

Université Mohamed Kheider – Biskra
Faculté des Sciences & des Sciences de l'Ingénieur

Département d'Hydraulique



Laboratoire LRGCB

MEMOIRE DE MAGISTER EN HYDRAULIQUE

Option : **Sciences Hydrauliques**

Présenté par :

Farid BOUCHELGHOU

Ingénieur d'Etat en Hydraulique

THEME

**CALCUL NUMERIQUE TRIDIMENSIONNEL DU DEBIT
D'EXHAURE DES BATARDEAUX CARRÉ ET CIRCULAIRE**

Soutenu le :...../...../ 2006

Devant le jury :

Président	:	L. BELOUNAR	Maître de conférences	Université de Biskra
Rapporteur	:	N. BENMEBAREK	Maître de conférences	Université de Biskra
Examineur	:	A. BELOUAR	Maître de conférences	Université de Constantine
Examineur	:	A. OUAMANE	Maître de conférences	Université de Biskra

INTRODUCTION GENERALE

La présence de l'eau dans le sol représente un facteur de gêne ou d'intérêt selon les préoccupations de l'ingénieur. Dans certains cas, le problème porte sur l'exploitation de la ressource par des prélèvements d'eau souterraine ; et dans d'autres il peut s'agir d'épuiser une fouille avant les travaux souterrains. Après avoir introduit les lois et équations qui gouvernent les écoulements en milieux poreux, on s'attache à résoudre par des méthodes numériques, quelques problèmes courants en hydraulique souterraine. Ainsi la distribution des pressions interstitielles dans un sol, l'évaluation de l'influence d'excavation, et le calcul du débit d'exhaure à travers un ouvrage géotechnique sont abordés.

Lorsque l'excavation pénètre dans la nappe, il peut être intéressant de combiner les fonctions des écrans de soutènement et d'étanchéité, cette solution étant presque obligatoire en cas d'horizon très perméable. La mise hors d'eau de la fouille, bien que provisoire, pèse alors lourdement sur l'économie du projet. Elle peut être de plus à l'origine d'incidents tels que le renard. Généralement localisé, il n'entraîne que très exceptionnellement la ruine de l'ouvrage mais occasionne fréquemment des désordres aux ouvrages voisins et des retards importants dans l'exécution des terrassements.

Ces problèmes d'écoulements peuvent être résolus au moyen de diverses méthodes analogiques ou numériques, mais leur mise en œuvre trop lourde limite leur emploi aux projets exceptionnels.

La résolution des problèmes d'écoulement souterrains réels décrits par la loi de Darcy est le plus souvent impossible analytiquement. On peut obtenir des solutions approchées soit à l'aide de méthodes analogiques telles que la cuve rhéométrique et l'analogie sur papier conducteur, soit au moyen de méthodes numériques telles que les différences finies et les éléments finis.

Pour toutes nos simulations de l'écoulement contournant les écrans étanches, nous avons adopté la méthode des différences finies explicite implantée dans le code **Flac**.

Fréquemment, les configurations réelles sont telles (enceinte ramassée) que le problème ne peut être considéré comme plan. L'écoulement vers la fouille n'est plus alors à filets parallèles mais convergents, ce qui introduit une perte de charge supplémentaire (KASTNER [1982]).

L'hypothèse de l'écran carré, rectangulaire et circulaire constitue donc une approche commode de ces écoulements tridimensionnels en notant que la symétrie de révolution permettant d'en faire l'étude dans le plan pour le dernier cas. Les résultats pratiques concernant ces problèmes sont cependant assez peu nombreux. En outre, les résultats des diverses études faites étant trop fragmentaires, nous allons réaliser nos expérimentations numériques qui permettent de simuler ces écoulements tridimensionnels avec précision. Les modèles conçus à l'aide du code Flac3D et

Flac2D (en axisymétrie) nous permettent d'étudier les batardeaux carrés, rectangulaires et circulaires dans différents types de milieu.

Face au problème de la mise hors d'eau d'une fouille, l'ingénieur se trouve confronté à un triple problème :

Evaluer correctement les perméabilités des différentes couches du sol concernées à l'échelle des travaux envisagés.

Calculer les débits d'exhaure en remplaçant le domaine réel, hétérogène et avec des conditions aux limites complexes par une représentation schématique accessible au calcul.

Estimer l'incertitude dont est entaché le résultat. Ce dernier point est important pour les problèmes d'écoulement dans la mesure où la marge d'incertitude y est généralement assez large, pouvant dépasser 100 % et mettre en cause la solution retenue.

Le risque, négligeable lorsque le débit ainsi évalué est de l'ordre de quelques dizaines de m^3/h , peut devenir inacceptable lorsqu'il atteint 1000 à 2000 m^3/h .

Si la méthode de calcul est précise, la marge d'incertitude dépendra essentiellement de l'évaluation des perméabilités et de la pertinence de la schématisation du domaine réel et des conditions aux limites.

C'est dans ce contexte que nous nous sommes fixés pour objectif l'élaboration d'un « Outil » de calcul précis du débit d'exhaure et des pertes de charge pour des cas *tridimensionnels* bien proches de la réalité. Cet outil, composé d'abaques, doit rester de mise en oeuvre très simple afin de permettre au praticien de tester rapidement ses diverses hypothèses sur les perméabilités, les conditions aux limites et schématisations du domaine d'écoulement. L'ensemble des résultats ainsi obtenus lui permettra de mieux apprécier l'incertitude touchant son estimation du débit.

L'ingénieur dispose déjà de quelques abaques et relations analytiques en écoulement *plan* qui fournissent des solutions partielles et plus au moins précises à ce problème, mais ces relations présentent, pour la plupart, l'inconvénient d'avoir un domaine d'application défini de manière très vague en surestimant le débit et sous-estimant les pertes de charge. Ainsi telle relation est-elle censée s'appliquer au cas des fouilles étroites, sans autre précision.

Les simulations numériques réalisées, nous ont permis de proposer des abaques et des méthodes de calcul approchées couvrant un éventail de cas rencontrés en pratique plus large que celui disponible en littérature.

En comparant nos résultats avec ceux de littérature, on a mis en évidence et cerné les limitations de chaque méthode et l'erreur maximale pouvant entacher le débit ainsi calculé.

Ce document, synthétisant notre étude est scindé en cinq chapitres, la présente introduction et une conclusion générale.

- Le **premier chapitre** est consacré aux généralités sur les écoulements souterrains et les différentes méthodes de résolutions des problèmes liés aux écoulements à travers un milieu poreux.
- L'étude bibliographique des écoulements contournant les écrans étanches et les différentes méthodes de calcul de ces écoulements fait l'objet du **chapitre II**.
- Le **chapitre III**, quant à lui, il est consacré à la présentation de l'outil numérique utilisé dans notre étude et les lois de comportement adoptées dans notre modèle.
- Dans le **chapitre IV**, nous allons enfin implanter tous ces modèles dans le code de calcul aux différences finies **Flac3D** et **Flac2D**. La démarche consiste de déterminer les caractéristiques hydrauliques : débit d'exhaure, pressions interstitielles et les pertes de charge. L'étude de l'effet tridimensionnel sur les différents calculs obtenus, les résultats, les graphes et les discussions de ces derniers font aussi l'objet de ce chapitre.
- L'étude numérique tridimensionnelle du phénomène de renard en faisant évaluer le gradient adimensionnel et les facteurs de sécurité contre la boullance et le soulèvement sera la tache du **chapitre V**.

Enfin, les conclusions générales de cette étude sont dégagées, des perspectives et des recommandations proposées.

CHAPITRE I

ÉCOULEMENT DE L'EAU A TRAVERS UN MILIEU POREUX

I.1 Introduction

L'étude des écoulements dans les massifs de sol fait partie d'un domaine de recherche très vaste, constitué par l'étude des mouvements des fluides dans les milieux poreux.

Dans le cas d'une application à la mécanique des sols et des roches, le milieu poreux étudié est un massif de sol naturel (diffusion de polluants, infiltration, écoulement et rabattement de nappe, etc.).

L'étude des mouvements d'eau dans les milieux poreux est donc un problème important pour le géotechnicien et l'hydraulicien, car ces mouvements peuvent modifier au cours du temps la distribution des pressions interstitielles exercées dans les massifs de sol, tant de point de vue mécanique (modification du poids des massifs et soulèvement hydrostatique dus aux remontées ou descentes de la surface libre de la nappe) que de point de vue hydraulique (évolution des forces hydrauliques). La détermination du champ de pressions interstitielles dans les massifs au cours du temps, ainsi la détermination du réseau d'écoulement (lignes équipotentiellles et lignes de courant) et par conséquent le débit d'exhaure, est donc une donnée dont il faut tenir compte dans le calcul.

Le mouvement de l'eau à travers ces milieux poreux est régi par une équation différentielle de second ordre (équation de Laplace), dont la résolution analytique est une tâche rarement possible. Les équations aux dérivées partielles de la physique ne permettent d'obtenir des solutions exactes que dans quelques cas particuliers, c'est pourquoi des méthodes de calculs numériques ont été développées.

Dans le but d'aboutir à l'étude de l'écoulement à travers un milieu poreux, et en particulier les écoulements autour des écrans étanches, il convient tout d'abord de présenter les différents paramètres caractérisant ces milieux. C'est pourquoi nous rappellerons ici brièvement les lois et relations qui décrivent les écoulements permanents de l'eau dans le sol saturé.

I.2 Généralités sur les milieux poreux

A côté de la mécanique des milieux continus et lui empruntant de larges extraits, la mécanique des sols tire son originalité de l'aspect granulaire de ses constituants. Le sol est un matériau discontinu à l'échelle microscopique mais le nombre de ses constituants est tel que le concept de continuité peut le plus souvent être conservé : pour donner un ordre de grandeur, un dé à coudre rempli de sable fin contient environ un million de grains. A la structure granulaire du sol est associée une porosité qui correspond au volume libre entre les grains. Ce volume est rempli d'un fluide, liquide ou gaz, eau ou air. A la déformation du squelette est donc liée l'apparition de pression dans le fluide et des mouvements hydrodynamiques se présentent.

Le problème de l'identification des sols consiste à caractériser les matériaux d'une façon suffisamment nette pour qu'on puisse comparer des matériaux différents sur lesquels des constructions analogues ont été placées ou encore pour comparer les états différents d'un même matériau. En dehors de l'identification immédiate (couleur, odeur, état), il existe une série d'essais de laboratoire qui permet d'y parvenir avec précision (HABIB. P [1997]).

I.2.1 Définition et morphologie des pores

Un milieu poreux est un milieu constitué de granulométrie varié où les pores interstitiels et les fissures sont interconnectés entre eux.

Les pores sont des vides plus au moins sphériques, de petites dimensions (ordre de grandeur millimétrique), ménagés entre les particules solides ou grains qui ne sont jamais jointifs. Les dimensions des vides sont étroitement liées à celles des grains dont la mesure est plus directement accessible (Castany [1982]).

La catégorie des terrains poreux comprend en premier lieu toutes les alluvions fluviales ou glacières les masses d'éboulis et tous les remblais artificiels. On peut également y rattacher les formations gréseuses et conglomérats perméables.

Ces terrains sont formés de grains cimentés ou non entre eux. Ils sont parcourus par un réseau très dense de canaux interstitiels.

On représente un milieu poreux sous forme d'un corps solide avec à l'intérieur de très petites cavités appelées *pores*.

Lorsque le volume des pores ne bouge pas, le milieu poreux est considéré comme *indéformable*. Le mouvement d'un fluide dans le milieu poreux est considérablement différent du mouvement du fluide dans les conduites fermées ; les parois rugueuses opposent une très grande résistance au déplacement du fluide. C'est ce qui explique la très faible vitesse de déplacement du fluide dans le milieu poreux par rapport à la vitesse de déplacement dans les conduites. La forme irrégulière des canicules leurs dimensions variées rendent impossible l'étude du mouvement des particules du fluide dans tous ses passages. C'est pourquoi on utilise les modèles du milieu poreux pour l'étude du mouvement des fluides (V. Metreveli).

I.2.2 Interconnexions des pores et milieu continu

Les pores communiquent entre eux, dans le sens de l'écoulement de l'eau souterraine, permettant le déplacement des particules d'eau. Celles-ci suivent des trajets ou trajectoires plus ou moins compliqués, identifiant les lignes du courant. Cet agencement caractérise la continuité du milieu poreux qui est une des conditions de base pour la validité des lois de l'hydrodynamique souterraine.

I.2.3 Etude granulométrique du milieu poreux

On définit la granulométrie comme étant l'ensemble des techniques de laboratoire, permettant de déterminer les caractéristiques physiques, pétrographiques et géométriques d'un milieu. Un milieu poreux est constitué d'un assemblage de particules solides ou grains. Leurs caractéristiques géométriques sont : le diamètre et la surface (Castany [1982]).

L'analyse granulométrique a pour but :

- La mesure des diamètres des grains par des diamètres granulométriques.
- Accéder aux caractéristiques des vides par celles des grains.
- Classer quantitativement les roches meubles.
- Calculer les paramètres granulométriques.

Les particules d'eau en écoulement dans un milieu poreux tel qu'un terrain granuleux naturel suivent des trajectoires tortueuses, elles sont déterminées par la grosseur, la forme et l'arrangement des grains minéraux qui doivent être considérées comme des grandeurs aléatoires .

L'analyse granulométrique d'un sol permet de définir une courbe granulométrique qui a deux caractéristiques : sa position dans le diagramme et sa pente.

I.2.4 Caractéristiques physiques du milieu perméable

Les notions d'homogénéité, d'isotropie et d'anisotropie

La notion *d'homogénéité* correspond à une hypothèse indispensable, sans laquelle aucune théorie de l'écoulement souterrain ne serait possible.

Il y' a de nombreuses nuances en ce qui concerne l'homogénéité des terrains naturels. Certains sols, comme les sables fins, ont une excellente homogénéité, même à petite échelle alors que pour la plupart des alluvions fluviales, par exemple, l'homogénéité n'existe souvent qu'à partir d'une certaine échelle à cause de l'irrégularité des dépôts et de la gamme étendue des différents éléments (limons, sable, graviers et galets).

L'écoulement théorique étant tributaire de l'hypothèse d'homogénéité, et on conçoit aisément que tout ses détails dont l'échelle est plus fine que l'échelle d'homogénéité n'ont pas de significations réelles.

Dire d'un terrain perméable qu'il est homogène équivaut à dire qu'il présente en tout point, dans une direction donnée, la même résistance à un écoulement de filtration. Si de plus, cette résistance est la même quelle que soit la direction, le terrain est **isotrope**.

Dans le cas contraire, il est anisotrope. Dans son comportement par rapport à l'écoulement souterrain, un terrain a donc des propriétés géométriques qui se traduisent par les notions d'**isotropie** et d'**anisotropie** (Meteveli. V).

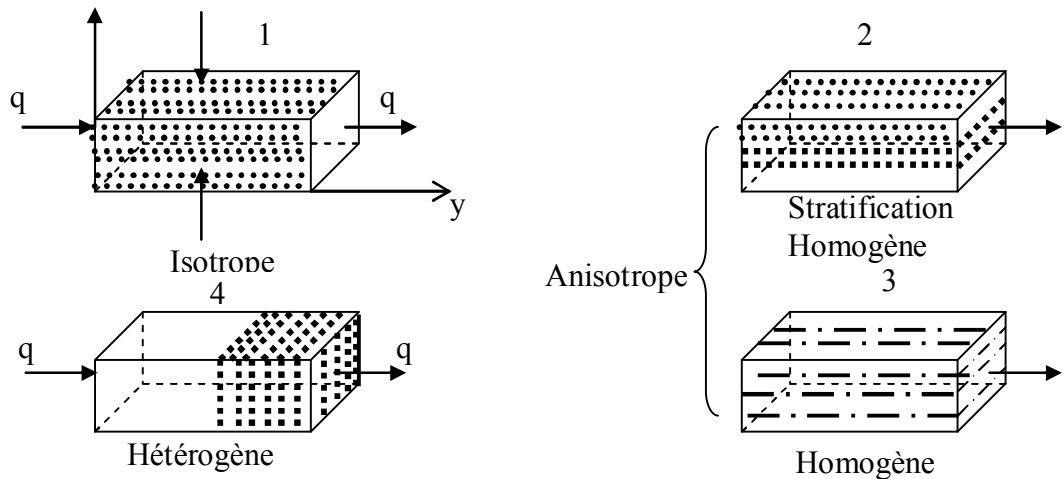


Figure I.1 : Caractéristiques physiques d'un milieu poreux.
(D'après Castany, 1982).

1.2.5 Définition et différents types de porosité

L'un des paramètres les plus importants caractérisant le milieu poreux est la porosité notée η , qui est la partie d'un volume apparent unitaire qui n'est pas occupé par la phase solide (Encyclopédie Universelle [1996]). C'est le rapport volumique des vides d'un corps au volume total.

$$\eta = \frac{V_v}{V_t}, \text{ en \%} \quad (\text{I.1})$$

1.2.5.1 La porosité efficace η_e , coefficient de porosité

Elle se rapporte à l'eau libérée par drainage gravitaire total d'une roche saturée. C'est le volume de l'eau gravitaire, V_e , que l'échantillon peut contenir à l'état saturé, puis libéré sous l'effet d'égouttage complet, à son volume total V_t . Elle dépend essentiellement de l'arrangement de la surface spécifique des grains. Elle est donnée en pourcentage, par la formule :

$$\eta_e = \frac{V_e}{V_t} \quad (\text{I.2})$$

1.2.5.2 La porosité effective

Appelée aussi capacité de rétention. C'est le rapport du volume de rétention V_r (eau non égouttable par gravité) au volume total apparent V_t . Elle est donnée en pourcentage, par la formule :

$$c_r = \frac{V_r}{V_t} \quad (\text{I.3})$$

1.2.5.3 La porosité cinématique

Elle désigne le rapport de l'eau non liée aux grains, l'eau pouvant circuler et le volume total de la roche. Elle n'est pas mesurable pratiquement. Ce concept est proche de la porosité efficace, définit comme un rapport de volume (Carlier. M [1980]).

1.2.5.4 Indice des vides du milieu poreux

En mécanique des sols on utilise fréquemment la notion d'*indice des vides* (rapport du volume des vides au volume de la matière solide).

$$e = \frac{V_v}{V_g} \quad (1.4)$$

L'indice des vides et la porosité sont naturellement liés puisqu'ils expriment en fait la même propriété du terrain.

On a :

$$n = \frac{e}{1+e}, \quad e = \frac{n}{1-n} \quad (1.5)$$

1.2.5.5 Densité – Poids spécifique

L'usage international a donné naissance à une terminologie peu correcte de ces termes. D'une façon générale en Statique on étudie des forces, donc des poids et des poids volumiques. En mécanique des sols on utilise cependant le terme densité dans les expressions suivantes, d'ailleurs faciles à comprendre, et avec les notations et les significations indiquées ci-après (HABIB. P [1997]) :

- densité humide : γ (poids de l'unité de volume de sol, eau comprise) ;
- densité sèche : γ_d (poids de l'unité de volume de sol, eau non comprise) ;
- poids spécifique : G (poids de l'unité de volume d'un grain solide) ;
- densité immergée : γ_i (poids de l'unité de volume d'un sol soumis à la poussée d'Archimède) ;
- densité du liquide : γ_w (poids volumique du liquide interstitiel).

On trouve immédiatement les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \gamma &= \gamma_d (1+w) ; & e &= w_s \frac{G}{\gamma_w} ; & w_s &= \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{G} \right) \gamma_w ; & e &= \frac{G}{\gamma_w} - 1 ; & \gamma &= (1-n)G + n\gamma_w \\ \gamma_d &= (1-n)G ; & \gamma_i &= (1-n)(G - \gamma_w) = \gamma - \gamma_w. \end{aligned}$$

1.2.6 La conductivité hydraulique ou perméabilité

1.2.6.1 Définition

La perméabilité est l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par l'eau, sous l'effet d'un gradient hydraulique. Elle exprime la résistance du milieu à l'écoulement du fluide (eau) qui le traverse. La perméabilité k dépend avant tout de la dimension des interstices (G. Castany [1982] & M. Cassan [1993]). Ce sont donc la dimension et la distribution des grains du milieu poreux qui joueront un rôle primordial sur la valeur de k .

- Si la granulométrie est uniforme : $u = \frac{d_{60}}{d_{10}} < 10$ les grains ont presque le même diamètre.
- Si la granulométrie est étendue, $u > 10$, ce sont les éléments fins qui déterminent la perméabilité.

D'autres grandeurs influencent sur la valeur de k , mais de manière moins importante ; ce sont la porosité et la température.

La perméabilité est mesurée par deux paramètres, à savoir :

- 1- Le coefficient de perméabilité.
- 2- La perméabilité intrinsèque.

I.2.6.2 Le coefficient de perméabilité

Le coefficient de perméabilité peut être donné par l'expression suivante:

$$K = N \cdot d_{10}^2 \cdot \frac{\gamma}{\mu} \quad (\text{I.6})$$

Cette expression englobe les caractéristiques du milieu et du liquide. Elle comporte deux couples de résistances à l'écoulement correspondant à deux groupes de facteurs :

Les caractéristiques du milieu fluide en mouvement ou coefficient du fluide avec deux facteurs principaux à savoir :

- La viscosité dynamique du liquide μ , qui exprime la résistance du liquide à l'écoulement.
- Le poids volumique $\gamma = \rho \cdot g$.

Les caractéristiques du milieu, avec $N \cdot d_{10}^2$, exprimant la perméabilité intrinsèque.

Le facteur principal est la viscosité dynamique. Elle décroît rapidement avec l'augmentation de la température. Le coefficient de perméabilité, fonction inverse, croît avec la température (**Figure.I.2**).

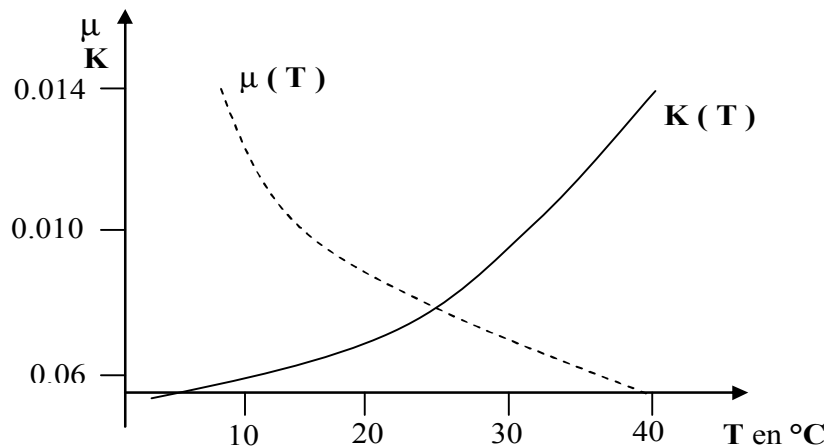


Figure I.2 : La viscosité dynamique μ et le coefficient de perméabilité K en fonction de la température (Castany [1982]).

