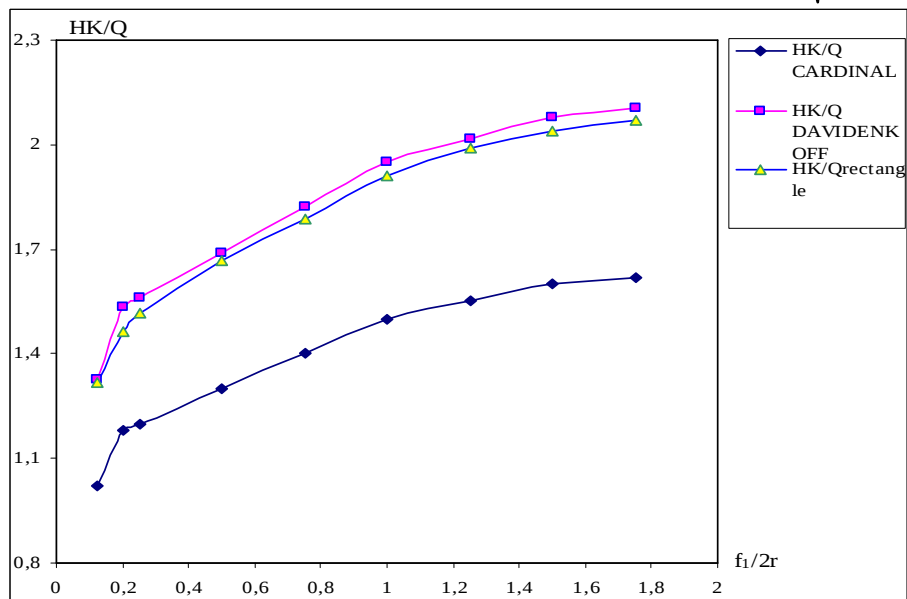


Figure IV.83 : Comparaison des pertes de charge totales en fonction de $f_1/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

Ø Dans ce cas, l'écart maximal entre les valeurs du débit obtenues par des simulations numériques tridimensionnelles et ceux obtenues par réduction du débit en écoulement plan avec un facteur égal à 0.78 est de l'ordre de 3,30 %.

Ø La perte de charge augmente avec un facteur de 1.3 avec une erreur qui ne dépasse pas 4.6 %.

Les tableaux IV.25 et IV.26 donnent respectivement la comparaison des résultats de la perte de charge total KH/Q et du débit total Q/KH , ainsi que l'erreur commise.

$f/2r$	Les pertes de charge - Fouille rectangulaire - d'après Flac3D	Les pertes de charge plan d'après CARDINAL et CASENOV	Les pertes de charge d'après DAVIDENKOFF et FRANKE $(HK/Q)_{\text{plan}} * 1.3$	Erreur *100 %
0.125	1,32	1,02	1,326	0,008
0.25	1,52	1,2	1,560	0,038
0.5	1,67	1,3	1,690	0,025
0.75	1,79	1,4	1,820	0,011
1	1,91	1,5	1,950	0,026
1.25	1,99	1,55	2,015	0,007
1.5	2,04	1,6	2,080	0,019

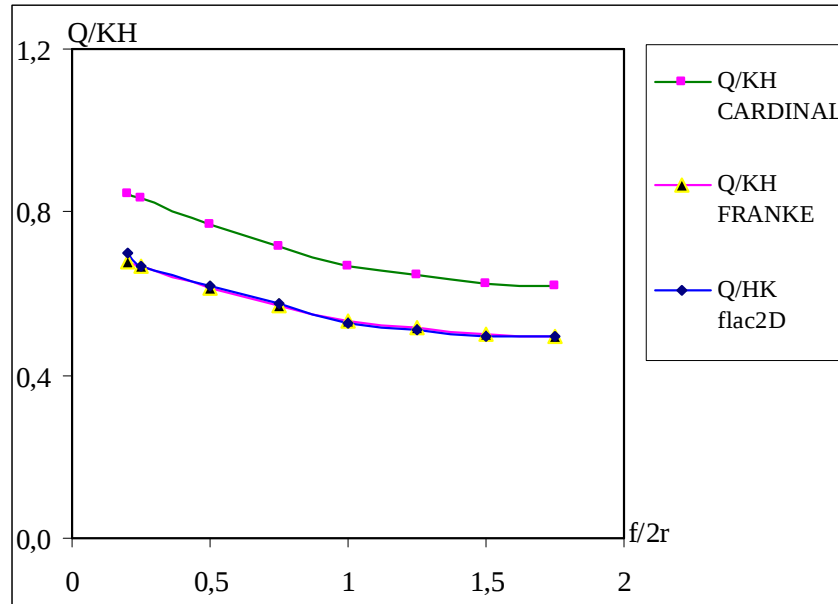
Tableau IV.25 : Comparaison des pertes de charge totales avec DAVIDENKOFF et FRANKE.