On note que, la perméabilité d'un sol est liée à la dimension des pores, c'est-à-dire à la granulométrie du sol et à l'état de serrage des grains. Pour les sols grossiers comme les sables, une approximation rapide est donnée par la formule (non homogène) de HAZEN :

$$k \text{ (cm/s)} = 100 D_{10}^2 \text{ (cm)} \quad (\text{I.7})$$

Où D_{10} représente le diamètre de grain tel que 10 % des éléments du sol, en poids, lui soit inférieur. Le coefficient K varie énormément d'un sol à l'autre. A titre d'exemple, K peut être compris entre 10^{-2} et 10^{-6} m/s pour les sables, entre 10^{-7} et 10^{-9} m/s pour les limons, entre 10^{-9} et 10^{-12} m/s pour les argiles, entre 10^{-9} et 10^{-16} m/s pour les roches.

I.3 Etude mécanique de l'écoulement à travers un milieu poreux

I.3.1 Loi fondamentale de l'écoulement - Loi de Darcy

L'écoulement des eaux à travers un milieu poreux est considéré comme le déplacement de particules d'eau, le long de trajectoires appelées lignes de flux ou lignes de courant. La base fondamentale du calcul de quantité d'eau souterraine ou débit traversant un milieu poreux, par l'hydrodynamique souterraine, est la loi expérimentale de DARCY (H. DARCY 1856), que nous présenterons dans cette partie. Nous allons établir les équations régissant le mouvement de l'eau à travers un milieu poreux.

I.3.2 Dispositif expérimental de DARCY

Considérons un tube cylindrique rempli de sol à travers lequel de l'eau pénètre sous pression par une extrémité pour ressortir par l'autre ; des tubes ; appelés piézomètres, permettant la mesure de la pression de l'eau interstitielle en différents points (**Figure I.3**) ; on constate que les niveaux d'eau dans les piézomètres sont alignés sur une droite et cela quelle que soit la pression d'alimentation : les pertes de charge sont proportionnelles aux épaisseurs de terre traversée. Ceci est dû à ce que la circulation dans le sol s'effectue en régime laminaire (HABIB. P [1997]).

Soit h la perte de charge exprimée en hauteur d'eau et s le trajet parcouru. On appelle gradient hydraulique le rapport $i = h/s$ et la vitesse de percolation V est proportionnelle à i . Cette relation très importante est connue sous le nom de loi de Darcy, elle s'écrit :

$$V = Ki \quad (\text{I.8})$$

Où K est une constante liée à la nature du sol et appelée *coefficient de perméabilité*.

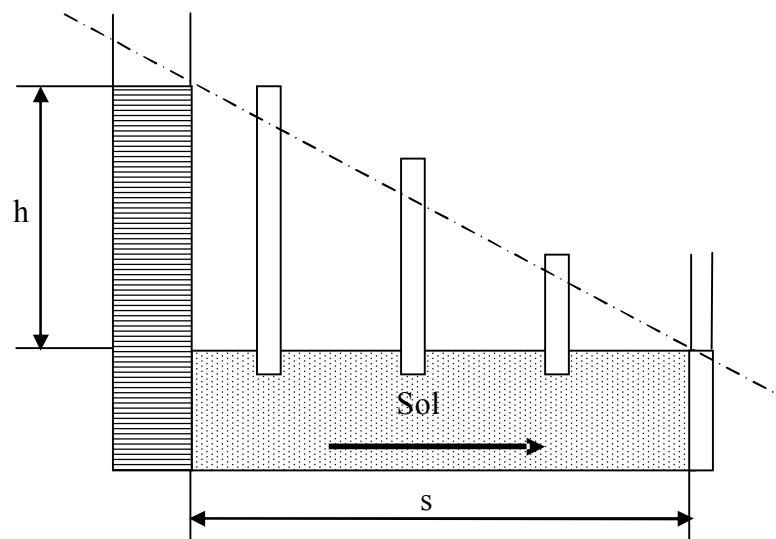


Figure I.3 : Expérience illustrant la loi de Darcy.

A chaque nouveau débit constant on constate une perte de charge proportionnelle au débit. Dans la loi de Darcy V est la vitesse de l'eau à l'extérieur du sol. C'est-à-dire que le débit Q en un temps Δt dans un tube de section S est :

$$Q = K i. S. \Delta t \quad (\text{I.9})$$

Dans le sol, la vitesse moyenne est V/n , l'eau ne circulant que dans la porosité. La vitesse réelle de l'eau est un peu plus grande encore et présente un peu de dispersion, car les cheminements capillaires ne sont ni rectilignes (tortuosité) ni tous égaux.

Remarque

Dans les écoulements souterrains, la charge hydraulique $\phi = \frac{V^2}{2g} + \frac{U}{\gamma_w} + z$ peut être assimilée à la hauteur piézométrique $H = \frac{U}{\gamma_w} + z$, le terme d'énergie $\frac{V^2}{2g}$ étant toujours négligeable.

I.3.3 Conditions de validité de la loi de Darcy

La loi de Darcy établie par des expériences de laboratoire répondant à des conditions très strictes. Quatre conditions doivent être respectées (G. Castany [1982]) : continuité, isotropie, homogénéité du milieu, et écoulement laminaire. Ce dernier est caractérisé par des lignes de flux continues rectilignes, et occupant entre elles la même position relative. Les vitesses, constantes et parallèles, sont inférieures à la vitesse critique, au delà de laquelle l'écoulement devient turbulent. En outre, SHNEEBELI (1956) a montré que pour de très fortes vitesses la relation entre les débits et les pertes de charge n'est plus linéaire. Cette déviation intervient pour des nombres de Reynolds voisins de l'unité rarement atteints en pratique.

De même, la loi de DARCY n'est plus applicable pour les sols très peu perméables (argiles). HARR (1962) a suggéré dans ce cas l'existence d'un gradient initial en deçà duquel il n'y a pas d'écoulement.

I.3.4 Généralisation de la loi de DARCY aux écoulements tridimensionnels

La loi de Darcy, établie sur des dispositifs particuliers, a été vérifiée expérimentalement en laboratoire, dans toutes les conditions possibles, c'est-à-dire :

- Toutes les directions d'écoulement.
- Tous liquides de différents poids volumiques et viscosités dynamiques.
- Tous milieux poreux continus de toutes granulométries.

La généralisation de la loi de Darcy consiste à admettre que celle-ci est valable en tout points du terrain, et dans toutes les directions.

On aura le long des trois axes de coordonnées Ox , Oy et Oz , le système :

$$\begin{cases} u = -k \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ v = -k \frac{\partial \phi}{\partial Y} \\ w = -k \frac{\partial \phi}{\partial Z} \end{cases}$$

Qu'on peut l'écrire sous la forme vectorielle :

$$\vec{V} = \text{grad} \phi \quad (\text{I.10})$$

Avec :

k : tenseur de perméabilité.

(u,v,w) : composantes de la vitesse V .

Le tenseur de perméabilité s'écrit sous la forme d'une matrice symétrique :

$$[k] = \begin{bmatrix} \alpha_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{zz} \end{bmatrix} \quad (\text{I.11})$$

La connaissance de ϕ et de ses vitesses, permet de déterminer en chaque point au facteur K près, les composantes de la vitesse V de filtration. Un tel écoulement est défini par le potentiel hydraulique :

$$\phi = Z + \frac{p}{\rho g} \quad (\text{I.12})$$

Dans le cas d'un écoulement plan, les équations restent valables ; toutes fois leurs nombres se réduisent à deux.

1.3.5 Application de la théorie des écoulements à potentiel des vitesses aux écoulements souterrains

On rappelle que l'écoulement peut être libre ou en charge (sous pression), et il peut être *permanent* ou *non permanent*. L'écoulement filtrant est permanent si les paramètres hydrauliques ne dépendent pas du temps et ne dépendent que des coordonnées (V . Metreveli) :

$$P = f(x, y, z) ; \quad (\text{I.13})$$

$$U = f(x, y, z) ;$$

L'écoulement filtrant est non permanent si les paramètres hydrauliques dépendent des coordonnées et du temps :

$$P = f(x, y, z, t) ; \quad (\text{I.14})$$

$$U = f(x, y, z, t) ;$$

1.3.5.1 Existence d'un potentiel de vitesses

On a :

$$u = -\partial\phi/\partial x, \quad v = -\partial\phi/\partial y \quad \text{et} \quad w = -\partial\phi/\partial z \quad (\text{I.15})$$

La fonction ϕ est appelée le potentiel de la vitesse.

En tenant compte, que le potentiel de la vitesse est la fonction continue de x, y, z, t et rappellerons la non dépendance de dérivée du deuxième ordre de la fonction continue de la règle de la différentiation, nous avons :

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial z} = \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} = - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y \partial x} = \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial y} = - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z \partial y} = \frac{\partial v}{\partial z} \end{cases} \quad (\text{I.16})$$

Le signe (-) signifie que le mouvement se produit du point avec le potentiel le plus élevé en direction du point de potentiel moyen.

Dans le cas général le potentiel de la vitesse peut dépendre non seulement des coordonnées x, y, z , mais aussi du temps t :

$$\varphi = f(x, y, z, t) \quad (\text{I.17})$$

Le mouvement du fluide où existe le potentiel de la vitesse s'appelle le *mouvement potentiel*, ce dernier peut être permanent ou non permanent.

1.3.5.2 Les surfaces équipotentielles

Si dans l'espace qui est occupé du courant potentiel, on a séparé les faces, qui ont les points de même potentiel, les faces considérées sont appelées les faces *équipotentielles*.

Pour lesquelles :

$$\varphi = f(x, y, z, t) = \text{constante} = c \quad (\text{I.18})$$

$$d\varphi = 0 \quad (\text{I.19})$$

D'où l'équation de la face de la même potentielle sera :

$$u dx + v dy + w dz = 0 \quad (\text{I.20})$$

Les différentes faces du même potentiel, sont caractérisées de différentes valeurs du constant c (c_1, c_2, \dots, c_n) (**Figure I.4**).

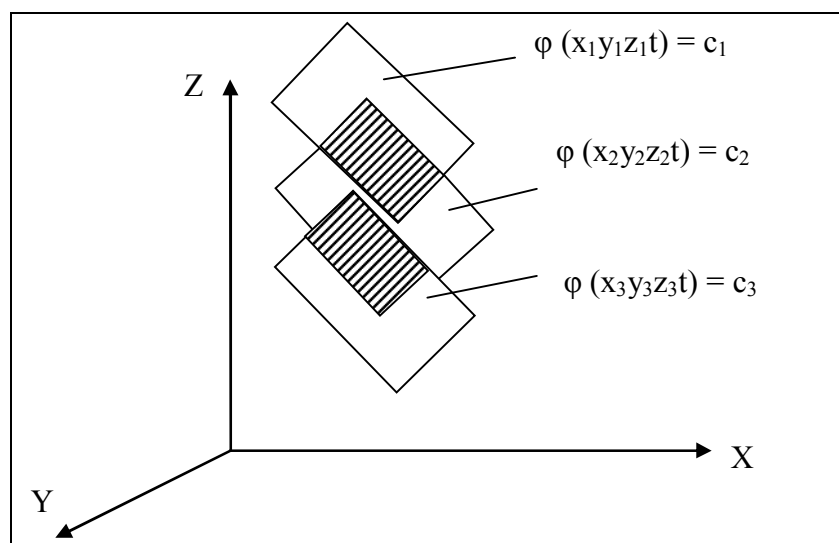


Figure I.4 : Représentation des faces équipotentielles dans l'espace.

I.3.6 Equations des écoulements en régime permanent

I.3.6.1 Equation de continuité

Elle exprime que le fluide est continu, c'est-à-dire qu'il ne peut y avoir dans aucune partie du fluide, ni apport extérieur, ni prélèvement de matière. Donc la masse se conserve au cours de l'écoulement (M.H. HARR & M. CARLIER).

Pour un liquide incompressible (à densité constante), l'équation de continuité est obtenue en exprimant la constante du poids du liquide, à chaque instant, au point de passage x, y, z , dans l'élément de volume parallélépipédique de dimensions dx, dy, dz donc :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{I.21})$$

En notation vectorielle, l'équation de continuité s'écrit :

$$\text{div } \vec{U} = 0 \quad (\text{I.22})$$

Avec x, y, z directions principales de la perméabilité.

C'est l'équation de *continuité* d'un écoulement *permanent tridimensionnel*.

où :

u, v et w : sont des composantes de la vitesse V au point considéré.

Pour le cas d'un écoulement plan, la composante w est nulle, donc l'équation (I.21) devient :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{I.23})$$

C'est l'équation de continuité pour un écoulement *permanent plan*.

I.3.6.2 Equation de Laplace

La vitesse $U (u, v, w)$ au potentiel de vitesse s'exprime de la manière suivante (METREVEILI. V) :

$$U = \sqrt{\left[\frac{\partial \phi}{\partial x}\right]^2 + \left[\frac{\partial \phi}{\partial y}\right]^2 + \left[\frac{\partial \phi}{\partial z}\right]^2} \quad (\text{I.24})$$

Les projections de la vitesse pendant le mouvement potentiel doivent satisfaire non seulement l'équation (I.15), mais aussi l'équation de continuité de fluide incompressible (Equation I.21).

On introduit le terme de potentiel ϕ , défini comme suit :

$$\Phi (x, y, z) = -k \left(\frac{p}{\gamma_w} + z \right) + c = -kh + c \quad (\text{I.25})$$

Où : c est arbitrairement constant. Ainsi :

$$u = \partial \phi / \partial x \quad \text{et} \quad v = \partial \phi / \partial y \quad \text{et} \quad w = \partial \phi / \partial z \quad (\text{I.26})$$

Tenant compte de la loi de filtration, on obtient les dérivées partielles de l'écoulement :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0 \quad (\text{I.27})$$

En remplaçant l'équation (I.15) dans l'équation de la continuité (I.21), on obtient l'équation de *Laplace* lorsque le sol est homogène et isotrope :

$$\nabla^2 \varphi = K \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (\text{I.28})$$

Soit : $\Delta \varphi = 0$.

Dans le cas particulier d'un écoulement *axisymétrique*, la relation (I.27) s'écrit dans le système d'axes (r, z) :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = 0 \quad (\text{I.29})$$

Les équations (I.27) et (I.29) indiquent que pour les conditions d'un écoulement permanent, laminaire, la forme du mouvement des eaux souterraines peut être complètement déterminée en résolvant ces équations, avec les conditions aux limites du domaine d'écoulement.

Nous savons que, pour représenter le mouvement du fluide, il faut savoir la valeur de u, v, w et la pression p dans tous les points d'espace ou au lieu du mouvement considéré.

Pour cela, il faut avoir quatre équations : trois équations (I.15) et l'équation de continuité. L'équation de *Laplace* insère les quatre équations, en sachant le potentiel des vitesses pour quelques cas et en appliquant le principe de superposition, on peut trouver la résolution pour quelques cas complexes du mouvement (Metrevili. V).

Déterminons de quelle manière, pendant le mouvement potentiel, les lignes de courant sont disposées par rapport aux faces de même potentiel.

Prenant sur une face de même potentiel le point A (Figure I.5). La vitesse du mouvement de particule au point A , est U avec projection u, v, w . soit T la tangente à la face équipotentielle, et soit ds le segment tangent donc dx, dy, dz sont des projections sur l'axe correspondant.

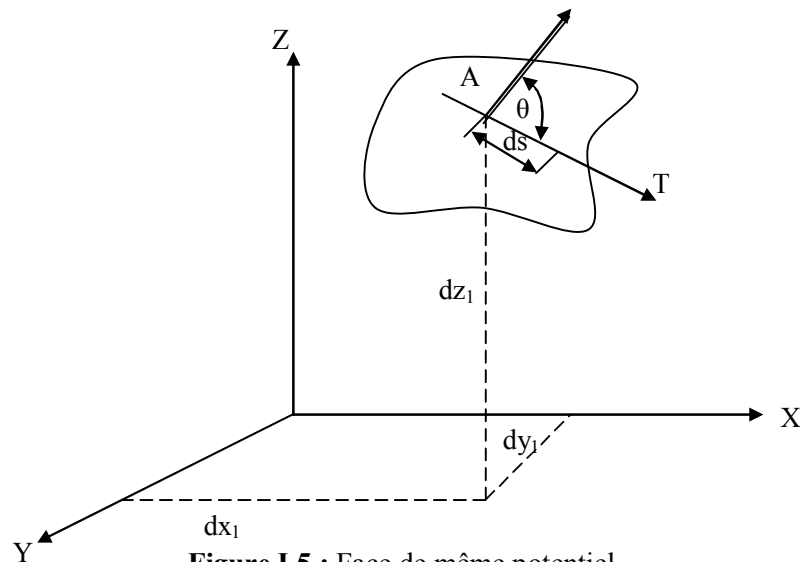


Figure I.5 : Face de même potentiel.

On a :

$$\cos \theta = \frac{u dx + v dy + w dz}{U ds} \quad (\text{I.30})$$

Mais ds se trouve sur la face de même potentielle et d'après (I.20) :

$$\cos \theta = 0 \text{ et } \theta = \frac{\pi}{2} \quad (\text{I.31})$$

On tient compte que les vecteurs de vitesse sont tangents aux lignes de courant, on voit que pendant le mouvement potentiel, les lignes de courant aussi bien que les vecteurs de vitesse sont normaux aux surfaces équipotentielles (Figure I.5).

Déterminons le potentiel de la vitesse pendant l'écoulement du fluide en milieu poreux d'après la loi de filtration de DARCY :

$$U = -k \frac{dH}{dl} = -kI \quad (\text{I.32})$$

C'est-à-dire que les projections de la vitesse locale sur l'axe des coordonnées sont égales à :

$$\begin{cases} u = -k \frac{dH}{dx} = -\frac{\partial}{\partial x}(kH) \\ v = -k \frac{dH}{dy} = -\frac{\partial}{\partial y}(kH) \\ w = -k \frac{dH}{dz} = -\frac{\partial}{\partial z}(kH) \end{cases} \quad (\text{I.33})$$

Où H : est l'énergie potentielle (*Charge piézométrique*) unitaire : $H = z + \frac{P}{\rho g}$.

En comparant entre les relations (I.33) et (I.15), nous constatons que les mouvements du fluide en milieu poreux pendant la loi de DARCY, est le mouvement potentiel avec le potentiel de la vitesse :

$$\varphi = k.H \quad (\text{I.34})$$

I.4 Etude cinématique des écoulements à potentiel des vitesses et description du mouvement

La cinématique des écoulements, est l'étude du mouvement des liquides sans tenir compte des forces qui lui donnent naissance.

I.4.1 Système de référence

Pour étudier le mouvement d'un fluide quelconque, on peut employer deux méthodes (M. CARLIER [1980]) :

I.4.1.1 Méthode de Lagrange

Elle consiste à individualiser une particule déterminée, et à la suivre dans ses mouvements.

On exprime donc les coordonnées d'un point M de la masse fluide, en fonction du temps, et de la position initiale du point considéré.

$$M \begin{cases} X = f(x_0, y_0, z_0, t) \\ Y = \lambda(x_0, y_0, z_0, t) \\ Z = \delta(x_0, y_0, z_0, t) \end{cases}$$

X, Y, Z , sont les variables de Lagrange.

1.4.1.2 Méthode d'Euler

Elle consiste à considérer un point fixe de l'espace et à étudier, en fonction du temps, ce qui se passe en ce point. On déterminera donc, en fonction du temps, la vitesse des particules fluides qui viennent successivement passer par ce point. La vitesse V est déterminée par ses trois composantes u, v, w sur trois axes ox, oy, oz . On disposera donc des trois équations suivantes :

$$V \begin{cases} u = f(x, y, z, t) \\ v = \lambda(x, y, z, t) \\ w = \delta(x, y, z, t) \end{cases} \quad (\text{I.35})$$

où : u, v et w sont des variables d'Euler.

1.4.2 Ligne de courant, surface et tube de courant

Les deux systèmes, de Lagrange, et d'Euler, permettent de définir, dans la masse en mouvement, plusieurs types de lignes :

1- Le système d'Euler définit à chaque instant t , un vecteur vitesse en un point, et un champ de vitesse dans la masse fluide. Les courbes tangentes en chacun de leurs points à la vitesse V constituant les lignes de courant, qui sont exprimées par les équations différentielles, en exprimant que le vecteur vitesse $V(u, v)$ est tangent à la ligne de courant, soit :

$$\frac{v}{u} = \frac{dy}{dx} \quad (\text{I.36})$$

d'où :

$$u \, dy - v \, dx = 0 \quad (\text{I.37})$$

On appelle surface de courant, la surface constituée par l'infinité des lignes de courant qui s'appuient à un instant donné sur une courbe donnée C .

Lorsque la courbe C est fermée, la surface devient un tube de courant, le fluide situé à l'intérieur du tube constituant, lui même, un filet de courant.

2- Le système de Lagrange permet de définir, pour une particule déterminée, une courbe qui représente les positions successives de cette particule aux différents instants. C'est la trajectoire de la particule.

L'équation de la trajectoire s'obtient en éliminant t entre les trois équations donnant les coordonnées de la particule.

1.4.3 Lignes équipotentiellles

Nous avons vu auparavant, qu'il existe une fonction potentielle $\phi(x, y, z)$ des vitesses. C'est-à-dire qu'au point (x, y, z) , les composantes de la vitesse sont des dérivées partielles de cette fonction (VARLET. H [1966]) :

$$u = \partial\phi/\partial x \quad \text{et} \quad v = \partial\phi/\partial y \quad \text{et} \quad w = \partial\phi/\partial z$$

ou sous forme vectorielle :

$$\vec{V} = \text{grad } \varphi \quad (\text{I.38})$$

Les lignes équipotentiels sont telles que la fonction φ conserve la même valeur en tout points de chacune d'elle, leur équation est donc :

$$\varphi(x, y, z) = \text{constante} \quad (\text{I.39})$$

La comparaison des équations (I.38) et (I.39), montre que la vitesse en un point est dirigée suivant la normale à la ligne équipotentielle par ce point.

I.4.4 Fonction de courant

a) Définition

Considérons un déplacement infiniment petit $MM' = ds$ le long d'une ligne de courant (Figure I.6). Soit dx et dy , les composantes de ds .

L'équation de continuité s'écrit :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{I.40})$$

d'où :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = - \frac{\partial v}{\partial y} \quad (\text{I.41})$$

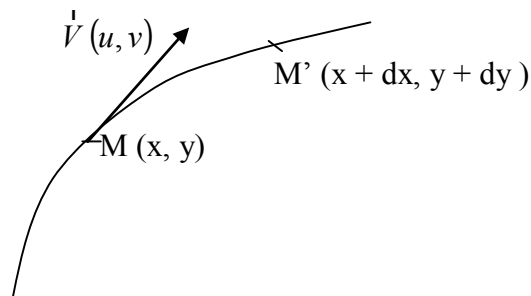


Figure I.6 : Ligne de courant.

La vitesse étant tangente à la ligne de courant, l'équation de continuité sera donc :

$$\frac{\partial x}{u} = \frac{\partial y}{v} \quad (\text{I.42})$$

ou :

$$u \, dy - v \, dx = 0 \quad (\text{I.43})$$

soit $\psi(x, y)$ une fonction telle que :

$$\begin{cases} u = \partial\psi / \partial y \\ v = - \partial\psi / \partial x \end{cases} \quad (\text{I.44})$$

d'où :

$$\frac{\partial\psi}{\partial x} \, dx + \frac{\partial\psi}{\partial y} \, dy = 0 \quad (\text{I.45})$$

soit :

$$d\psi = -v \, dx + u \, dy \quad (\text{I.46})$$

Si on considère la variation de $d\psi$ de la fonction ψ lorsqu'on se déplace le long d'une ligne de courant il vient donc :

$$d\psi = 0 \quad (\text{I.47})$$

Par intégration on aura :

$$\psi(x, y) = \text{constante} \quad (\text{I.48})$$

La fonction ψ ainsi définie, est la fonction de courant, parce qu'elle reste constante le long d'une ligne de courant de l'écoulement.

Notons, que chaque ligne de courant correspond à une valeur constante de la fonction de courant ψ .

b) Débit circulant entre deux lignes de courant

Considérons un tube de courant compris entre deux plans (xoy) (**Figure I.7**), distant d'une longueur égale à l'unité, et délimité par deux lignes de courant (VARLET. H [1966]) :

$$\psi(x, y) = \psi_1 \text{ et } \psi(x, y) = \psi_2$$

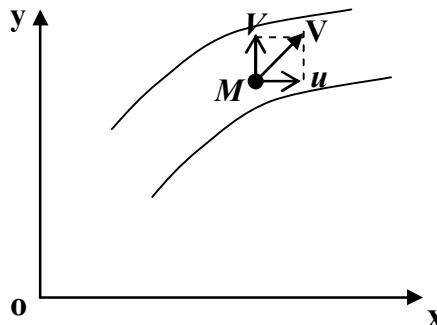


Figure I.7 : Débit dans un tube de courant.

Le débit élémentaire qui passe par ce tube est :

$$dq = u \cdot dy = \frac{\partial \Psi}{\partial y} dy \quad (\text{I.49})$$

Le débit total de la tranche d'écoulement considéré comprise entre les deux lignes de courant Ψ_1 et Ψ_2 est :

$$q = \int_{y_2}^{y_1} \frac{\partial \psi}{\partial y} dy = \psi_2 - \psi_1 \quad (\text{I.50})$$

c) Propriétés

D'après l'équation de continuité pour un liquide incompressible, on peut écrire (VARLET. H [1966]) :

$$\text{div}^1 V = 0 \quad (\text{I.51})$$

Qui peut être écrite sous la forme :

$$\text{div}^1 V = \text{div}^1(\text{grad } \phi) \quad (\text{I.52})$$

D'où :

$$\Delta \phi = 0 \quad (\text{I.53})$$

De la fonction de courant on peut écrire :

$$\begin{cases} u = \frac{\partial \Psi}{\partial y} \\ v = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \\ w = -\frac{\partial \Psi}{\partial z} \end{cases} \quad (\text{I.54})$$

D'où :

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} = - \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (\text{I.55})$$

Et en introduisant la fonction ϕ (potentiel des vitesses), on peut aussi écrire :

$$\begin{cases} u = \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ v = \frac{\partial \phi}{\partial y} \\ w = \frac{\partial \phi}{\partial z} \end{cases} \quad (\text{I.56})$$

Donc :

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{I.57})$$

Qu'on peut l'écrire encore :

$$\Delta \Psi = 0 \quad (\text{I.58})$$

Il en résulte donc, que la fonction de courant et la fonction du potentiel des vitesses sont des fonctions harmoniques.

$$\Delta \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{I.59})$$

$$\Delta \Psi = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{I.60})$$

En résumé, un écoulement plan à potentiel de vitesses est caractérisé par deux réseaux de courbes, à savoir :

- 1- Les lignes de courant dont la fonction de courant ψ reste constante.
- 2- Les lignes équipotentielles dont le potentiel ϕ reste constant.

Les fonctions ψ et ϕ sont des fonctions harmoniques. Ce double réseau a la propriété d'être orthogonal pour un milieu isotrope puisque :

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi}{\partial x} = u = \frac{\partial \Psi}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi}{\partial y} = v = - \frac{\partial \Psi}{\partial x} \end{cases} \quad (\text{I.61})$$

I.4.5 Conditions aux limites

La solution d'un problème d'écoulement souterrain est obtenue par l'intégration des *équations* (I.27) et (I.29) en tenant compte des conditions aux limites. Celles-ci peuvent être de trois types que l'on retrouve par exemple dans l'écoulement à travers une digue en terre (**Figure I.8**).

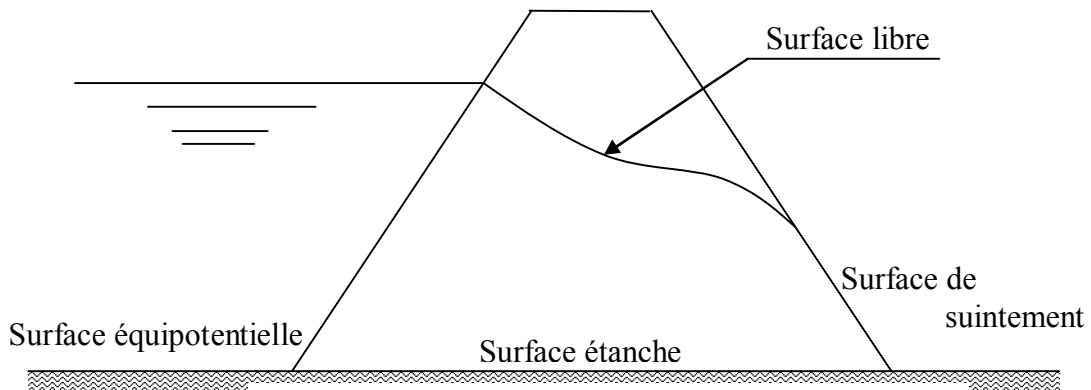


Figure I.8 : Les conditions aux limites.

a) Surface à potentiel connu (Condition de DIRECHLET)

Ce sont dans notre exemple le parement amont baigné par l'eau (surface équipotentielle) ou la surface de suintement sur le parement aval (potentiel égal à la côte).

b) Surface à flux connu (Condition de NEUMAN)

Les plus courantes sont les surfaces imperméables à travers lesquelles le flux est nul.

c) Surface libre

Non définie géométriquement, elle est caractérisée par la double connaissance du flux qui est nul et de la charge qui est égale à la côte.

I.5 Méthodes de résolution de ces équations

La détermination des réseaux d'infiltration, par la recherche des potentiels complexes $f(z)$, n'est possible que dans quelques cas simples. Dès que les conditions aux limites se compliquent, les calculs deviennent extrêmement laborieux (VARLET. H [1966]).

Devant la complexité à trouver des solutions analytiques pour construire les réseaux d'écoulement, on fait souvent recours aux autres méthodes basées sur des approximations et des propriétés graphiques du réseau d'écoulement, d'analogie électrique ou par calcul numérique sur ordinateur. Nous présenterons ici un aperçu général sur les méthodes les plus utilisées et nous développerons la méthode numérique implantée dans le code utilisé au **chapitre III**.

On peut citer l'exemple d'un écoulement complexe qui est le cas rencontré pendant l'infiltration au dessous des constructions des ouvrages géotechniques étanches. La résolution de l'équation de Laplace a des difficultés à cause des contours souterrains d'ouvrages hydrotechniques qui est très complexe (V. Metreveli).

Dans ce cas, on fait recours aux méthodes de calcul suivantes :

- méthodes analytiques ;
- méthodes analogiques ;
- méthodes graphiques ;
- méthodes numériques.

I.5.1 La méthode analytique

La méthode analytique peut être utilisée pour des cas de problèmes simples, mais pour les contours complexes d'ouvrage hydrotechnique, elle ne peut pas être utilisée toujours.

Dans ce cas, on utilise largement les méthodes approximatives. On construit analogiquement ou bien graphiquement les réseaux hydrodynamiques à l'aide desquels on trouve les valeurs, qui caractérisent le mouvement.

Résolution de l'équation de Laplace dans un milieu à trois dimensions

La transformation conforme n'est, dans ce cas, plus applicable. Mais, si on connaît à priori une surface équipotentielle particulière, toutes les surfaces équipotentielles appartiendront à la même famille. On peut alors simplifier le problème en se plaçant dans un système de coordonnées curvilignes orthogonales dont l'une des surfaces de coordonnées appartient à la famille des surfaces équipotentielles (M. CASSAN [1993]).

I.5.2 Méthode graphique

Cette méthode simplifiée, fait appel aux propriétés géométriques des réseaux quadratiques, ainsi qu'aux conditions auxquelles doivent satisfaire les lignes équipotentiels et celles de courant. En s'inspirant des cas théoriques analogues, on peut tracer un réseau vraisemblable de ligne de courant et de lignes équipotentiels qui en chaque point se rencontrent orthogonalement.

Le réseau hydrodynamique caractérise l'orthogonal des lignes de courant et des lignes équipotentiels et aussi les relations constantes des segments qui passent au milieu des cotés de la maille du réseau. On prend les limites habituelles : la ligne de zéro, c'est le contour souterrain de l'ouvrage hydrotechnique, la dernière ligne de courant est la couche imperméable.

I.5.3 Méthodes analogiques

Ces méthodes se basent sur le phénomène physique d'infiltration qui s'exécute dans les conditions de l'équation de Laplace, mais qui donne la possibilité de trouver plus facilement les valeurs des fonctions déterminées. Par exemple, l'étude expérimentale du changement de potentiel du champ électrique homogène est plus facile à exécuter que la détermination du potentiel aux différents points du courant de filtration.

La méthode de l'analogie électro-hydrodynamique AEHD

Cette méthode a été développée par N. Pavlovski en 1918. C'est la plus largement utilisée pour l'étude des problèmes d'infiltration. L'analogie entre le mouvement des courants électriques à champs homogène et du mouvement potentiel du liquide incompressible est caractérisée des données qui sont représentées au **Tableau I.1**.

N	NOTION	Le mouvement du liquide	Le mouvement du courant électrique
1	H	Charge	Le potentiel électrique
2	Φ	Le potentiel des vitesses	Le potentiel électrique réduit
3	$\Phi = \text{const}$	La surface équipotentielle	La surface du même potentiel électrique
4	$U = -\text{grad } \Phi ; \quad U_x = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} ;$ $U_z = \frac{\partial \Phi}{\partial z}$	Les vecteurs de la vitesse	Les vecteurs de la densité du champ électrique
5	$U_x = -\frac{\partial \Psi}{\partial z} ; \quad U_z = -\frac{\partial \Psi}{\partial x}$	La fonction de courant	La fonction du courant électrique
6	$\Psi = \text{const} ; \quad \frac{\partial \Psi}{\partial n} = 0$	La ligne de courant ou bien la frontière imperméable	La ligne du courant ou bien la frontière isolée
7	K	Le coefficient de perméabilité	La conductibilité électrique spécifique

Tableau I.1 : Méthode analogique.

I.5.4 Méthodes numériques

L'utilisation des solutions analytiques, lorsqu'elles existent, semble constituer une démarche quelque peu désuète, lorsqu'on considère les puissants moyens d'investigation que représentent, à l'heure actuelle, les méthodes numériques qui ont vu le jour grâce au développement considérable de l'informatique. Elles permettent, en effet, de traiter un grand nombre de problèmes devant lesquels la théorie s'était, jusqu'à présent, avérée impuissante surtout pour les problèmes *tridimensionnels*.

Parmi les méthodes numériques utilisées on trouve :

- Méthode des éléments finis.
- Méthode des différences finies.

La méthode des éléments finis consiste à remplacer un problème continu par un problème discret équivalent. La discrétisation se fait sur deux fronts, d'une part, le domaine géométrique est subdivisé en sous domaines de géométrie simple, appelés éléments, sur lesquels l'étude du problème peut se faire en une seule opération, et d'autre part les équations aux dérivées partielles sont remplacées par des équations algébriques à l'aide du calcul variationnel ou des méthodes de minimisation de l'erreur comme celle des résidus pondérés. La solution globale s'obtient en résolvant un système global formé par l'assemblage des équations algébriques obtenues sur tous les éléments constituant le domaine géométrique (EUVRAR 1990, FERY, F. & J. JIROUSEK, 2001).

Nous allons développer au chapitre III, l'une de ces méthodes numériques qui est en fait : la méthode des différences finies (MDF) adoptée dans le code *FLAC*.

I.6 Conclusion

Le milieu poreux est identifié par ses caractéristiques et la genèse de ses vides, et pores. Les deux principaux paramètres caractérisant un milieu poreux sont : la perméabilité et la porosité. La granulométrie, technique de l'étude des roches, accède à la morphologie des vides par deux paramètres des grains, le diamètre efficace et le coefficient d'uniformité, la connaissance de ces caractéristiques est nécessaire pour accéder à l'étude des écoulements traversant des milieux poreux. Un cas particulier d'un milieu poreux est le massif de sol protégé par des écrans étanches.

► L'écoulement de l'eau à travers un milieu poreux est déterminé par trois groupes de paramètres hydrodynamiques : coefficient de perméabilité, gradient hydraulique, débit et vitesse de l'écoulement.

► La loi de Darcy, établie expérimentalement, est la base de l'hydrodynamique souterraine. Elle est applicable sur le terrain dans des conditions bien définies. L'écoulement de l'eau dans le sol ou, plus généralement la circulation d'un fluide dans un milieu poreux, est régit par une équation différentielle du second ordre (équation de Laplace), pour sa résolution nous avons recours aux méthodes numériques.

Toutes ces définitions et caractéristiques nous serviront à l'étude des écoulements *plans* et *tridimensionnels* contournant des écrans étanches, dont la résolution est obtenue par les différentes méthodes qui seront présentées dans le *chapitre II*.

CHAPITRE II

ETAT DE CONNAISSANCE SUR LES ECOULEMENTS BI ET TRIDIMENSIONNELS AUTOURS DES ÉCRANS ÉTANCHES

II.1 Introduction

Quelques Digestes, traitant des sols et des fondations, ont mentionné l'importance de la présence d'eaux souterraines. En dépit des conséquences que celles-ci peuvent avoir pour les travaux en profondeur, leur comportement paraît encore mystérieux, même à ceux qui possèdent les notions de base du génie civil. Le fait que les sourciers sont encore largement mis à contribution pour la découverte d'eaux souterraines indique bien la méconnaissance des principes fondamentaux en régissant la présence et les déplacements [IRC].

La résolution des problèmes d'écoulements souterrains réels décrits par la loi de Darcy est le plus souvent impossible analytiquement. On peut obtenir des solutions approchées soit à l'aide de méthodes analogiques telles que la cuve rhéoelectrique et l'analogie sur papier conducteur, soit au moyen de méthodes numériques telles que les différences finies, les équivalences et les éléments finis.

Dans le cas où l'on rencontre les eaux souterraines, les difficultés qu'elles entraînent seront beaucoup moins embarrassantes et coûteuses si l'on connaît bien leur calcul et les méthodes de lutte idoines.

Ce présent chapitre regroupe l'ensemble des différentes méthodes utilisées pour la résolution des problèmes des écoulements autour des écrans étanches *plans* et *tridimensionnels*. Il est organisé selon deux parties principales : étude de l'écoulement en fonction de la largeur et de la fiche relative du batardeau et plus particulièrement de l'importante question de la limite d'application de chaque méthode dans un premier temps, et l'étude du phénomène de renard et les risques qui peut entraîner sur la stabilité de la fouille, dans un second temps.

II.2 Définition

Les batardeaux sont des enceintes étanches, réalisées en palplanches, en parois moulées ou en gabions cellulaires qui permettent de travailler à l'abri de l'eau. Ils peuvent avoir un simple rôle de soutènement dans le cas où l'on terrasse à l'intérieur.

La plupart des solutions dont on dispose supposent que le niveau de la nappe est situé au-dessus du terrain, ce qui correspond effectivement à la définition du batardeau. Le terrain naturel constitue alors une surface de filtration, c'est-à-dire une surface équipotentielle.

II.3 Étude de l'écoulement autour des écrans étanches

La géométrie de l'enceinte, la forme de l'écran étanche (paroi mince, paroi moulée, rideaux d'injection épais), la stratigraphie du sol et le contraste de perméabilité entre les diverses couches, ne permet pas de donner à ce problème une solution générale. KASTNER et autres auteurs ont sélectionné quelques cas schématiques représentant un grand nombre de cas réels. Les configurations étudiées et les conditions aux limites sont représentées sur les schémas de la **Figure II.1**.

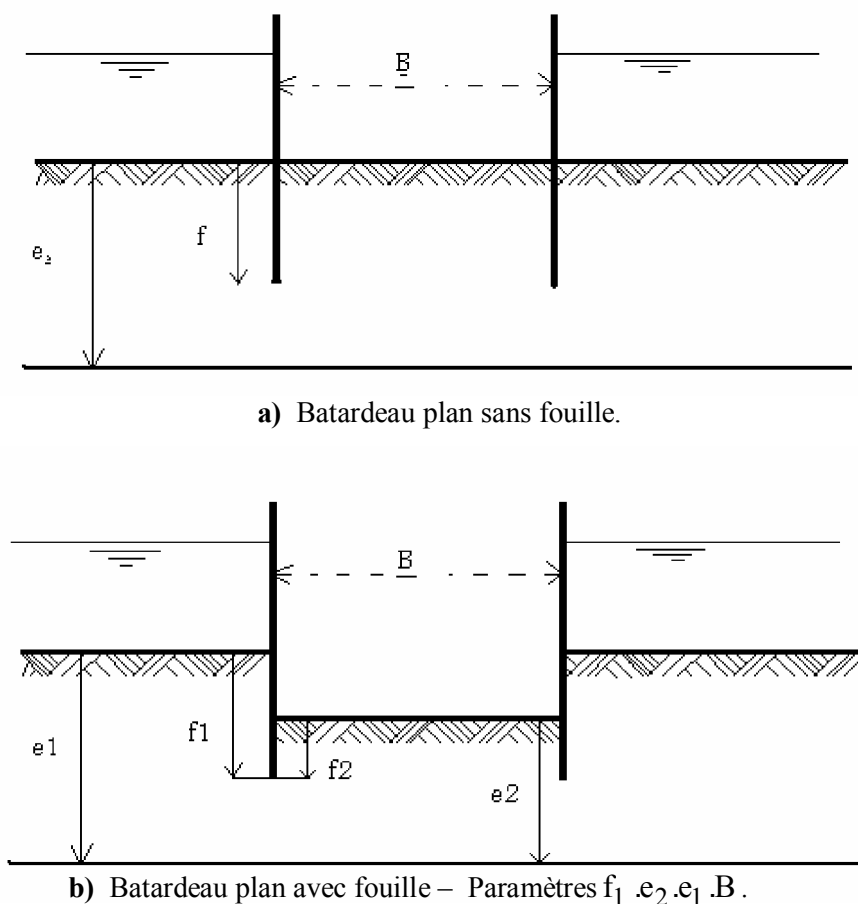


Figure II .1 : Configurations étudiées.

Ce problème a été étudié par divers auteurs qui ont proposé des méthodes de calcul du débit reposant :

Soit sur des relations analytiques approchées (MANDEL, 1951 ; BRILLANT, 1975 ; SCHNEEBELI, 1966 ; CAMBEFORT, 1980).

Soit sur des abaques : (HARR, 1962 ; POLUBORINOVA KOCHINA, 1962 ; DAVIDENKOFF et FRANKE, 1965 ; VUEZ, 1969 ; CARDINAL et DECAZENOVE, 1971).

L'étude et la comparaison de ces résultats mettent en évidence :

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

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

II.3.1 Notion de débit et perte de charge adimensionnelle

Dans le cas des sols homogènes et anisotropes que nous envisageons ici, l'étude de l'écoulement est effectuée dans le domaine isotrope équivalent obtenu par les transformations affines classiques (**Figure II.2**).

$$X = x \sqrt{\frac{k}{k_h}} \quad ; \quad Y = y \sqrt{\frac{k}{k_v}} \quad \text{Où} \quad R = r \sqrt{\frac{k}{k_x}}$$

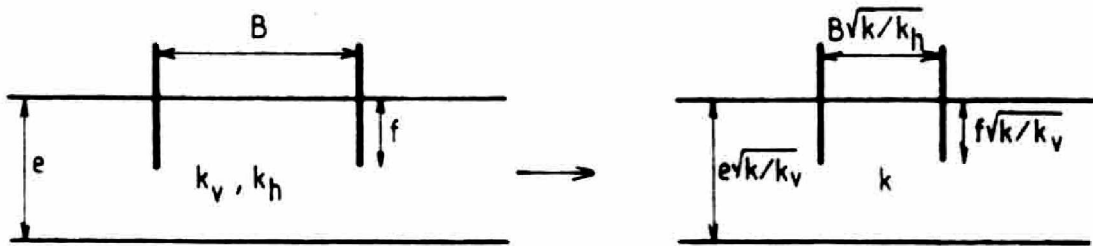


Figure II.2 : Domaine isotrope équivalent.

Le débit contournant l'écran étanche est alors directement proportionnel à la perméabilité équivalente du milieu fictif ($K = \sqrt{K_v K_h}$) et à la perte de charge totale H soit :

$$Q = \sqrt{K_v K_h} \cdot H \cdot \xi \quad \text{(II.1)}$$

Où ξ est un facteur qui ne dépend que de la géométrie du domaine d'écoulement et non de son échelle. Pour les écoulements en milieu homogène étudiés ici, ξ dépend des rapports géométriques adimensionnels tels que f/e , $b/e \sqrt{K_h/K_v}$. Il est ainsi possible de définir des pertes de charge et des débits adimensionnels afin de généraliser les résultats obtenus :

$$\rho = \frac{H \sqrt{k_v k_h}}{Q} \quad \text{et} \quad \bar{Q} = \frac{Q}{H \sqrt{k_v k_h}} \quad \text{(II.2)}$$

qui ne dépendent que de facteurs géométriques adimensionnels.

II.3.2 Débit d'exhaure des batardeaux plans sans fouille

II.3.2.1 Débit d'exhaure des batardeaux plans sans fouille dans un milieu fini

Pour un écran unique fiché dans une couche d'épaisseur limitée, MANDEL (1939) propose deux relations dont il montre qu'elles donnent le débit avec une erreur inférieure à 3 %.

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

Partant de certaines simulations de KASTNER (1974), CAMBFORT (1980) propose comme DAVIDENKOFF de calculer séparément les pertes de charges extérieures H' et intérieure H'' . H' peut être obtenue par les relations (II.3) de MANDEL. Pour H'' , il propose l'approximation suivante :

$$\frac{H'' K}{Q} = \left[\left(0.14 + \frac{0.8}{\arctg \left(\frac{b}{e} \right)} \right) \ln \left(\frac{e}{e-f} + \sqrt{\left(\frac{e}{e-f} \right)^2 - 1} \right) \right] \quad \text{(II.4)}$$

DAVIDENCOFF et FRANKE ont proposé un abaque basé sur le calcul des pertes de charges partielles et vérifié par quelques analogies électriques. Les résultats obtenus recourent les résultats de KASTNER mais couvrent un domaine plus réduit, insuffisant en pratique.

KASTNER (1982) a étudié systématiquement les débits d'exhaure sur deux modèles analogiques à réseau de résistances couvrant les domaines suivants.