$f/2r$	Le débit total - fouille rectangulaire - d'après Flac3D	Le débit total plan d'après CARDINAL et CASENOV	Le facteur de réduction du débit $Q/KH * 0.78$	Erreur *100 %
0.125	0,76	0,980	0,765	0,006
0.25	0,66	0,833	0,650	0,025
0.5	0,60	0,769	0,600	0,011
0.75	0,56	0,714	0,557	0,003
1	0,52	0,667	0,520	0,013
1.25	0,50	0,645	0,503	0,006
1.5	0,49	0,625	0,488	0,005

Tableau IV.26 : Comparaison du débit total avec DAVIDENKOFF et FRANKE.

IV.12.3 Batardeau circulaire avec fouille dans un milieu semi-infini

Dans ce cas, les calculs ainsi faits montrent que l'écart maximal entre les valeurs du débit obtenues par des simulations numériques tridimensionnelles et ceux obtenues par réduction du débit en écoulement plan avec un facteur égal à 0.8 est de l'ordre de 3.1 % (voir les tableaux IV.27 et IV.28).

Figure IV.84 : Comparaison du débit total en fonction de $f/2r$.

$f/2r$	Les pertes de charge totales - Fouille circulaire - d'après Flac2D	Les pertes de charge totales plan d'après CARDINAL et CASENOV	Les pertes de charge totales d'après DAVIDONKOFF et FRANKE $(HK/Q_{plan}) * 1.2$	Erreur *100 %
0.2	1,429	1,18	1,416	0,009
0.25	1,504	1,2	1,440	0,042
0.5	1,613	1,3	1,560	0,033
0.75	1,739	1,4	1,680	0,034
1	1,887	1,5	1,800	0,046
1.25	1,961	1,55	1,860	0,051
1.5	2,010	1,6	1,920	0,045
1.75	2,030	1,62	1,944	0,043

Tableau IV.27 : Comparaison des pertes de charge totales avec DAVIDENKOFF et FRANKE.

$f/2r$	Le débit total - Fouille circulaire - d'après Flac2D	Le débit total plan d'après CARDINAL et CASENOV	Le débit total d'après DAVIDONKOFF et FRANKE $(Q_{plan}/KH) * 0.8$	Erreur *100 %
0.2	0,700	0,847	0,678	0,031
0.25	0,665	0,833	0,667	0,003
0.5	0,620	0,769	0,615	0,007
0.75	0,575	0,714	0,571	0,006
1	0,530	0,667	0,533	0,006
1.25	0,510	0,645	0,516	0,012
1.5	0,498	0,625	0,500	0,005
1.75	0,493	0,617	0,494	0,003

Tableau IV.28 : Comparaison du débit total avec DAVIDENKOFF et FRANKE.

IV.13 Conclusion

Le calcul numérique présenté dans ce mémoire modélise le cas d'un batardeau avec une enceinte de forme *carrée*, *rectangulaire* et *circulaire*. On s'est intéressé au régime hydraulique stationnaire (régime permanent) à long terme avant et après le creusement (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 *tridimensionnelle* et *axisymétrique* de l'écoulement contournant des écrans étanches.

Nous avons enfin 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 boullance 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 proches des valeurs réelles (mesurées). 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 ignorait 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 certain effet tridimensionnel 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.

Ø Nous avons pu ainsi étudier à l'aide d'un modèle tridimensionnel l'effet de la *troisième dimension* pour le cas d'un batardeau **rectangulaire**, problème qui n'avait été abordé à notre connaissance jusqu'ici qu'en deux dimensions.

Ø 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.

Ø Avec des temps de calcul fortement réduits, le modèle **axisymétrique** apparaît comme une alternative au calcul **tridimensionnel** simulant les écoulements autour des batardeaux **circulaires**.

Ø 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 du temps tout en obtenant des résultats similaires à ceux du calcul en **3D**.

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.

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.

Enfin, on note en effet, qu'en raison des temps de calcul extrêmement importants, il n'a pas été possible d'étudier le cas de l'alimentation latérale. Il a donc été décidé d'attendre, dans tous les cas, la stabilisation de l'écoulement avant de procéder à la poursuite des calculs.