Réseau (a)

$$5.10^{-2} < b/e \sqrt{Kh/Kv} < \infty \quad \text{et} \quad 0,125 < \frac{f}{e} < 0,875.$$

Réseau (b)

$$0,375 < b/e \sqrt{Kh/Kv} < 0,625 \quad , \quad 0,03 < \frac{f}{e} < 0,19.$$

Les deux réseaux ont été conçus avec un maillage permettant d'obtenir une précision d'environ 1% dans les cas les plus défavorables, confirmée par les résultats dans la zone de recouvrement des deux modèles et par comparaison avec des relations analytiques exactes dans quelques cas particuliers.

Les résultats de simulations de KASTNER sont résumés (Figure II.3) sous forme de variation du débit en fonction de la fiche et de la largeur du batardeau.

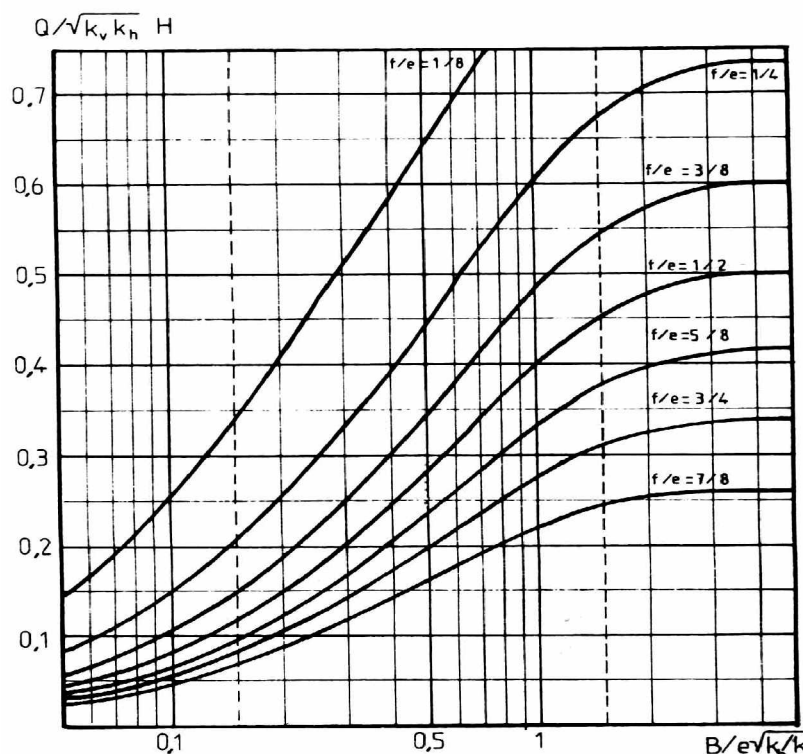


Figure II.3 : Variation du débit en fonction de la largeur du batardeau dans un milieu fini (D'après KASTNER, 1982).

On considère que le batardeau est large et que le débit n'augmente plus avec sa largeur dès que le rapport $\frac{b}{e} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$ est supérieur à 3 (KASTNER, 1982).

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 $e \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$ (**Figure II.4**), ce débit dépend alors à parts égales de la perméabilité verticale et horizontale.

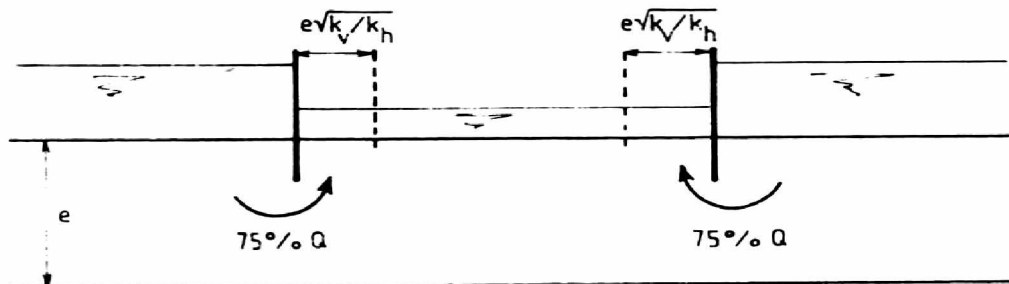


Figure II.4 : Batardeau large.

Pour les batardeaux étroits, l'écoulement est quasi uniforme en fond de fouille dès que:

$$\begin{aligned} \frac{b}{e} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}} < 1 & \quad \text{pour } \frac{f}{e} = 0.75 \quad (\text{fiche forte}) ; \\ \frac{b}{e} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}} < 0.5 & \quad \text{pour } \frac{f}{e} = 0.25 \quad (\text{fiche faible}). \end{aligned}$$

Dans ce cas, 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.

Lorsque simultanément la fiche et la largeur relative sont faibles, le débit ne dépend pratiquement plus de l'épaisseur de la couche perméable mais uniquement du rapport, là encore, le débit dépend surtout de la perméabilité verticale (**Figure II.4**).

De manière générale, les constatations de KASTNER (1982) indiquent l'importance de la perméabilité du sol le long du tracé de l'écran et plus particulièrement l'influence de la perméabilité verticale.

BENMEBAREK et Allia (2004) ont montré que le débit total reste constant à partir de $B/e > 2.5$.

II.3.2.2 Débit d'exhaure des batardeaux plans sans fouille dans un milieu semi-infini

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

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

Pour les fouilles protégées par un écran fiché dans un milieu semi-infini, ($\frac{f}{e} \approx 0, \frac{f}{b}$ faible)
 BRILLANT (1975) a proposé la relation :

$$\frac{Q}{H \sqrt{K_v K_h}} = \frac{1}{\pi} \ln \frac{2b}{f} \quad (\text{II.6})$$

L'abaque de CARDINAL et De KAZENOVE, présenté dans la **Figure II.5**, s'applique théoriquement aux fouilles étroites dans un milieu semi-infini.

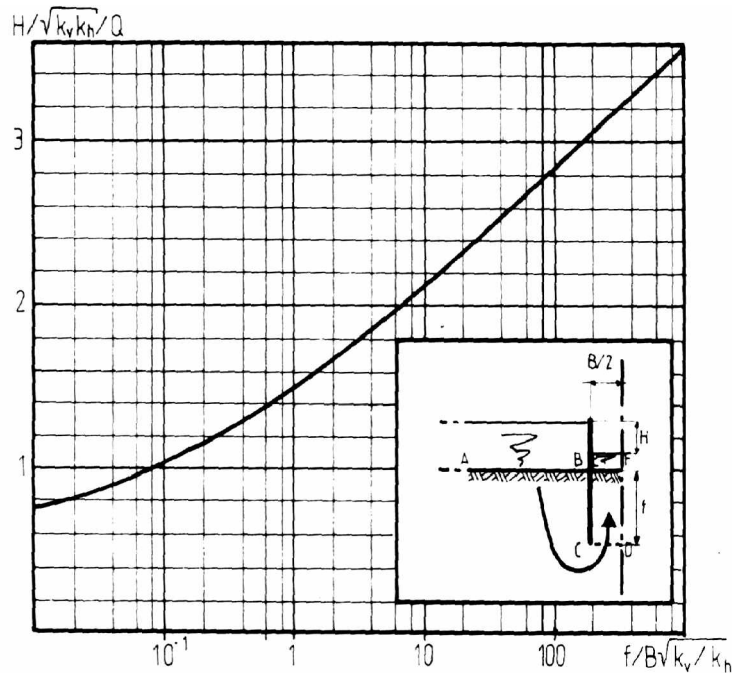


Figure II.5 : Abaque de CARDINAL et DEKASENOVE.

$$H = H_1 + H_2$$

H_1 : Perte de charge entre AB et CD ; H_2 : Perte de charge entre CD et EF.

$$H_2 = \frac{2 Q}{K_v} \cdot \frac{f}{b}$$

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

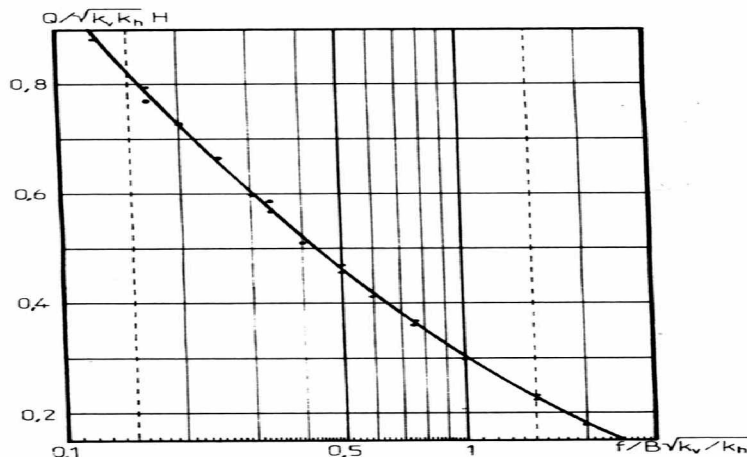


Figure II.6 : Variation du débit en fonction de la fiche du batardeau dans un milieu semi-infini (D'après KASTNER, 1982).

II.3.3 Débit d'exhaure des batardeaux plans avec fouille

En raison de l'introduction d'un paramètre géométrique supplémentaire (e_2) (**Figure II.1.b**) ce problème ne conduit pas, en général, à des solutions simples.

Cependant, l'abaque de CARDINAL et De CAZENOVE (**Figure II.5**) est applicable aussi à ce cas pour peu que la fouille soit étroite.

Un groupe d'ingénieurs de NEYRPIC (1955) a étudié le problème dans le cas particulier des batardeaux très larges par la méthode des transformations conformes et a proposé un abaque donnant le débit en fonction de la fiche relative pour quelques valeurs du rapport e_1/e_2 . DAVIDENKOFF et FRANKE (1965) proposent de découper l'écoulement global complexe en écoulement partiel pour lesquels la perte de charge est susceptible d'évaluation simple, même approchée. KASTNER adopte ce principe pour compléter leurs résultats en particulier à partir de ses simulations analogiques. Il faut noter cependant que ce découpage n'est licite théoriquement que si la séparation entre les écoulements élémentaires est une ligne équipotentielle. Comme ce n'est pas généralement possible, les solutions obtenues ne sont qu'approchées mais l'erreur est négligeable lorsque la séparation est choisie convenablement.

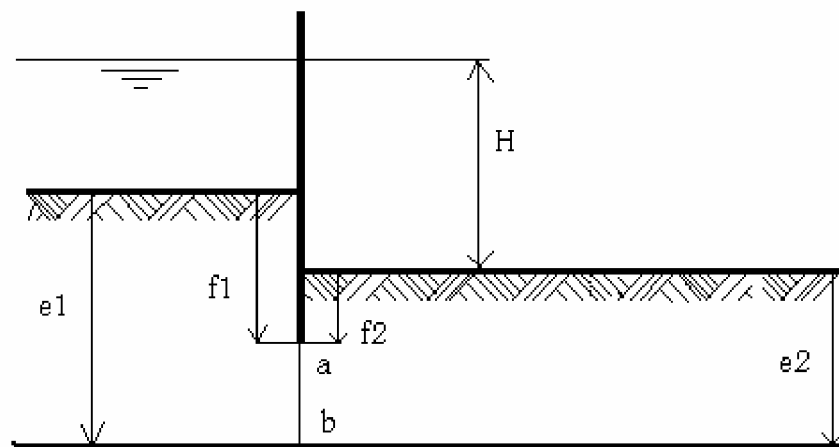


Figure II.7 : Batardeau de grande largeur.

Pour les batardeaux de grande largeur (**Figure II.7**), On considère les deux écoulements séparés par le segment \overline{ab} qui prolonge la palplanche. La perte de charge partielle de chacun de ces écoulements est obtenue à partir des relations de MANDEL:

$$\begin{aligned}
 \text{Si } f < e/2 \quad \rho &= \frac{H\sqrt{K_v.K_h}}{Q} = \frac{\pi}{2\ln(2\cot g(\pi f/4e))} \\
 \text{Si } f > e/2 \quad \rho &= \frac{H\sqrt{K_v.K_h}}{Q} = \frac{2\ln 2\cot g(\frac{\pi}{4}(1 - \frac{f}{e}))}{\pi}
 \end{aligned}
 \tag{II.7}$$

Le débit de l'écoulement global est alors donné par la relation :

$$\frac{Q}{H/\sqrt{K_v K_h}} = \frac{1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (\text{II.8})$$

Les résultats obtenus ainsi sont en très bonne concordance avec les résultats indiqués pour quelques cas par NEYRPIC, l'écart ne dépassant pas 2%. Ceci s'explique par le fait que le segment \overline{ab} reste proche d'une ligne équipotentielle.

En ce qui concerne les batardeaux de largeur finie ($B/2 > 0,05$ et $0,125 < f/e_2 < 0,875$). La perte de charge de l'écoulement (1) est donnée par MANDEL (II.7) pour l'écoulement (2), KASTNER a mesuré la perte de charge partielle par simulations analogiques. Cependant la comparaison du débit ainsi obtenu avec le résultat de simulation d'écoulement complet a révélé une concordance médiocre.

Ceci conduit à déterminer la perte de charge partielle H_2 par différence avec celle de l'écoulement complet sans fouille.

Soit : $\rho_2 = \rho - \rho_1$

Où : ρ_1 est obtenue par les relations de MANDEL et ρ par simulation analogique.

La valeur de la perte de charge calculée est transcrite sur les abaques de la **Figure II.8 (a, b)**.

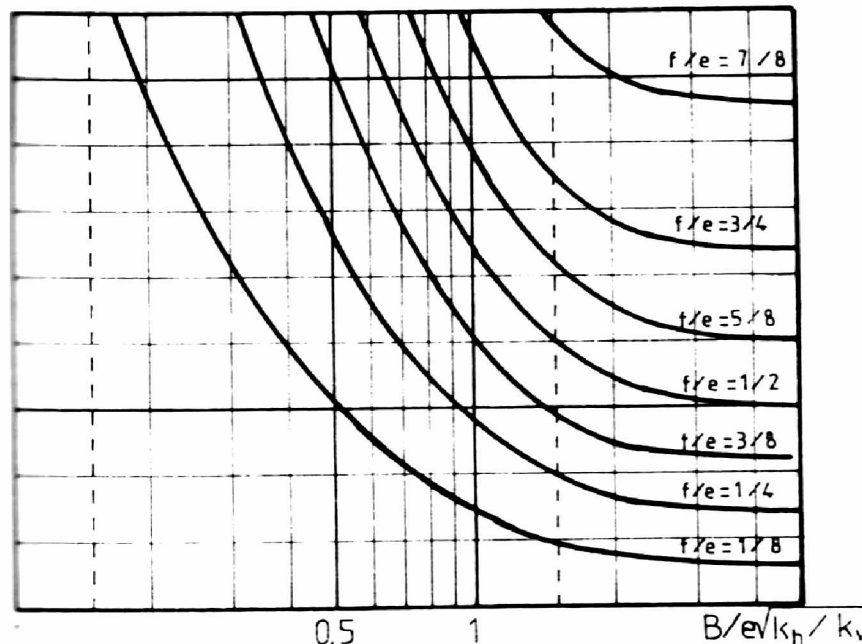


Figure II.8.a : Variation de la perte de charge en fonction de la largeur relative (D'après KASTNER, 1982).

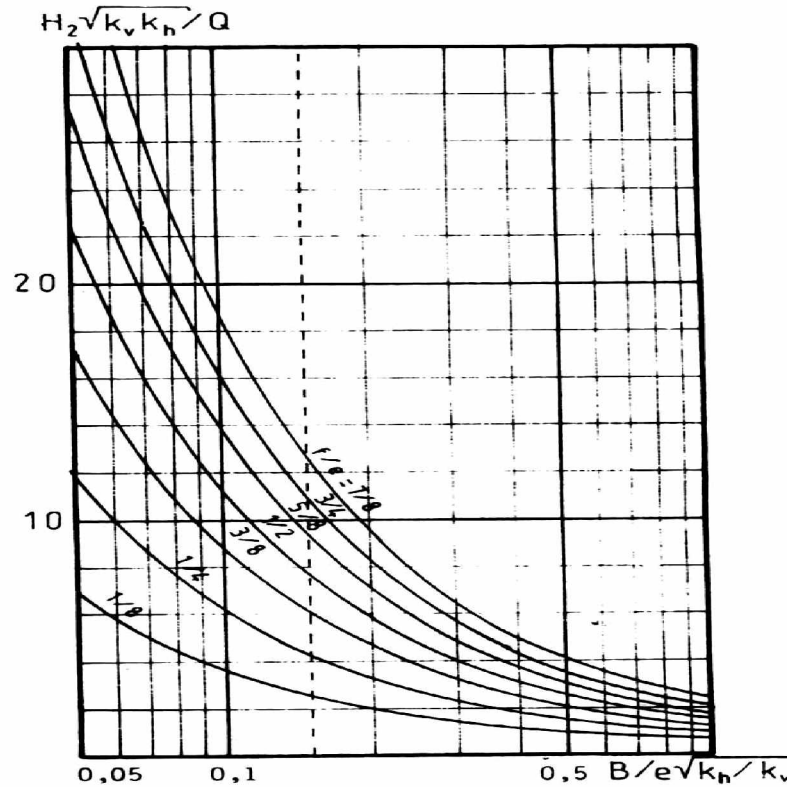


Figure II.8.b : Variation de la perte de charge en fonction de la largeur relative (D'après KASTNER, 1982).

Pour la configuration des batardeaux à fiche relative faible ($f_1/e_1 < 0.125$) KASTNER propose un découpage différent suivant une ligne horizontale \overline{bc} qui se développe du côté semi-infini (**Figure II.9**).

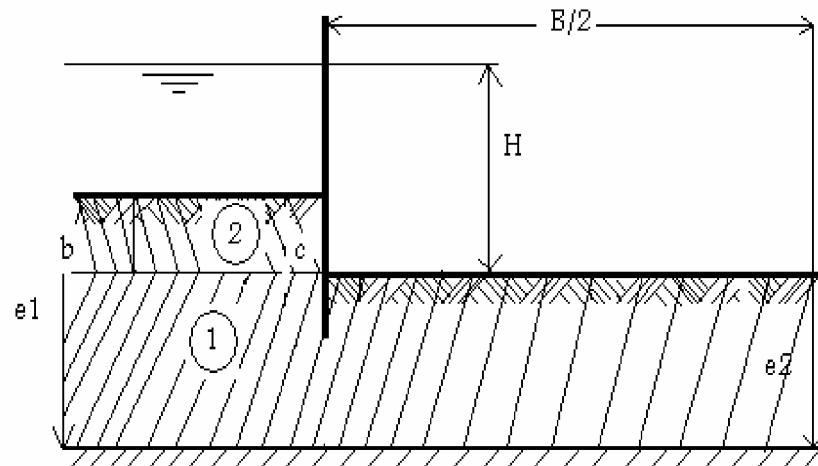


Figure II.9 : Batardeau à fiche relative faible.

La perte de charge dans la zone (1) est donnée, suivant la valeur de f/b par la relation de BRILLANT.

Des études antérieures (KASTNER, 1974), ont permis d'établir que la perte de charge dans la zone (2) peut être approximée par la relation :

$$\rho_2 = \frac{2(e_1 - e_2)}{3e_2} \sqrt{k_h \cdot k_v} \quad (\text{II.9})$$

Cette solution acceptable pour e_1/e_2 voisin de 2, devient très précise dès que e_2/e_1 est inférieur à 4/3. Pour ce cas, BENMEBAREK et Allia (2004) ont montré que la relation de MANDEL est applicable pour des valeurs de $\frac{b}{e} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}} > 6.4$. En outre, les relations de BRILLANT sont applicables pour les faibles valeurs de f/B comprise entre 0.02 et 0.075.

II.3.4 Ecoulement sous un écran circulaire

Fréquemment, les configurations réelles sont telles (enceinte ramassée) que le problème ne peut être considéré comme plan. L'écoulement vers la fouille n'est plus alors à filets parallèles mais à filets convergents, ce qui introduit une perte de charge supplémentaire.

L'hypothèse de l'écran circulaire constitue une approche commode de ces écoulements tridimensionnels, la symétrie de révolution permettant d'en faire l'étude dans le plan (r, z) . Les résultats pratiques concernant ce problème sont cependant assez peu nombreux :

BRILLANT (1975) a modifié la relation (II.6) déjà citée, pour l'adapter au cas de la symétrie de révolution.

DAVIDENKOFF et FRANKE (1965) ont étudié au moyen d'une cuve rhéométrique le cas de l'enceinte circulaire et l'enceinte carrée, mais la lourdeur de la méthode ne leur a pas permis de faire une étude systématique de l'influence des paramètres géométriques principaux.

Ces auteurs ont estimé la précision de leurs résultats à environ 5 % mais il faut noter qu'une part de cette erreur est systématique et provient de l'écran dont l'épaisseur est loin d'être négligeable dans certaines configurations.

Les résultats de ces diverses études étant trop fragmentaires, KASTNER a construit un réseau de résistances qui a permis, moyennant quelques précautions exposées dans ce chapitre, de simuler ces écoulements axisymétriques avec une précision de l'ordre du pourcent. A l'aide de ce modèle il a étudié les batardeaux circulaires sans fouille, avec fouille ainsi que l'alimentation radiale.

II.3.4.1 Batardeaux circulaires sans fouille

Au terme de leurs simulations à l'aide d'une cuve rhéométrique, DAVIDENKOFF et FRANKE proposent de calculer le débit unitaire comme si le problème était plan, puis de multiplier le résultat par un coefficient égal à **0.8**. Ce résultat approximatif est le reflet du domaine assez étroit qu'ils ont étudié et ne peut être adopté comme règle générale. En particulier, un batardeau de rayon infini pouvant être assimilé à un batardeau plan, le coefficient minorateur qu'ils ont défini doit tendre vers l'unité.

Pour préciser ces résultats, (KASTNER, 1982) avait exploré avec leur réseau le domaine suivant (**Figure II.10**) :

$$0.5 < 2r/e < 8.75 \text{ et } 0.125 < f/e < 0.875.$$

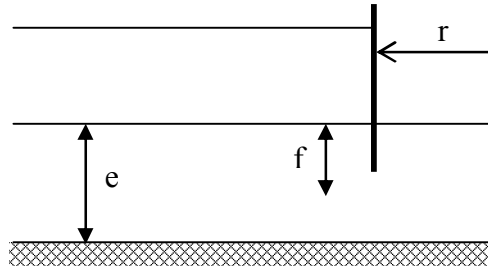


Figure II.10 : Batardeau circulaire sans fouille.

Les résultats de ces simulations sont présentés dans la **Figure II.11** sous la forme d'abaque donnant le débit en fonction du rayon et de la fiche relative.

La concordance avec les résultats de DAVIDENKOFF et FRANKE est bonne, mettant toutefois en évidence l'erreur systématique liée à l'épaisseur de l'écran dans leur modèle.

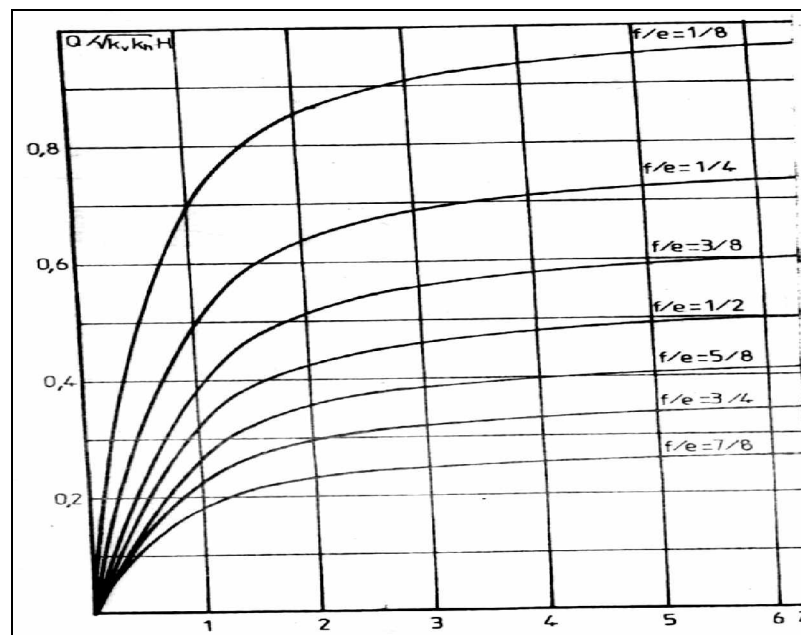


Figure II.11 : Variation du débit en fonction du rayon et de la fiche relative du batardeau circulaire.

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

$$\frac{Q}{KH} = \frac{1}{\pi} \left\{ \text{Ln} \frac{4r}{f} - 0.167 \right\} \quad (\text{II.10})$$

Par comparaison avec les résultats de KASTNER et ceux de BRILLANT, son domaine d'application à 06 % près peut être défini par :

$$f/2r < 0.5 ; \quad 2r/e < 1.5 \quad \text{et} \quad f/e < 0.125$$

Pour les fiches très faibles, on adoptera la relation de BRILLANT à condition que $f/2r$ soit inférieur à 0.5. Enfin, pour le domaine des fiches faibles non couvert par ces résultats, KASTNER a proposé de calculer le débit à l'aide de la relation : $Q = Q_{plan} \cdot \beta$.

Où β est un facteur de réduction dépendant à la fois de f/e et de $2r/e$. A partir de leurs abaques et de la relation de BRILLANT, (KASTNER, 1982) avait calculé la variation de β en fonction de $2r/e$ pour f/e égale à 0.03 et 0.125.

Les deux courbes correspondantes sont données dans la **Figure II.12** et l'on pourra en déduire une valeur de β convenable pour toute fiche relative comprise entre ces deux valeurs.

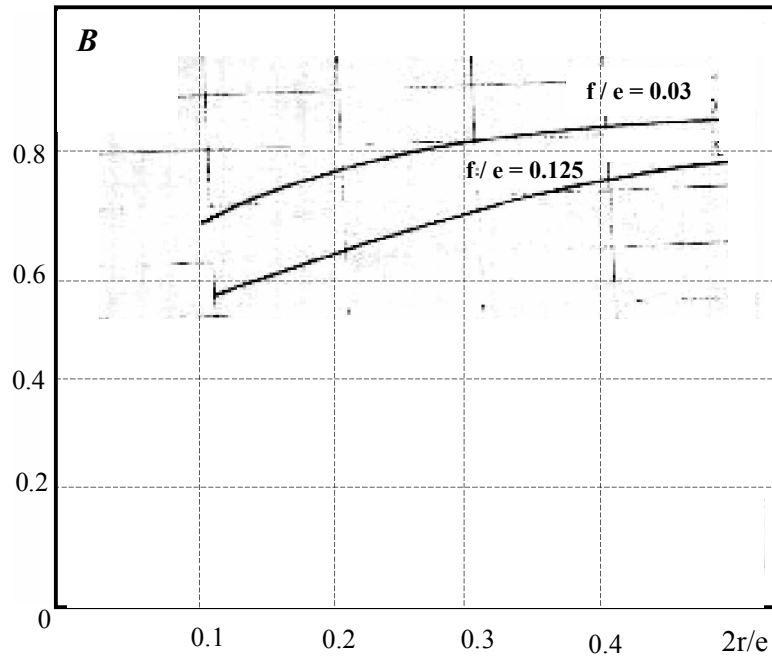


Figure II.12 : Variation de $B = Q_{\text{circulaire}}/Q_{\text{plan}}$.

II.3.4.2 *Batardeau circulaire avec fouille*

KASTNER [1982] a adopté pour ce cas la même méthode que pour le problème plan correspondant, c'est-à-dire que l'écoulement global est séparé en deux écoulements élémentaires (**Figure II.13**) pour lesquels il a calculé les pertes de charge partielles.

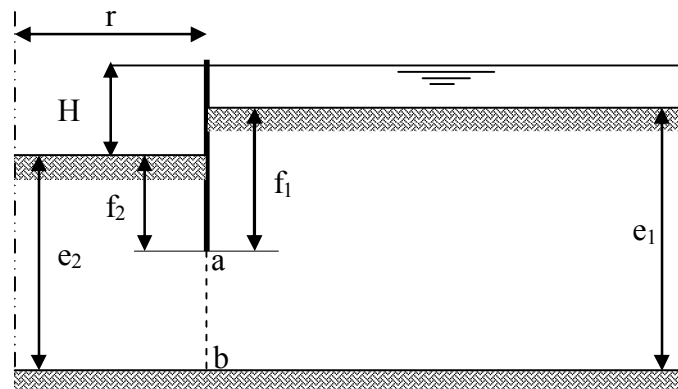


Figure II.13 : Batardeau circulaire avec fouille.

Il a déterminé les pertes de charge partielles de la manière suivante :

- H_1 et H , pertes de charge extérieures et globales sont mesurées directement sur le réseau analogique ;
- H_2 , perte de charge de l'écoulement intérieur est prise égale à $H - H_1$.

Les résultats correspondants sont présentés dans les abaques de la **Figure II.14**.

A titre de vérification, (KASTNER, 1982) avait simulé des écoulements avec fouille tels que :

$$\begin{array}{lcl} 0.375 < & f_1/e_1 < & 0.875 \\ 0.5 < & 2r/e_1 < & 7.5 \\ 0.375 < & 2r/e_1 < & 15 \end{array}$$

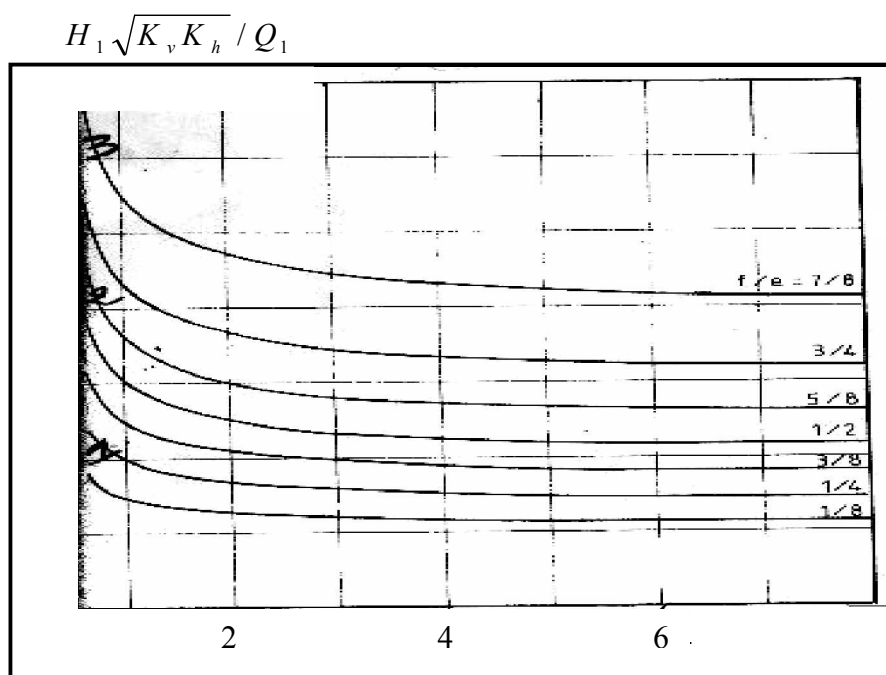


Figure II.14.a : Batardeau circulaire avec fouille. Perte de charge de l'écoulement extérieur.

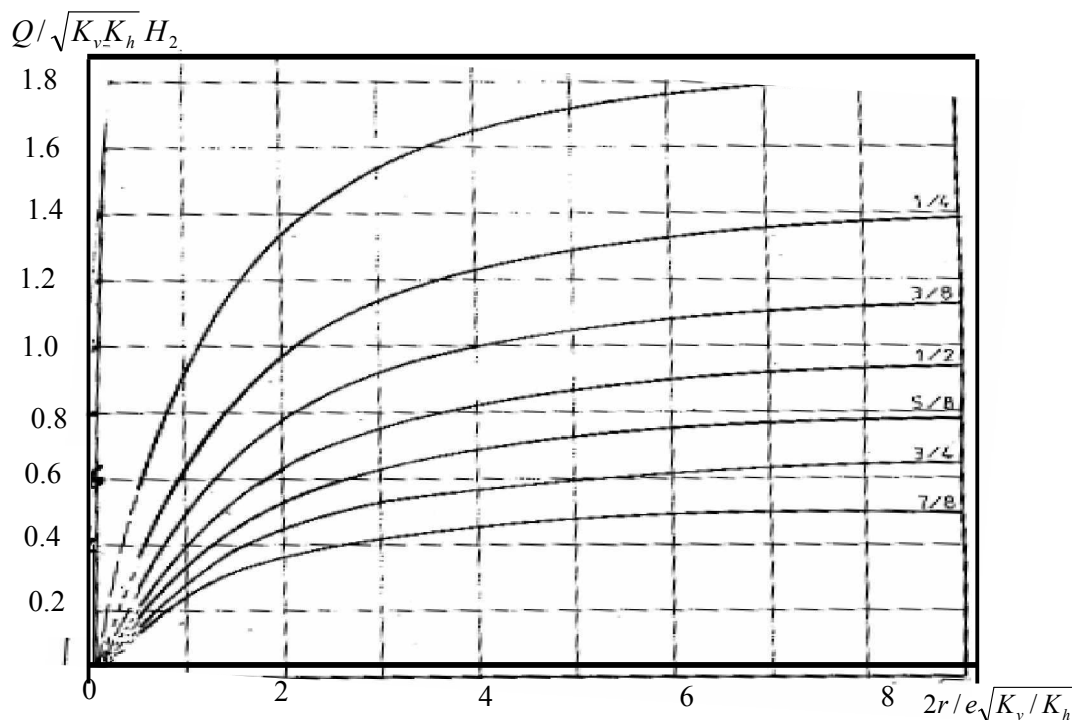


Figure II.14.b : Batardeau circulaire avec fouille. Débit de l'écoulement intérieur.
(D'après KASTNER, 1982).

II.3.4.3 Extension aux batardeaux carrés

Ce problème a été étudié par DAVIDENKOFF et FRANKE au moyen d'un modèle rhéoélectrique similaire à celui employé pour les écrans circulaires. En conclusion de ces essais, ils proposent de calculer le débit comme pour un batardeau plan, puis de multiplier le résultat par un facteur réducteur égale à 0.75, sans tenir compte d'une variation possible de ce facteur avec les dimensions relatives du batardeau.

CAMBEFORT, à partir de ses essais, a proposé une autre relation de réduction du débit ne tenant pas plus compte cependant de cette dimension relative. Or, cet écoulement est convergent, comme pour les écrans circulaires, la forme carrée, amenant aux points singuliers que sont les angles une perte de charge supplémentaire.

Si, l'on considère un très grand batardeau ($2r/e$ grand, r étant le coté du batardeau) le débit unitaire devrait se rapprocher de celui des batardeaux circulaires ou plans, l'écoulement aux angles ne représentant qu'une partie très faible de l'écoulement total. De même, pour les batardeaux de très petite dimension, ce sont les pertes de charge dues à la convergence de l'écoulement qui sont prépondérantes et occultent l'effet des angles : le débit unitaire devrait se rapprocher de celui des batardeaux circulaires.

Pour vérifier cette hypothèse, 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 uniquement les résultats concernant les fiches qui sont résumé dans le tableau ci-après :

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

Tableau II.1 : 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.

II.3.5 Prise en compte de l'épaisseur de l'écran

Les configurations qui ont été présentés par KASTNER et des autres auteurs supposent que la coupure est infiniment mince. Cette hypothèse, justifiée pour les écrans réalisés en palplanches, peut être critiquable pour les parois moulées épaisses ou pour les écrans obtenus par injection.

KASTNER [1982] a proposé de tenir compte de manière approchée de cette épaisseur en admettant qu'elle provoque une perte de charge supplémentaire H_e donnée par la relation présentée sur la **Figure II.15** :

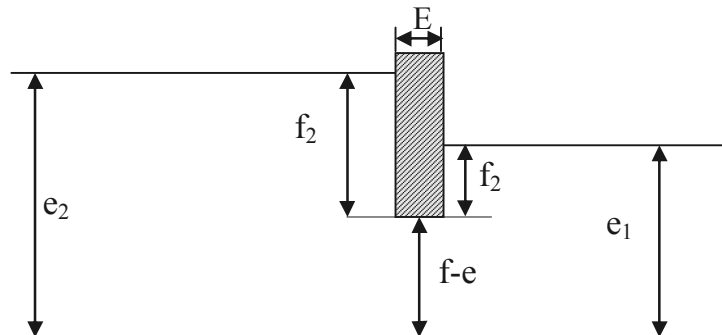


Figure II.15 : Prise en compte de l'épaisseur de l'écran.

$$H_e = \frac{Q E}{K_h (f - e)} \quad (\text{II.11})$$

Le problème a été traité par VUEZ (1969) dans le cas particulier d'un batardeau de largeur infinie.

II.4 Prévion du renard dans les écoulements de contournement des écrans étanches

II.4.1 Introduction

Le creusement d'une fouille pose un certain nombre de problème dont les plus connus sont la mise hors d'eau et la stabilité des talus. Mais il y a aussi les déformations du sols, par exemple les soulèvements du fond de fouille et les tassements de la surface dans le voisinage. Ces derniers sont particulièrement gênants en ville, car ils peuvent détériorer les constructions existantes (H. Cambefort [1993]).

Les rabattements de nappe à l'abri d'une enceinte étanche sont particulièrement favorables à l'apparition du renard par l'écoulement vertical ascendant qu'ils induisent. Le terme renard couramment utilisé recouvre en fait deux phénomènes distincts. La boullance et le soulèvement généralisé, le second, accident brutal pouvant avoir des conséquences dramatiques, est heureusement assez rare car souvent précédé par la boullance. Celle-ci, phénomène de surface souvent localisé, apparaît plus fréquemment, parfois même sous l'effet d'écoulement naturel, ne mettant pas en cause brutalement la stabilité d'ensemble du fond de fouille, ces incidents n'en ont pas moins des conséquences parfois importantes pour le chantier lui-même (difficultés de circulation des engins, débits très importants pouvant conduire à l'arrêt du chantier, injections d'étanchement), comme pour son environnement (tassement dû à l'entraînement d'horizons de sable fin).

Le phénomène élémentaire provoquant le renard est bien connu et expliqué par la notion de gradient hydraulique critique. Par contre, l'application de cette notion au problème de l'écoulement autour

d'un écran étanche est complexe, cet écoulement n'étant pas uniforme de plus, le frottement interne du sol s'oppose partiellement au soulèvement généralisé. En pratique, le problème est encore compliqué par l'hétérogénéité marquée du sol vis à vis de la perméabilité.

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

II.4.2 L'approche expérimentale du phénomène de renard

C'est à TERZAGHI (1922) que l'on doit les premiers résultats importants concernant le soulèvement du sol sous l'effet d'un écoulement vertical ascendant. Ses essais ont mis en évidence deux processus différents conduisant au renard :

- La boulangerie qui est un phénomène de surface se manifestant souvent sous la forme ponctuelle d'éruptions de sable.
- Le soulèvement général et simultané du sol en masse.

Ces expérimentations ont permis à TERZAGHI d'introduire la notion du gradient critique tel que le poids des grains est annulé par les forces d'écoulement, expliquant ainsi le soulèvement du sol. BAZANT (1949) et SCHMIDBAUER (1950) ont examiné dans leur expérience le processus du déplacement des grains et du gonflement d'un massif de sable sous l'effet de gradients égaux ou supérieurs au gradient critique.

MARSLAND (1953) s'est intéressé plus spécifiquement au renard provoqué par l'écoulement autour des écrans étanches. Ses expériences ont été effectuées sur un modèle réduit de batardeau avec fiche et largeur variable. Il utilisait un sable de granulométrie uniforme, soit à l'état lâche ($n = 0.42$) soit à l'état dense (0.37). Après avoir provoqué le renard dans son modèle, il compare la perte de charge totale critique H_c correspondante aux valeurs H_{c1} et H_{c2} tels que :

➡ Le gradient soit critique en fond de fouille contre le rideau H_{c1} .

➡ Le gradient moyen entre l'extrémité de la palplanche et le fond de fouille soit critique H_{c2} . Cette seconde valeur est toujours inférieure à H_{c1} dans les sols homogènes.

Lors de ses expériences sur sable lâche, MARSLAND constate que le renard se déclenche pour une valeur de H_c comprise entre H_{c1} et H_{c2} , généralement plus proche de H_{c2} . La rupture se traduit par un soulèvement simultané d'une masse de sol située devant la fiche.

Au contraire, dans les sables denses, le phénomène se déclenche en surface pour une perte de charge égale voire supérieure à H_{c1} . En fait, une observation plus fine indique qu'il se produit dans

tous les cas un gonflement presque imperceptible en surface dès que $H_{c1} = H_c$. C'est donc par la boulangue que se manifeste le renard dans les sables denses.

MARSLAND a également réalisé quelques expériences sur des sols sableux multicouches. Ces essais indiquent que la stratification provoque une diminution de la stabilité dans certains cas.

L'expérimentation de MARTIN (1971) montre que la notion de gradient critique, comme la loi de DARCY n'est applicable qu'à l'échelle macroscopique, c'est-à-dire en considérant des volumes incluant un nombre suffisant de grains. Il a examiné en particulier le cas de l'écoulement autour d'un cylindre partiellement enterré (**Figure II.16**). Lorsque $\frac{R}{d} > 1$ le gradient au point E est

théoriquement infini. Dans ces conditions, le moindre écoulement devrait provoquer la boulangue. En fait le renard n'apparaît pas avant que le gradient moyen, compté sur une distance correspondant à plusieurs grains, ne soit critique.

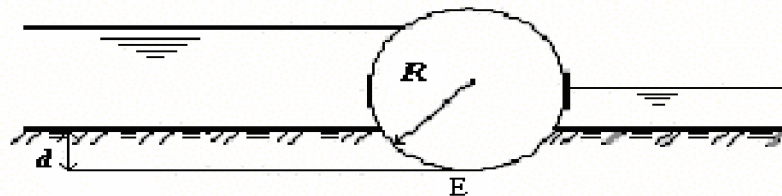


Figure II.16 : Expérience de MARTIN.

Enfin KALIN (1977) a soumis des échantillons de sols stratifiés à un écoulement vertical uniforme. Il montre que dans ce cas l'apparition du renard n'est déterminée ni par le gradient en fond de fouille ni par le gradient moyen compté sur toute la hauteur (i_m), mais par la valeur maximale de $i_m(x)$, gradient moyen compté sur une distance x à partir de la surface du sol (**Figure II.17**).

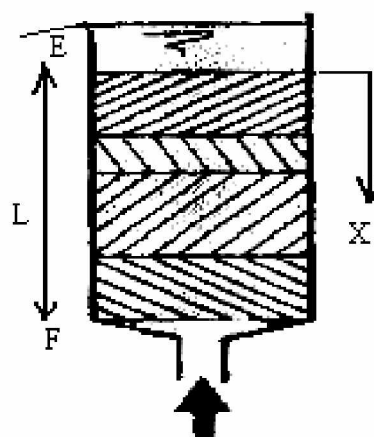


Figure II.17 : Principe de l'expérimentation de KALIN.

Ce résultat met en évidence la difficulté de prévision du renard en vraie grandeur. Les sols naturels étant généralement stratifiés.

II.4.3 Étude expérimentale du renard sur modèle réduit

Pour le problème précis du renard lié à l'écoulement autour d'un écran étanche, les résultats les plus intéressants sont ceux de MARSLAND (1953) qui montre bien l'influence de l'état de densité du sol sur le déclenchement de la rupture. Ainsi dans le sable dense, le renard apparaît lié à la valeur du gradient de sortie i_e , encore que certaines expériences aient fait apparaître une perte de charge supérieure à la valeur théorique ainsi déterminée. MARSLAND attribue cette différence au frottement du sol sur les parois du modèle. Pour les sables lâches, le critère contrôlant la rupture apparaît moins bien défini, MARSLAND parle d'un soulèvement généralisé, parfois d'une rupture en coin, ce qui contredirait le schéma de TERZAGHI.

Afin de préciser ces résultats et de cerner l'influence de la densité (i.e., de la résistance au cisaillement du sable) sur le critère de rupture, KASTNER (1982) a réalisé une série d'expériences en milieu homogène sur un modèle réduit de batardeau.

Il a réalisé une série d'essais avec un sable homogène, soit à l'état lâche obtenu par déversement du sable dans l'eau, soit à l'état dense obtenu par compactage plus au moins énergique.

Les essais sur sable de densité moyenne à forte montrent qu'au moment de la rupture, il apparaît que le gradient de sortie i_e est assez nettement inférieur au gradient critique. Par contre, l'extrapolation des mesures faites avant la rupture conduit à une hauteur critique inférieure à la hauteur critique expérimentale.

Cela indique qu'il y a eu modification de l'écoulement au voisinage du fond de fouille. MARSLAND avait noté dans des expériences similaires un gonflement du sol en fond de fouille. Selon lui, l'allègement du sable qui en résulte aurait dû provoquer une accélération du renard contrariée par le frottement sur les parois de l'écran. En fait, l'évolution de la courbe piézométrique montre que ce gonflement, se traduit par une chute du gradient au voisinage de la surface du sol qui peut être attribuée à une forte augmentation locale de la perméabilité.

Ainsi ces mesures confirment que lorsque le gradient de sortie i_e atteint sa valeur critique $i_c = \gamma' / \gamma_w$, il y a bien un début de renard qui consiste en un léger gonflement du sol.

Sous l'effet de ce gonflement, la couche de sable superficielle voit sa perméabilité croître brutalement. Elle joue alors le rôle d'un tapis drainant qui retarde la propagation du soulèvement en profondeur. Le gradient moyen compté sur toute la fiche n'est alors égal qu'à 1.4.

Il se produit un soulèvement généralisé lorsque ce même gradient moyen atteint une valeur assez forte. Il semble donc que le soulèvement en masse dans le sable dense dépend de la valeur du gradient moyen qui doit être assez fort.

Les différents essais sur sable lâche ont conduit à des résultats très différents. Le soulèvement généralisé se produit alors que le gradient moyen est voisin de 1.3, valeur bien inférieure à celle constatée lors des essais sur sable dense.

L'analyse approfondie d'une belle série d'essais réalisés par SKEMPTON et BROGAN (1994) sur des sols granulaires au sujet des risques d'entraînement et les travaux de SHULER (1995) ont permis à MONNET (1998) de mettre en évidence l'existence d'un gradient critique de renard. Ce gradient, est indépendant du gradient critique de TERZAGHI.

C'est la raison pour laquelle il est nécessaire d'imaginer un autre mécanisme de rupture qui ne soit pas en contradiction avec les conditions générales d'équilibres.

Il est certain que le critère de stabilité défini par le gradient critique de TERZAGHI est insuffisant et que sa validité est limitée au cas de sols qui tout à la fois, présentent une compacité suffisante et ne présentent pas de risque d'entraînements. Si des entraînements apparaissent, la compacité du sol va diminuer et sa perméabilité va augmenter. La valeur du gradient critique de TERZAGHI va diminuer légèrement, le diamètre efficace va augmenter légèrement et la perméabilité probablement beaucoup plus. Au total, la valeur de gradient critique d'apparition du renard va diminuer rapidement.

A partir de la valeur de l , MONNET a pu définir un gradient de renard. En effet, pour un grain au sein d'un massif, sa force stabilisatrice reste la même que la bouillasse. En revanche la force déstabilisatrice va rester proportionnelle au diamètre du grain et à la vitesse de l'écoulement. C'est pourquoi on peut définir le gradient de renard comme une fonction du rapport de ces deux forces et il s'écrit :

$$i_e = 0.01 \left[\frac{d_{15}^2}{k} \right] i_{ct} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

i_{ct} : Gradient critique de TERZAGHI.

k : Perméabilité expérimentale du sol.

Il sera donc possible de prévoir le comportement sous écoulement des sols qui ne sont pas sujets aux entraînements en plaçant leur point représentatif (d_{15} (mm), k (m/s) sur le diagramme de stabilité (**Figure II.18**).

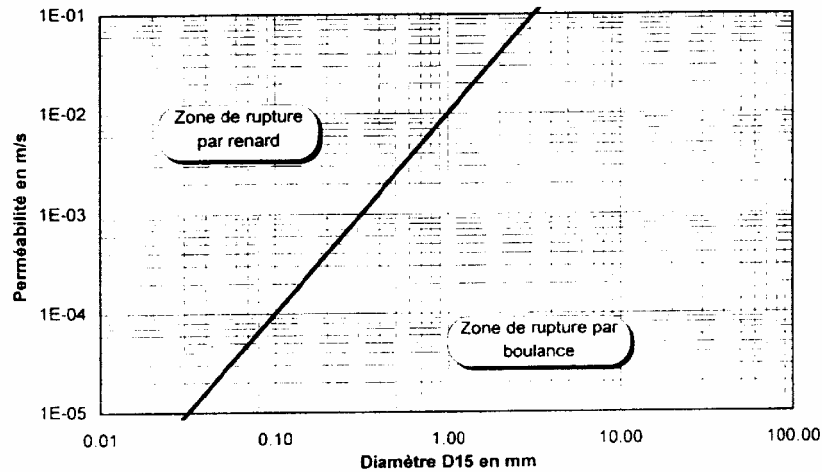


Figure II.18 : Diagramme de stabilité (D'après MONNET 1998).

1. Si le point représentatif se place à droite de la limite, la rupture sera obtenue par boulangance, pour le gradient critique de TERZAGHI, i_{ct} .
2. Si le point représentatif se place à gauche de la limite, la rupture sera obtenue par renard lorsque le gradient atteindra la valeur $i_R = 0.01 \left[\frac{d_{15}^2}{k} \right] i_{ct}$.

II.4.4 Les méthodes de calcul

II.4.4.1 Méthodes de calcul négligeant le frottement

TERZAGHI (1922), a introduit la notion de gradient critique conduisant, pour un écoulement unidirectionnel vertical, au soulèvement en masse du sol. De nombreux auteurs ont adapté cette notion à l'écoulement autour d'un écran étanche : ils considèrent qu'il y aura renard si, en un point du fond de fouille, le gradient vertical atteint sa valeur critique. Il s'agit en fait d'un critère de boulangance. En milieu homogène, le point de plus fort gradient est le point E au contact de la palplanche (**Figure II.24**). MC NAMEE, (1949) GRAY et NAIR (1967) ont donné des abaques permettant le calcul du gradient en ce point appelé gradient de sortie pour certaines configurations de batardeaux. KRIZEK (1968) et REDDY (1971) ont calculé i_e dans le cas d'une palplanche inclinée : Cette solution s'applique au cas où la direction de la perméabilité principale du sol serait inclinée sur l'horizontale. L'écran étanche vertical apparaîtra incliné après application de la transformation géométrique classique qui permet de se ramener, pour le calcul, à un sol isotrope.

Cependant, il est vite apparu que cette notion de gradient de sortie est insuffisante, le renard pouvant se déclencher avant qu'il y ait boulangance. BOUMGART et DAVIDENKOFF (1929) repris par DAVIDENKOFF (1954) ont calculé les forces d'écoulement s'exerçant sur le prisme de sol *EFGH* situé au contact de la fiche (**Figure II.19**) négligeant le frottement du sol sur les faces EF et GH, ils montrent que le prisme le plus défavorable correspond à une largeur *FG* très faible.

Dans ces conditions, il y a renard lorsque le gradient moyen compté sur *FG* est critique. Pour les sols homogènes, le point *F* le plus défavorable est le pied de palplanche *P*.

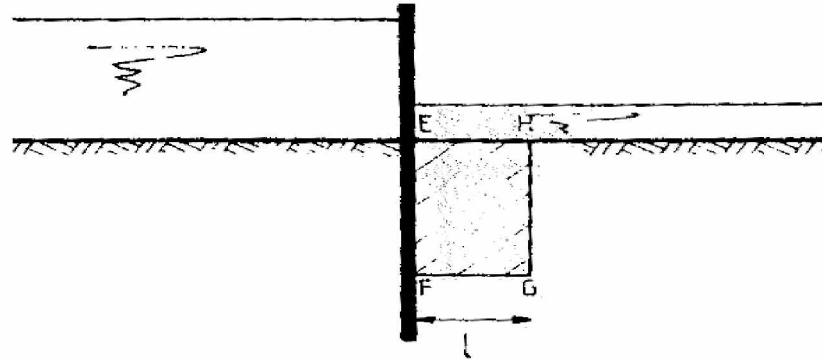


Figure II.19 : Schémas de soulèvement en masse de DAVIDENKOFFE, BOUMGART et TERZAGHI.

Sur la base de ses expériences, TERZAGHI (1943) propose que le prisme ait une largeur l égale à $F/2$, la charge hydraulique diminuant lorsque l'on va de F à G , cette règle de calcul conduit à des résultats plus favorables que la précédente. L'adoption de cette largeur $l = F/2$ apparaît comme une prise en compte détournée du frottement sur les faces verticales du prisme.

MANDEL (1951) modifie le schéma de DAVIDENKOFFE en s'inspirant des travaux de CAQUOT et KERISEL sur la force portante des fondations, négligeant les forces de frottement sur les faces verticales, il rajoute aux forces d'écoulement l'effet du sol situé coté extérieur (**Figure II.20**) qui se traduit par la relation suivante :

$$\sigma'_1 < \sigma'_2 e^{\pi tg \phi} . tg^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \quad (\text{II.13})$$

Où:

σ'_1 et σ'_2 sont les contraintes effectives s'exerçant sur une facette horizontale de part et d'autre du pied de l'écran, et ϕ le frottement interne du sol. Cette règle de calcul, négligeant d'une part le frottement du sol de part et d'autre du rideau au-dessus du pied de palplanche et d'autre part la variation rapide de la charge hydraulique en pied d'écran conduit à des résultats très pessimistes si on les compare aux données expérimentales.

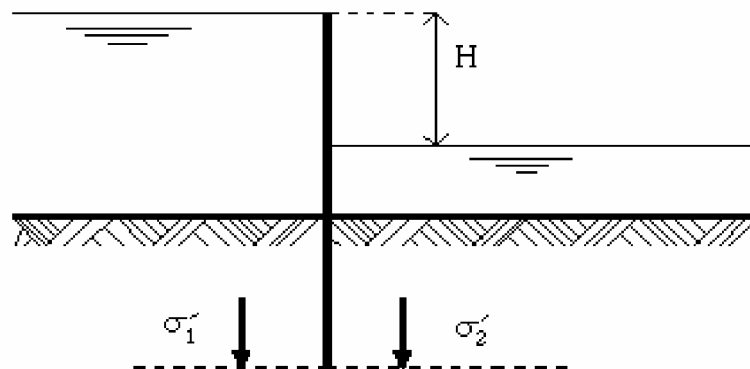


Figure II.20 : Schémas de calcul de MANDEL.

II.4.4.2 Méthodes de calcul considérant le frottement

BAZANT (1963) prend en compte le frottement en considérant une rupture circulaire se développant à partir du pied de l'écran sous l'effet des forces d'écoulement (**Figure II.21**). Assimilant les lignes de courant à des ellipses, il a construit des abaques donnant la hauteur critique relative H_c/f en fonction du potentiel en pied d'écran H_p et de l'angle de frottement interne du sol. Notons qu'à leur limite, lorsque $\phi = 0$, ces abaques indiquent une perte de charge critique nulle, ce qui signifierait que le renard se déclenche dès qu'il y a écoulement.

Ce résultat est erroné de toute évidence, le renard ne pouvant se déclencher que lorsque les forces d'écoulement équilibrent le poids de l'élément de sol EIP (**Figure II.21**) (KASTNER, 1982).

Sur la base de ses expérimentations et des observations antérieures, KASTNER (1982) a développé deux schémas de rupture qui se révèlent complémentaires :

- soulèvement d'un prisme rectangulaire ;
- soulèvement d'un prisme triangulaire.

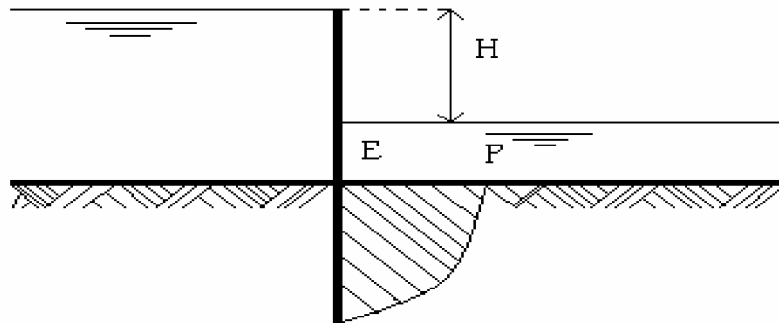


Figure II.21 : Schéma de rupture de BAZANT.

II.4.5 Comparaison des essais et des différentes méthodes de calcul

HARR (1962) avec nombre d'autres auteurs américains, pense que le critère de dimensionnement le plus significatif est celui du gradient de sortie. Les essais de KASTNER (1982) confirment que ce critère doit être absolument respecté, son dépassement ayant toujours été accompagné de désordres :

- Soit début de soulèvement du sable en masse.
- Soit gonflement du sol en fond de fouille mise en évidence par la modification de la courbe piézométrique. Dans le cas d'une fouille réelle, cela se traduirait par l'instabilité du fond de fouille et vraisemblablement par des entraînements de fines, le critère de TERZAGHI, bien que plus proche de la réalité, ne donne pas des résultats satisfaisants dans la mesure où il ne dépend que de facteurs géométriques alors que tous les résultats expérimentaux montrent l'influence de la densité du sol. Les résultats de BAZANT (1963) à l'inverse, dépendent du frottement interne du sol mais non de la géométrie du batardeau. Ils sous-estiment fortement la valeur du gradient moyen déclenchant le soulèvement en masse.

Aucun des critères examinés ne permet la prévision correcte du soulèvement généralisé. Cela s'explique si l'on remarque qu'un seul, prend en compte le frottement interne du sol et qu'aucun n'adopte le schéma de rupture en *coin* généralement observé, cela a conduit KASTNER (1982) à concevoir de nouveaux schémas de calcul prenant en compte le frottement du sol.

II.5 Conclusion

L'analyse des résultats existants complétés par une importante campagne de simulations sur modèle à résistances réalisées par (KASTNER, 1982), a permis de conclure que les schémas simplifiés qui sont proposés pour le calcul du débit contournant les écrans étanches sont d'une application limitée. Nous nous sommes attachés à présenter toutes les méthodes de calculs du débit proposées avec leur domaine d'application et l'incertitude maximale pouvant entacher le débit ainsi calculé dont la plupart ne sont valables qu'aux écoulements bidimensionnels.

L'étude sur modèle réduit du renard provoqué par l'écoulement autour d'un écran étanche a confirmé qu'il peut se présenter sous deux formes :

la boullance, qui intervient dès que le gradient en fond de fouille atteint la valeur critique $i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$;

le soulèvement généralisé qui dépend non seulement du gradient moyen mais aussi de la résistance au cisaillement du sol et l'appui de la fiche. Les schémas de calcul proposés par KASTNER montrent bien que le soulèvement provoqué par l'écoulement ne puisse être séparé de l'effet de butée de la fiche.

Il est certain que le critère de stabilité défini par le gradient critique de TERZAGUI est insuffisant et que sa validité est limitée au cas des sols qui, tout à la fois, présentent une compacité suffisante et ne représentent pas de risque d'entraînements. L'introduction par MONNET (1998) d'une seule hypothèse supplémentaire, l'existence d'un gradient critique de renard, permet de quantifier toutes les ruptures observées dans les essais de SKEMPTON et BROGAN (1994).

Sur la base des travaux antérieurs, deux critères apparaissent importants pour le déclenchement du renard :

Le gradient de sortie i_e qui détermine à coup sur l'apparition de la boullance.

Le gradient moyen qui permet d'estimer la butée disponible.

Ainsi, KASTNER [1982] avait proposé une méthode permettant de calculer simplement et précisément ces deux grandeurs dans le cas des écoulements plans. Elle mériterait d'être étendue aux problèmes *tridimensionnels* (fouilles rondes, carrées ou rectangulaires), les corrections proposées dans ce cas par DAVIDENKOFF et FRANKE étant trop imprécises.

Toutefois, les configurations réelles sont telles (enceinte ramassée) que le problème ne peut être considéré comme plan. L'écoulement vers la fouille n'est plus alors à filets parallèles mais à filets convergents, ce qui introduit une perte de charge supplémentaire.

L'hypothèse de l'écran circulaire, carré et rectangulaire constitue une approche commode de ces écoulements tridimensionnels, la symétrie de révolution permettant d'en faire l'étude dans le plan (r, z) pour le batardeau circulaire. Nous avons vu que les résultats pratiques concernant ce problème sont cependant assez peu nombreux, malgré quelques expérimentations de DAVIDENKOFF et FRANKE pour le cas de l'enceinte circulaire et l'enceinte carrée, mais la lourdeur de la méthode ne leur a pas permis de faire une étude systématique de l'influence des paramètres géométriques principaux.

Les résultats de ces diverses études étant trop fragmentaires, à l'exception de ceux de KASTNER qui a simulé les écoulements axisymétriques avec une précision de l'ordre du pourcent.

Enfin, l'effet important de la troisième dimension pose le problème de la valeur à donner au débit d'exhaure de ces enceintes ramassées et quelle serait leur influence sur les pertes de charges, et à partir de quelle valeur de la largeur relative du batardeau que cet effet disparaîtra vis-à-vis du débit ? Ces questions importantes pour le praticien, pourront être résolues par l'approche numérique de ces écoulements tridimensionnels et axisymétrique et l'étude du phénomène de renard, en faisant recours aux codes de calculs numériques. Notre choix s'est porté sur les codes aux différences finies **Flac3D** et **Flac2D** dont leur description et présentation fera l'objet du chapitre qui suit.

CHAPITRE III

PRESENTATION DE L'OUTIL NUMERIQUE UTILISÉ

III.1 Introduction

La simulation numérique de l'écoulement autour des écrans étanches est un problème complexe qui présente notamment :

- La résolution par la loi de Darcy est souvent impossible analytiquement.
- Les configurations réelles sont telles (enceintes ramassées) que le problème ne peut être considéré comme plan, ce qui nécessite le recours aux calculs tridimensionnels.

Ces conditions complexes nécessitent un outil numérique bien adapté.

Le développement des grands codes de calcul a évolué de pair avec les langages et le matériel informatique. Beaucoup de ces grands codes ont démarré dans les années 1970 et sont basés sur une conception de type « boîte noire », qui impose en général à l'utilisateur de se plier aux exigences du code, conçu pour résoudre des problèmes donnés. L'outil de simulation numérique ne doit pas être une boîte noire qui offre uniquement une solution aux données introduites. Mais plutôt, il doit permettre aussi des expérimentations numériques. Le code **Flac** respecte cette particularité en offrant à l'utilisateur de tester ses idées, d'introduire ses propres modèles de comportement et de modéliser les séquences de construction.

Nous présentons ici les principes du code **Flac** qui a été utilisé tant pour nos simulations *bidimensionnelles* (axisymétriques) que *tridimensionnelles* de l'écoulement autour un écran étanche. Notons que, Flac3D est l'extension du Flac2D, cependant, il y'a des différences entre les formulations bi et tridimensionnelles, et en particulier dans les modèles mathématiques qui décrivent le mécanisme du système. Cette partie décrira la formulation et sa mise en œuvre en **Flac**.

III.2 GENERALITES

FLAC (Fast Lagrangien Analysis of Continua), c'est un code en différences finies développé par la société Américaine ITASCA Consulting Group. Il simule le comportement des structures en sols, en roches ou autres matériaux qui se plastifient quand leur surface de charge est atteinte. Les matériaux sont représentés par des éléments ou des zones qui forment le maillage ajusté par l'utilisateur pour avoir la forme de l'objet à modéliser. Chaque élément se comporte selon sa description par une loi contrainte/déformation linéaire ou non linéaire aux chargements appliqués ou aux conditions aux limites imposées. Le matériau peut se plastifier et s'écouler, et le maillage peut se déformer (en mode grande déformation) et se déplacer avec le matériau qu'il représente.

Une des spécificités de Flac (et de tous les logiciels ITASCA) est le macro-langage *FISH*, qui permet à l'utilisateur de définir de nouvelles variables, procédures, sorties graphiques, et même d'écrire sa propre loi de comportement. La formulation de Flac est parfaitement adaptée à la modélisation des problèmes de géomécanique en plusieurs phases, comme une séquence excavation-construction-chargement.

Starfield et Cundel (1988), fondateurs du Code Flac, ont insisté que la méthodologie des modélisations numériques en géomécanique doit être différentes de celle de l'ingénierie de structure. Ils ont signalé qu'il est impossible d'obtenir des données complètes sur les sols ou les roches du site ; par exemple : l'état des contraintes initiales, les propriétés et les discontinuités ne peuvent être que partiellement bien connues. Cette situation est incompatible avec la conception suivie dans les logiciels populaires utilisés pour la conception (boite noire qui accepte uniquement d'un côté l'introduction des données et de l'autre côté donne les résultats de prédiction du comportement).

Au contraire, les logiciels en géomécanique doivent être conçus et utilisés pour découvrir les mécanismes en absence des données nécessaires pour la prédiction. Quand le comportement du système est défini, il est approprié d'utiliser des calculs simples de la conception du processus.

D'une autre manière, les logiciels en géomécanique ne doivent être utilisés uniquement dans la conception, mais aussi comme un outil d'expérimentation numérique qui aide et donne au concepteur un aperçu sur les mécanismes possibles.

Avant de discuter les particularités du code Flac2D et Flac3D il est nécessaire de donner un aperçu rapide sur la méthode de différences finies adoptée dans le code Flac (2D et 3D).

III.3 Méthode des différences finies (FDM)

En rendant la complexité des calculs une chose du passé, l'évènement de l'ordinateur a révolutionné les sciences de l'ingénieur, des problèmes, autrefois considérés insolubles avec les méthodes classiques, sont maintenant facilement accessibles avec les méthodes numériques. Une de ces méthodes est la méthode des différences finies. De ce point de vue, elle constitue un outil formidable à la disposition de l'ingénieur.

De nos jours, l'emploi de la méthode s'est généralisé à d'autres domaines en particulier la mécanique des fluides, l'aéronautique, le magnétisme, transfert de chaleur et les problèmes couplés. Elle permet de résoudre tout problème défini par des équations aux dérivées partielles avec conditions aux limites.

Un problème d'ingénierie est généralement représenté par un modèle mathématique ; des équations aux dérivées partielles sur un domaine géométrique avec des conditions aux limites sur les frontières de ce domaine. De plus, étant un problème continu, il possède une infinité de degrés de liberté. A l'exception de quelques cas ayant une géométrie très simple, il est très difficile sinon

impossible de trouver une solution analytique au problème et d'étudier son comportement en une seule opération. Pour trouver une solution, l'ingénieur est donc amené à remplacer le système continu par un système discret équivalent ayant un nombre fini de degré de liberté.

Actuellement, l'ingénieur a le choix entre plusieurs méthodes dont deux méthodes numériques sont très répandues dans le domaine de construction. La MDF est très attrayante par sa simplicité quand il s'agit des problèmes à géométrie régulière. Par contre, elle est très difficile à généraliser aux problèmes à géométrie complexe et des conditions aux limites quelconques. Récemment ce problème est résolu grâce à la programmation de la méthode de Wilkins (KHENNANE. A).

Comme le soulignent Billaux et Cundall (1993), la méthode des différences finies est l'une des plus anciennes méthodes de résolution numérique d'un système d'équations différentielles, pour des conditions initiales et des conditions aux limites données, la solution est unique.

La plupart des méthodes utilisant les différences finies adoptent une discrétisation du milieu en mailles rectangulaires exclusivement. L'approche retenue par ITASCA est basée sur la méthode de Wilkins (1964), qui permet de formuler les équations des différences finies pour des éléments quelconques. On peut leur donner n'importe quelle forme aux limites et, faire varier les propriétés d'un élément à l'autre. De ce point de vue, elle est donc aussi performante que la méthode des éléments finis.

Dans cette méthode, chaque dérivée est remplacée directement par une expression algébrique écrite en fonction des variables de champs (c'est-à-dire les contraintes ou les déplacements) uniquement définis au niveau de points dans l'espace.

De plus, le code Flac se distingue essentiellement par son schéma de résolution explicite, qui permet de ne combiner les matrices élémentaires, ainsi un gain substantiel de place mémoire. En effet, seules les variables à la fin de chaque pas de temps sont stockées et non la matrice de rigidité, comme cela est le cas pour la méthode des éléments finis.

III.4 Schéma de résolution explicite

Dans ce paragraphe, nous n'allons pas nous intéresser en détail à la méthode de résolution implantée à l'intérieur du code mais uniquement au mode de fonctionnement. Le lecteur intéressé peut se reporter à Marti & Cundall [1982] qui décrit la procédure plus finement.

Basé sur le fait que dans la réalité, une partie de l'énergie de déformation accumulée par le système est convertie en énergie cinétique qui va se propager et se dissiper dans le matériau environnant, le schéma de résolution explicite intègre ce phénomène en prenant en compte les équations dynamiques du mouvement. Le déséquilibre induit en une zone va se propager dans l'ensemble du massif. L'objectif de la méthode aux éléments lagrangiens n'en reste pas moins la résolution d'un problème statique ou quasi-statique par l'intermédiaire de la dynamique.

Le mode incrémental de résolution du système assure la stabilité du schéma numérique puisque même si le système est instable à certains instants les chemins de contraintes et de déformations sont respectés à chaque pas. La **Figure III.1** précise bien quant à elle la séquence de calcul utilisée. Cette procédure fait d'abord appel aux équations du mouvement afin de calculer les vitesses et les déplacements à partir de l'accélération, déduite de la résultante des forces et des contraintes. Alors, les déformations sont déduites des déplacements (intégrales des vitesses), et les nouvelles contraintes de ces déformations au travers des relations du modèle rhéologique.

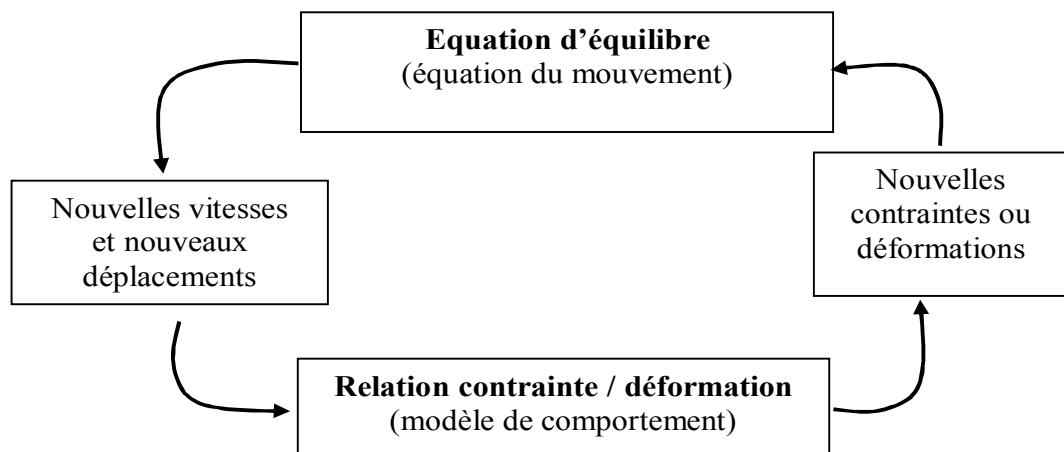


Figure III.1 : Séquence de calcul générale (Billiaux [1993]).

Dans chaque boîte de calcul de la **Figure III.1** on remet à jour toutes les variables à traiter à partir de valeurs connues qui doivent, elles, restées fixes durant les calculs dans cette boîte. Ainsi le calcul de nouvelles contraintes n'affecte pas les vitesses calculées dans la boîte précédente. Cette hypothèse est justifiée si un pas de temps assez petit est choisi de manière à ce que l'information ne puisse pas passer d'un élément à l'autre au cours de cet intervalle de temps. Des éléments voisins ne pourront donc pas s'influencer pendant une période de calcul.

Tout ceci se base sur l'idée que la vitesse de l'« onde de calcul » est toujours supérieure à celle des ondes physiques ce qui permet de figer les valeurs connues et utilisées pour la durée des calculs. Pour constituer un algorithme opérationnel, les mouvements doivent être amortis de manière à arriver à un état stationnaire (*équilibre* ou *écoulement permanent*) en un minimum de cycles et en un pas de temps le plus grand possible afin d'éliminer le risque d'instabilités numériques.

L'amortissement utilisé consiste à imposer à chaque nœud une force d'amortissement dont le module est proportionnel au module de la force nette non équilibrée et, dont la direction est telle qu'elle produit toujours un travail négatif. Cette forme d'amortissement artificiel permet aux forces de volume de s'évanouir à l'état stationnaire. La constante d'amortissement sans dimension, ne dépend pas des propriétés du système et, permet un amortissement variable d'un point à

l'autre (Cundall [1987]). La procédure de résolution explicite n'étant pas inconditionnellement stable, il est nécessaire que la vitesse du front de calcul soit plus grande que la vitesse maximale de propagation de l'information, pour cela le choix du pas de temps est important en effet il doit être plus petit qu'un certain pas de temps critique (Billiaux [1993]).

Enfin, le critère de convergence pour contrôler la fin des cycles de calcul est simplement basé sur l'état d'équilibre de l'ensemble des éléments. Le programme teste pour chacun des éléments le déséquilibre de force et retient la force maximale non équilibrée. L'utilisateur définit la force en deçà de laquelle la convergence est supposée suffisante.

Ainsi formulée, la méthode de résolution implémentée dans Flac présente des avantages et des inconvénients si on tente de la comparer à d'autres méthodes bien connues telle que la méthode implicite généralement utilisée en éléments finis.

Le **Tableau III.1** résume ces différences. Notons qu'au cours d'un pas de calcul, aucune itération n'est nécessaire pour calculer les contraintes à partir des déformations quelque soit le type de comportement envisagé pour le sol.

Explicite	Implicite
Le pas de temps doit être inférieur à une valeur critique pour assurer la stabilité.	Pas de restriction sur le pas de temps, au moins pour certains schémas de résolution.
Peu de calculs par pas de temps.	Nombreux calculs par pas de temps.
Pas d'amortissement numérique significatif introduit pour les problèmes dynamiques.	Amortissement numérique dépendant du temps pour les schémas inconditionnellement stables.
Prise en compte de lois de comportement non linéaires sans itérations supplémentaires.	Nécessité d'une procédure itérative pour la prise en compte de comportements non linéaires.
Si le pas de temps est inférieur à sa valeur critique, une loi non linéaire est toujours suivie d'une manière correcte.	Il est toujours nécessaire de démontrer que la procédure est : (a) stable ; et (b) physiquement correcte, c'est-à-dire qu'elle permet de suivre un chemin de contraintes physiquement correct.
Aucune matrice n'est construite. La mémoire nécessaire est minimum.	Une matrice de rigidité doit être stockée. La mémoire nécessaire est importante.
Aucune matrice n'étant construite, des grandes déformations et de grands déplacements peuvent être pris en compte avec quasiment aucun calcul supplémentaire.	Des calculs supplémentaires sont nécessaires pour suivre de grandes déformations et de grands déplacements.

Tableau III.1 : Comparaison entre les méthodes explicite et implicite (Cundall [1980]).

Toutefois, le critère sur le pas de temps conduit nécessairement à un nombre de cycles de calcul importants, ce qui rend cette méthode peu performante pour les problèmes linéaires en petites déformations.

Il semble donc que le domaine de prédilection d'une méthode explicite soit l'étude de systèmes comprenant par exemple des non-linéarités, de grandes déformations ou des instabilités physiques. La prise en compte de la réelle complexité d'un site comportant de manière générale ce type de problèmes, la résolution explicite constitue donc une méthode bien adaptée aux types de difficultés auxquels nous nous sommes intéressés.

III.5 Forces non équilibrées (UNBALANCED FORCE)

Dans un modèle à éléments finis, il est nécessaire que le processus de chargement soit représentatif de celui subi réellement par le massif. On y arrive en décomposant le chargement total en incréments de charge chaque incrément étant suffisamment petit pour que la solution converge après quelques itérations, malgré la réponse non linéaire du massif.

Toutefois, au fur et à mesure que le système modélisé devient de plus en plus non-linéaire et que l'incrément de chargement devient de plus en plus petit par rapport au chargement total, la technique incrémentale devient similaire à la modélisation d'un comportement quasi dynamique du massif, répondant à l'application graduelle du chargement total.

Afin de surmonter cela, une technique de relaxation dynamique a été proposée (Otter et al, 1966) et a été appliquée, en premier, aux géomécaniques par Cundall (1971). Dans cette technique, des forces non équilibrées agissent au niveau de points d'intégration matériels, et provoquent une accélération de la masse associée à ces points, en appliquant les lois du mouvement de Newton. Un nouveau bilan des forces est alors dressé pour chaque point d'intégration matériel dans le modèle.

Cette technique d'amortissement a pour effet une accélération de la convergence et réduit considérablement les effets d'oscillation mécanique. De plus, elle a l'avantage de pouvoir gérer des non-linéarités à la fois géométriques et rhéologiques, pour un surcoût de calcul relativement faible qui dépend linéairement du nombre d'éléments utilisés.

Par ailleurs, la divergence numérique révèle en général dans le modèle des comportements provoqués par des anomalies physiques (amorce de rupture, hétérogénéité des matériaux). Une fois que le modèle a été divisé en éléments, que les propriétés des matériaux ont été assignées et que les chargements ont été appliqués, certaines techniques doivent être utilisées pour redistribuer les forces non équilibrées, et donc déterminer la solution du nouvel état d'équilibre. La méthode des différences finies cherche pour cela à minimiser l'énergie potentielle totale du système, afin d'établir les relations d'équilibre : les déplacements sont les inconnues de ces équations simultanées. La force maximale non équilibrée est déterminée pour l'ensemble des mailles. L'évolution de cette force peut être affichée sur l'écran ou visualisée comme un graphe. Cette force est importante pour l'indication de l'équilibre du modèle.

Notons **R** le rapport en pourcentage de la force non équilibrée maximale sur la force interne représentative. Une valeur de R de 1% à 0.1% peut être acceptable pour l'indication de l'équilibre en fonction du degré de précision voulu : R = 1% peut être suffisante pour une étape intermédiaire dans une séquence d'opération, tandis que R = 0.1% peut être utilisée pour un état final.

III.6 Présentation du code bidimensionnel (Flac2D)

Flac2D a été conçu pour opérer dans un espace *bidimensionnel*. Bien souvent, il est possible de tirer parti des symétries du système étudié, afin de réduire la complexité du modèle, et donc les temps de calcul. Ainsi, un maillage d'éléments finis de massif n'est pas systématiquement à trois dimensions. En effet, si l'une des dimensions de l'ouvrage est prépondérante (remblai de grande largeur, section courante d'un tunnel, etc.) et toutes les autres caractéristiques du modèle (chargement, conditions aux limites, interfaces) le permettent, il est possible d'analyser l'ouvrage dans un *plan*. Cette analyse, dite en déformations *planes*, suppose que la composante du déplacement perpendiculaire au plan considéré est uniformément nulle.

L'utilisateur construit alors son maillage dans un plan, mais admet implicitement qu'il bénéficie d'une profondeur égale à l'unité. Les forces appliquées sur ce type de modèle ne s'expriment pas en Newton, mais en Newton par mètre (force par unité de longueur).

L'utilisation de modèles *bidimensionnels* permet bien sûr de réduire considérablement les temps de calcul, mais rend surtout possible le raffinement géométrique des systèmes étudiés. En effet, pour de nombreux problèmes *tridimensionnels*, les maillages raffinés sont difficiles, voire impossibles à réaliser car la taille des systèmes matriciels peut très vite dépasser la capacité des ordinateurs utilisés. Par conséquent, les maillages sont fréquemment plus grossiers dans le cas *tridimensionnel* que dans le cas *bidimensionnel* et la modélisation est plus approximative.

Le code Flac2D intègre de nombreux modèles constitutifs, adaptables à un grand nombre de matériaux, géologiques ou non. Chacun d'entre eux nécessite l'apport de paramètres mécaniques spécifiques, descriptifs de la rhéologie du matériau.

Les modèles disponibles dans Flac2D sont : modèle nul (pour les sols retirés ou excavés), élasticité isotrope ou anisotrope, élasto-plasticité (cam-clay modifié, Druker-Prager, Mohr-coulomb standard ou avec écrouissage positif (ou négatif) et écrouissage et changement de volume, élasto-plasticité (Mohr-Coulomb) avec plan de discontinuité localisé (faille, etc.))

En effet, on note que nos simulations à l'aide du code Flac2D se feront en problèmes à **axe de symétrie** (*batardeaux circulaires*), en faisant appel à la commande : **config gw axi** implantée dans ce code.

III.7 Présentation du code tridimensionnel (Flac3D)

Flac3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3D) est un outil avancé pour des études complexes de géotechnique et d'interaction sol-roche / structures. C'est un code qui est utilisé dans l'analyse, essai, et dessin par ingénieurs géotechniques, civil et des mines, et il a une grande gamme d'application parce que sa possibilité analytique n'est pas limitée à une définition du problème particulière ou type d'analyse.

Grâce à ses nombreuses fonctionnalités, Flac3D résout de multiples problèmes :

- dimensionnement de pentes, talus ou fouilles et analyse de leur stabilités ;
- dimensionnement de fondations superficielles et profondes ;
- étude de barrages en terre ou en béton ;
- excavations souterraines avec phasage complexes ;
- interaction Sol-Structure ;
- matériaux à loi de comportement spécifique développée par l'utilisateur.

III.7.1 Formulation du modèle 3D en différences finies explicite

On rappelle que Flac3D est un programme en différences finies explicite. Il a pour but d'étudier numériquement le comportement mécanique du milieu continu en trois dimensions quand il atteint l'état d'équilibre ou écoulement stationnaire plastique. La réponse observée du modèle est extraite d'une part, du modèle mathématique particulier, et de la mise en œuvre numérique spécifique d'une autre part.

III.7.2 Description du modèle mathématique

La mécanique du milieu est dérivée des principes généraux (définition de la force, loi du mouvement), et l'utilisation des équations qui définissent le milieu. Les expressions mathématiques qui en résultent sont la mise des équations différentielles aux dérivées partielles (EDP), qui relient les variables mécaniques (contraintes) et variables cinétiques (force et vitesse), qui doivent être résolues pour une géométrie particulière avec leur propriétés, et conditions initiales et aux limites. Un aspect important du modèle est l'inclusion des équations du mouvement, bien que, Flac3D est concerné principalement par l'état des contraintes et déformations du milieu au voisinage de l'état d'équilibre.

III.7.3 Formulation numérique

La méthode de solution adoptée en Flac3D est caractérisée par les trois approches suivantes :

1. approche en différences finies (espace en 1^{er} ordre et dérivées par rapport au temps du variable sont approximés par les différences finies, supposant des variations linéaires de la variable autour de l'espace fini et l'intervalle du temps, respectivement) ;
2. approche du modèle discret (le milieu continu est remplacé par un milieu discret équivalent, où toutes les forces appliquées sont concentrées aux nœuds du maillage tridimensionnel utilisé dans la représentation du modèle) ;
3. approche de la solution dynamique (les termes d'inertie dans l'équation du mouvement sont utilisés comme moyens numériques pour atteindre l'état d'équilibre du système considéré).

Les lois du mouvement du milieu continu sont, au biais de ces approches, transformées en formes discrètes de la loi de Newton aux nœuds. Le système résultant des équations différentielles

ordinaire est alors résolu numériquement en utilisant une approche dans le temps en différences finies explicites. Les dérivées spatiales impliquées dans la dérivation du milieu équivalent sont celles qui apparaissent dans la définition des forces dans les termes de vitesse.

Dans le but de définir les variations de la vitesse et l'intervalle de l'espace, le milieu est discrétisé en éléments de forme tétraédrale où les vitesses sont des nœuds du maillage mentionné ci-dessous et représenté sur la **Figure III.2** suivante.

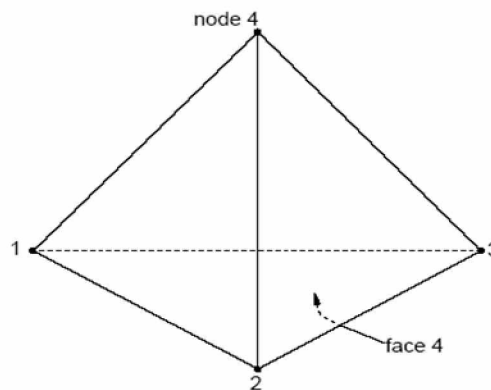


Figure III.2 : Tétraèdre.

III.7.4 Nomenclature

Le code Flac3D utilise une nomenclature qui est consistante, en général, avec laquelle sont utilisés en convention les programmes des différences ou éléments finis pour l'analyse des contraintes.

Ici pour clarification, la **Figure III.3** illustre la terminologie de Flac3D.

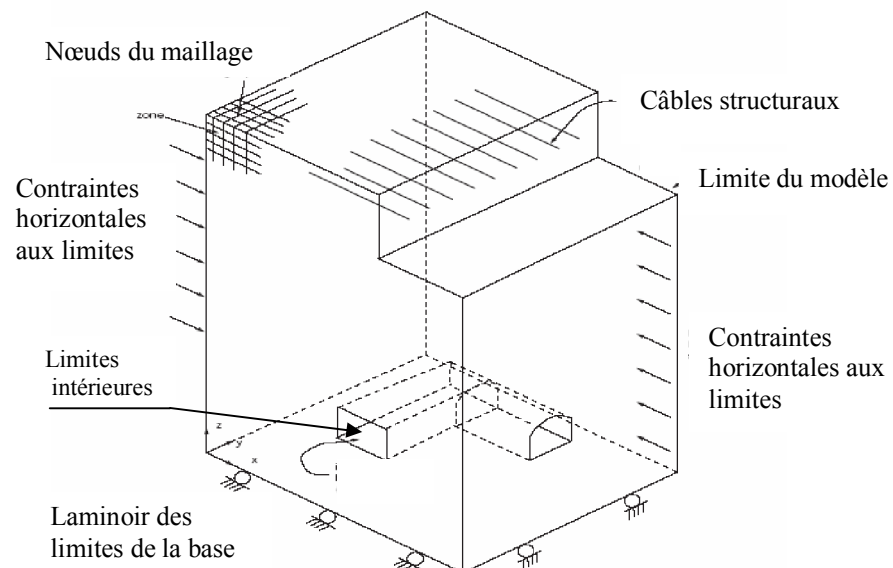


Figure III.3 : Exemple du modèle Flac3D.

a) Modèle Flac3D

Le modèle Flac3D est créé par l'utilisateur pour simuler le problème physique. En référant aux commandes qui définissent les conditions du problème pour la solution numérique.

b) La zone en différence finie est le petit domaine géométrique dans lequel le changement dans les phénomènes (exemple : les contraintes) est évalué. Les zones polyédrales de différentes formes (exemple : les zones en forme brique, pyramide et tétraèdre) sont utilisées pour créer et voir la perspective des modèles.

c) Zone nulle

Les zones nulles sont des zones qui représentent des vides (i.e., aucun matériau n'est présent) à l'intérieur du maillage en différences finies.

d) Nœuds de maillage

Ils sont associés avec les coins des zones en différences finies. Il y a cinq, six, sept ou huit nœuds du maillage associés avec chaque zone polyédrale, dépendant de la forme des zones. Des coordonnées x , y et z sont attribuées à chaque nœud du maillage, ainsi spécifient l'emplacement exacte des zones en différences finies. .

e) Conditions aux limites

Ce sont la prescription des conditions contrôlées ou CONTRAINTE autour des limites du modèle (exemple : les déplacements ou forces fixés pour les problèmes mécaniques, limites imperméables pour les problèmes *d'écoulement souterrain*).

f) Conditions initiales

C'est l'état de toutes les variables dans le modèle (exemple : *pressions interstitielles*) préalables pour n'importe quel changement de chargement ou TROUBLE (telle que : excavation).

g) Modèle constitutif

Le modèle constitutif représente le comportement de la déformation et les forces décrites pour les zones du modèle Flac3D. Plusieurs modèles constitutifs sont disponibles en Flac3D pour assimiler les différents types de comportements communs associés avec les modèles géologiques. Le modèle constitutif et les propriétés du matériau peuvent être attribués individuellement dans les modèles en Flac3D.

h) Sous maillage (SUB-GRID)

Le maillage en différences finies peut être composé par des sous mailles. Ces dernières peuvent être utilisées pour créer des régions de différentes formes dans le modèle (exemple : le sous maillage d'un *barrage* peut être placé sur le sous maillage de la fondation). Le sous maillage est généré séparément, déplacé et attaché en ensemble.

i) Interface

Une interface est la connexion entre les mailles qui peuvent être séparées (exemple : baisse ou ouverture) pendant le processus de calcul. Une interface peut représenter une discontinuité physique comme l'interface entre deux différents matériaux.

j) Groupe

Le groupe en modèle Flac3D renvoie à la collection des zones identifiées par un seul nom. Les groupes sont utilisés pour limiter le rang de certaines commandes de Flac3D, comme pour la commande *MODEL* qui attribue les modèles matériels aux groupes désignés.

III.7.5 La solution statique

La solution statique est atteinte en Flac3D lorsque le taux de changement de l'énergie cinétique dans le modèle s'approche d'une valeur négligeable. Ceci est obtenu en appliquant l'équation du mouvement. A la fin de l'étape de l'état statique, le modèle sera à l'état d'équilibre ou l'état de *l'écoulement permanent* du matériau si une part ou tout le modèle est instable au-dessous des conditions des charges appliquées. Ceci est le calcul par défaut de Flac3D. Les solutions statiques mécaniques peuvent être couplées pour *l'écoulement souterrain* transitoire ou les solutions de transfert de chaleur.

III.7.6 La solution dynamique

Pour la solution dynamique, toutes les équations dynamiques de mouvement (y compris les termes d'inertie) sont résolues; la génération et la dissipation de l'énergie cinétique affectent directement la solution. Les solutions dynamiques sont nécessaires pour les problèmes provoquant de haute fréquence et charges de courtes durées. (Exemple : chargement séismique ou explosive). Le calcul dynamique est un modèle optionnel pour Flac3D.

III.7.7 Le maillage en différences finies

Le maillage en différences finies recouvre le domaine physique analysé. Le petit maillage qui peut être analysé par Flac3D constitué seulement d'une seule zone. Plusieurs problèmes, cependant, sont définis par des mailles constituées de centaine ou de milliers de zones. Le maillage en Flac3D est spécifié par les coordonnées x , y et z . Tous les nœuds du maillage et les zones centrées sont définies par le vecteur position $v(x,y,z)$.

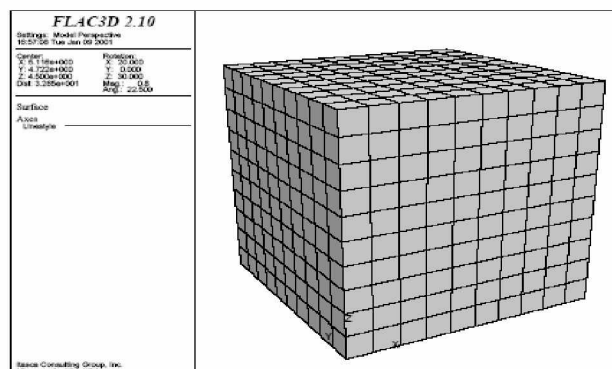


Figure III.4 : Maillage en différences finies avec 1000 zones.

III.7.8 Création de fichiers de données en Flac3D

L'utilisateur a le choix d'exécution de Flac3D interactivement (i.e., entrer les commandes de Flac3D dans son environnement) ou via des fichiers de données (appelés aussi '*batch file*'). Le fichier de données est un fichier créé par l'utilisateur contenant les commandes de Flac3D pour le problème à analyser. En général, la création des fichiers de données est la bonne méthode pour utiliser Flac3D. On fait appel aux fichiers de données par la commande CALL. Il est recommandé que l'extension commune des fichiers de données soit '*.DAT' pour entrer des données, et l'extension '*.FIS' pour les fonctions *FISH* en Flac3D afin de distinguer un fichier des autres types de fichiers.

Flac3D est basé sur un format de commande parce que la plupart des analyses exigent l'utilisation de fichiers d'entrée de données. Flac3D peut être employé comme « laboratoire numérique » pour examiner des idées. L'utilisateur implique un ordre des commandes qui définissent les conditions de problème pour la solution numérique.

Flac3D opère sous toutes les plates-formes Windows, avec opération du mode de commandes disponibles dans une fenêtre de la production standard. Flac3D fournit des formes primitives construites et résolution rapide, hautes capacités graphiques pour activer le processus de la modélisation. Les paramètres de la solution peuvent être spécifiés par l'utilisateur, en maximisant le contrôle de l'utilisateur sur la durée, longueur, et efficacité de l'exécution du modèle. Le contrôle supplémentaire et personnalisé sont disponibles à l'utilisateur à travers le langage de programmation construit puissant de Flac3D, FISH.

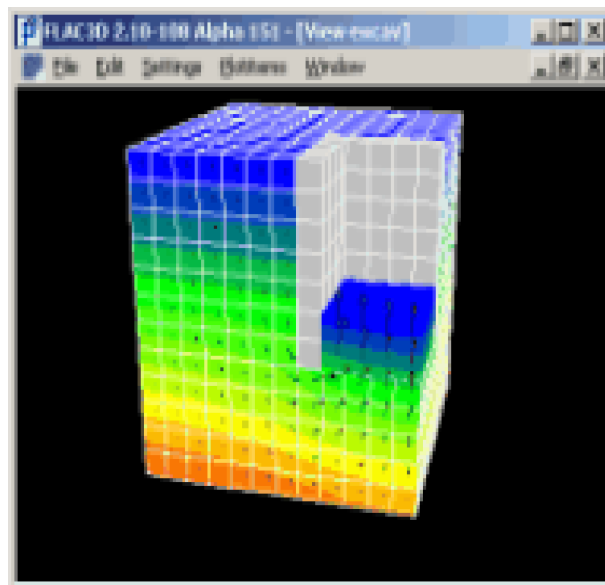


Figure III.5 : Sorte graphique d'un modèle Flac3D.
Excavation dans un sol saturé.

III.7.9 Méthodologie de simulation avec Flac3D

Afin d'installer un modèle pour réaliser une simulation avec Flac3D, trois composants fondamentaux d'un problème doivent être indiqués :

1. Générer le maillage ;
2. Définir les paramètres constitutifs ; et
3. Appliquer les conditions initiales et aux limites.

La **Figure III.6** (adoptée du manuel Flac3D) présente les grandes lignes de la stratégie utilisée pour modéliser l'excavation d'une tranchée. La simulation se fait par phase et la réponse du système est systématiquement examinée après chacune des phases de calcul pour s'assurer de la validité des résultats.

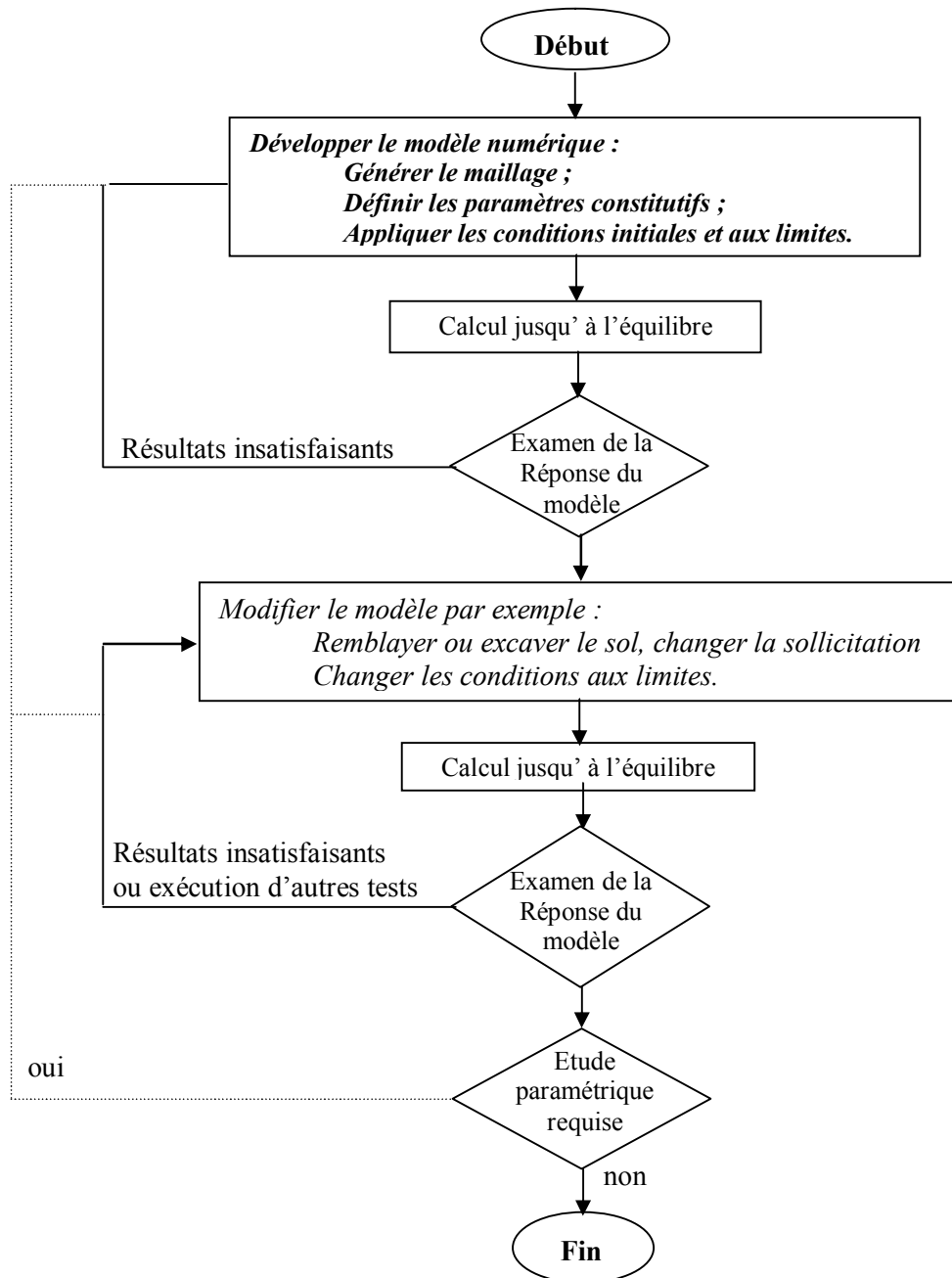


Figure III.6 : Méthodologie de modélisation numérique avec Flac (ITASCA Manuel).

III.7.10 Génération de maillage

La génération de maillage dans Flac3D implique de raccorder l'ensemble des formes de maillage de la connectivité spécifique (désignée sous le nom des *primitives*) pour former un modèle complet avec la géométrie désirée. Plusieurs types de formes primitives sont disponibles, et ceux-ci peuvent être reliés et conformés pour créer les géométries tridimensionnelles complexes.

Le maillage de Flac3D est produit avec la commande GENERATE zone. Cette commande peut être employée indépendamment pour créer un modèle reparti en zones d'une forme primitive ; chaque forme a un type spécifique de connectivité.

Plusieurs formes primitives sont établies dans le générateur pour accélérer la génération de maillage pour des formes de problème simple. Ceux-ci incluent la brique, la cale, la pyramide et des formes de cylindre.

Orientation des noeuds et les faces dans les zones en Flac3D

On rappelle qu'une zone est le domaine géométrique fermé, avec des noeuds aux sommets et des faces formant la surface de celle-ci. L'orientation relative des noeuds et les faces est montrée sur la **Figure III.7**. Pour les cinq formes primitives du maillage : la brique, pyramide, brique et tétraèdre dégénérés. Chaque face a des *verticaux* ; ces derniers sont identifiés aussi sur la **Figure III.7**.

Plusieurs commandes de Flac3D et le langage *FISH*, se rapportent à cette orientation.

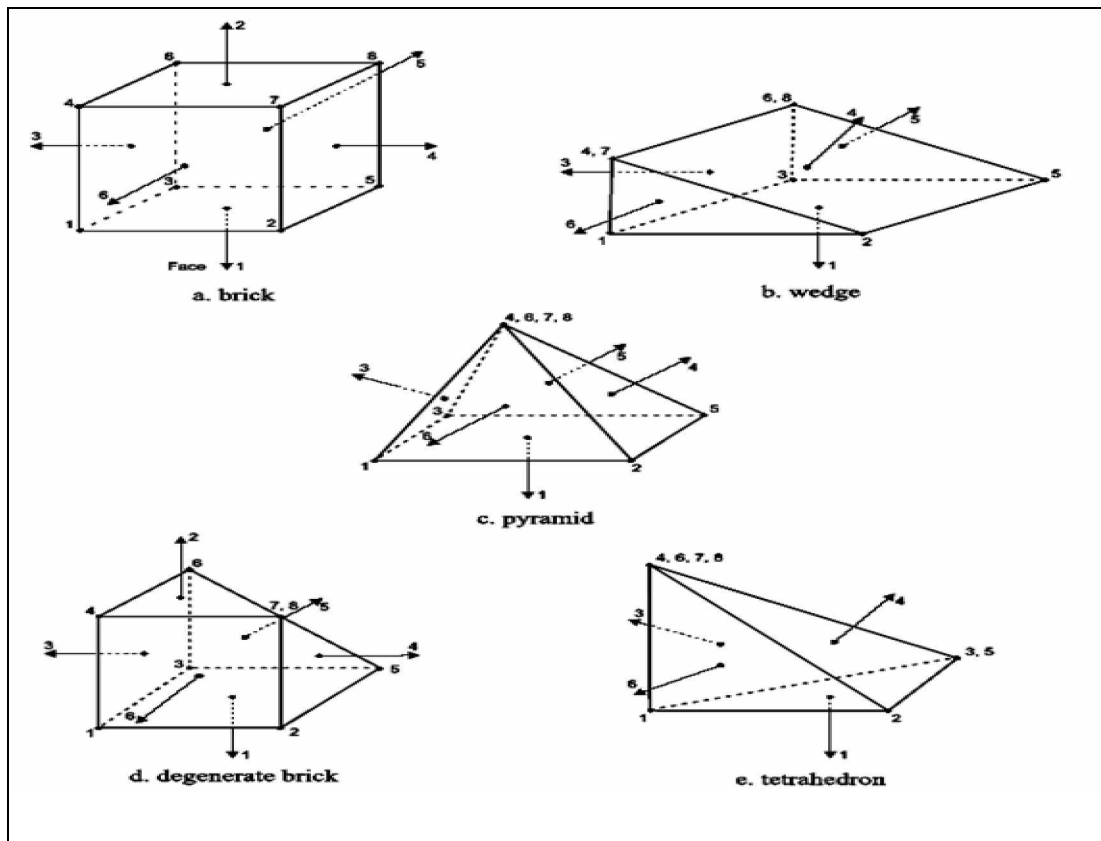


Figure III.7 : Géométrie des zones.

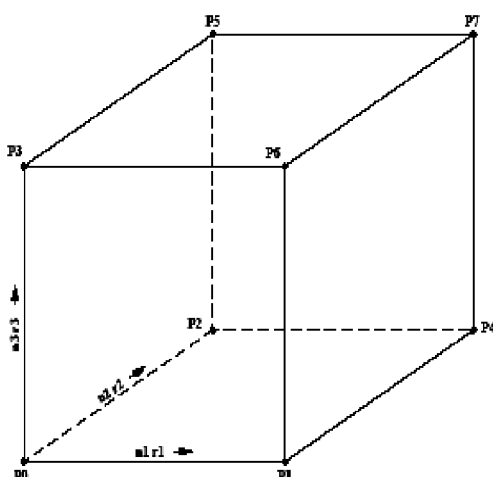


Figure III.8 : Maillage d'une brique- brick

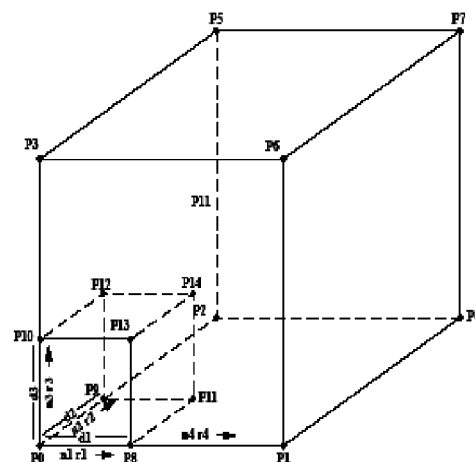


Figure III.9 : Maillage gradué d'une brique – radbrick.

III.8 Modélisation de l'écoulement

III.8.1 Modélisation de l'écoulement en Flac

Dans le cas général, les terrains sont en partie baignés par des nappes d'eau en équilibre hydrostatique ou en écoulement. La présence de cette eau dans les espaces interstitiels entre les grains induit des effets mécaniques sur le sol : forces d'écoulement appliquées aux grains, poids déjaugé et consolidation.

Si la perméabilité du sol est élevée, le mouvement de l'eau est instantané et la pression interstitielle n'est pas modifiée. Ainsi, dans le cas d'un remblai construit sur un sol perméable, la pression interstitielle est constamment égale à la pression interstitielle initiale.

En revanche, si la perméabilité du sol est faible par rapport à la vitesse de variation des contraintes, l'eau interstitielle ne peut s'écouler de manière instantanée et se met en surpression qui se dissipe dans le temps (*le sol se consolide*).

Le comportement d'un sol perméable est toujours un comportement à long terme (*condition drainée*). Alors que le comportement d'un sol peu perméable évolue entre deux comportements extrêmes :

- Un comportement à court terme lorsque le sol vient d'être chargé ou déchargé. Aucune variation de volume n'a encore pu se produire et les variations des contraintes normales sont reportées totalement ou en partie sur l'eau interstitielle (*condition non drainée*) ;
- Un comportement à long terme lorsque la surpression interstitielle due au chargement du sol s'est dissipée et que le régime d'écoulement de l'eau est devenu permanent (*condition drainée*).

Duncan (1996) a indiqué que, pour les problèmes faisant intervenir des chargements non exceptionnels, les sols dont le coefficient de perméabilité est supérieur à 10^{-6} m/s peuvent être analysés en conditions drainées et les sols de coefficient de perméabilité inférieur à 10^{-9} m/s en condition non drainée.

Flac modélise l'écoulement de l'eau dans le milieu poreux tel que le sol, soit indépendamment de l'effet mécanique (calcul hydromécanique découplé), soit en tenant compte de l'interaction sol-fluide (hydromécanique couplé). Ce dernier type de comportement induit deux effets mécaniques. Dans le premier, le changement de la pression interstitielle génère un changement en contraintes effectives qui peuvent affecter la réponse du solide. A titre d'exemple, une réduction des contraintes effectives peut induire un écoulement plastique. Dans le deuxième, le fluide réagit par un changement de pressions interstitielles à la variation mécanique du volume.

La formulation de l'écoulement de Flac est basée sur des relations simples, en utilisant la loi de Darcy pour un milieu poreux anisotrope. L'effet de gravité est incorporé dans la formulation afin de permettre à l'eau de migrer en toute zone non totalement saturée.

Avec cette formulation, une surface libre apparaît naturellement dans un calcul d'écoulement.

Dans le cas des problèmes couplés drainés, la convergence au régime statique peut être très lente (plusieurs pas de calcul mécanique sont nécessaire pour garder l'équilibre quasi statique) quand le module volumique de l'eau est très grand par rapport au module de confinement du sol $K + (4/3) G$. Plusieurs stratégies de modélisation sont disponibles en Flac pour approcher les différents processus couplés. L'une consiste à supposer que les pressions interstitielles nodales soient fixes. Cette approche ne nécessite pas de mémoire supplémentaire dans le calcul. Elle peut être représentative dans le cas des sols grossiers baignés par une nappe statique sans écoulement. Les pressions interstitielles se dissipent au fur et à mesure, que le changement est appliqué et que l'on peut considérer que le champ de pressions d'eau est invariant. Ce champ de pression d'eau se traduit par des actions simples sur le sol et les éléments de structure. Ainsi, le sol se trouve simplement déjaugé tandis que les éléments de structure se trouvent soumis à des champs de pressions simples.

Les autres stratégies de Flac utilisent la configuration **Ground water (Config GW)** pour l'analyse de l'interaction sol - fluide. Les plus élaborées nécessitent plus de temps et de mémoire.

III.8.2 Modélisation de l'écoulement en Flac3D

Le code Flac3D manie les deux écoulements complètement saturés, aussi bien que l'écoulement dans lequel une surface phréatique se développe. Dans ce cas, les pressions interstitielles sont nulles au-dessus de la surface phréatique et la phase de l'air est considérée comme passive. La logique est

applicable aux matières grossières quand les effets capillaires peuvent être négligés. Les caractéristiques suivantes sont fournies avec la capacité de l'écoulement du fluide :

1. Deux lois de transport de fluide qui correspondent à la perméabilité *isotrope* et *anisotrope* sont disponibles. Le modèle nul de l'écoulement du fluide est aussi fourni pour spécifier des milieux imperméables dans le domaine de l'écoulement.
2. Différentes zones peuvent avoir différents modèles d'écoulement (isotrope, anisotrope ou nul) et propriétés.
3. Les pressions du fluide, flux et les conditions aux limites peuvent être prescrites.
4. Les sources du fluide (puits) peuvent être insérées dans le milieu comme point sources ou source volume. Ces sources correspondent à l'écoulement entrant ou écoulement sortant et varie avec le temps.
5. Les deux algorithmes de solutions explicite et implicite de l'écoulement du fluide sont disponibles complètement pour les simulations des sols saturés. Une méthode explicite de solution est utilisée pour l'écoulement saturé/non saturé.
6. Coupler entre les calculs mécaniques et hydrauliques dus aux grains déformables est fourni à travers le coefficient *Biot*, α .
7. Coupler au calcul thermique est fourni à travers l'expansion du coefficient thermique linéaire, α_t , et du coefficient thermique non drainé, $\hat{\alpha}$.
8. La logique de l'écoulement thermique du fluide est basée sur une théorie linéaire qui assume des propriétés constantes du milieu et des négligences de la convection. Les températures du fluide et du solide sont équilibrées localement.

III.8.3 Modélisation de l'écoulement de l'eau avec le calcul de la surface phréatique

Flac3D modélise l'écoulement de l'eau dans lequel une surface phréatique se développe, comme l'écoulement entièrement saturé. Les pressions interstitielles sont nulles au-dessus de la surface phréatique et la phase d'air est négligée en tant que passive. La logique appliquée aux matériaux suppose que les effets capillaires peuvent être négligés.

Deux lois de transport des liquides sont disponibles correspondant à la perméabilité isotrope et anisotrope. Le modèle nul d'écoulement du fluide est fourni pour indiquer les matériaux imperméables, et les différentes zones peuvent avoir des différents modèles et propriétés de l'écoulement du fluide.

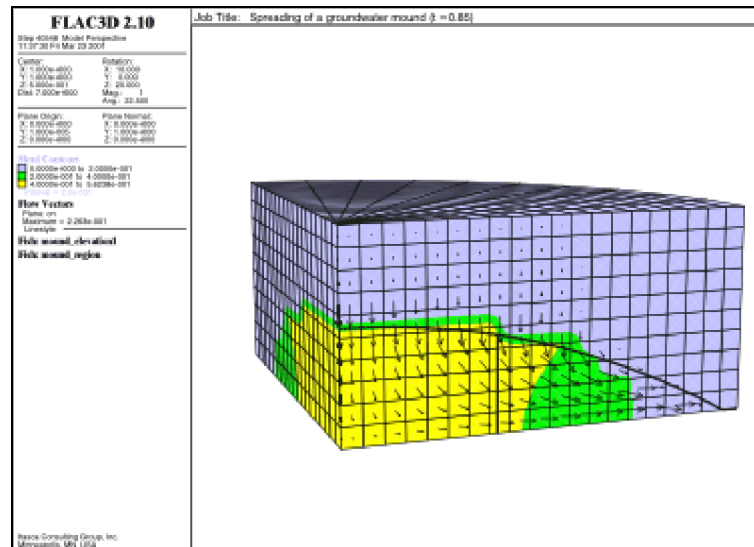


Figure III.10 : Propagation d'un monticule d'eaux souterraines dans un milieu saturé.

III.9 Modèles de comportement

Après avoir présenté le code de calcul, nous allons maintenant décrire brièvement les modèles de comportement de sol, et les éléments d'interface permettant d'introduire des non-linéarités géométriques qui peuvent être rencontrées au cours de la résolution des problèmes.

Le code Flac3D incorpore un grand nombre de lois constitutives. Celles-ci peuvent être regroupées en trois catégories : nulle, élasticité, plasticité. Il est possible de modifier ou d'ajouter des lois de comportement en utilisant le langage de programmation *FISH*.

a) Le modèle *Elasto-Plastique de Mohr-Coulomb* dans *Flac3D*

La surface de charge pour ce modèle correspond à un critère Mohr-Coulomb (rupture en cisaillement) avec critère supplémentaire de rupture par traction. La position d'un point de contrainte sur cette surface est contrôlée selon une règle non associée pour la rupture en cisaillement et une règle associée pour la rupture en traction. Tout champs de contraintes peut être exprimé en termes de contraintes principales σ_1 , σ_2 , σ_3 (**Figure 3.11**) et déformations principales ϵ_1 , ϵ_2 et ϵ_3 . La convention de signe dans Flac3D, attribuant des valeurs *negatives* à la compression, et *positives* à la traction.

Le critère de rupture dans le modèle Flac3D est Mohr-Coulomb composée avec critère de rupture en traction. Les contraintes principales sont ordonnées de la manière suivante :

$$\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3 \quad \text{(III.9)}$$

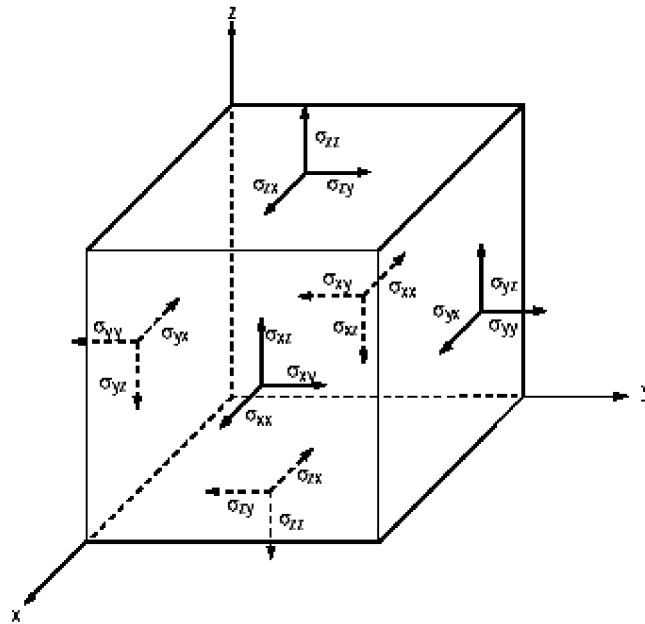


Figure III.11 : Convention de signe des contraintes principales induites dans un élément.

Paramètres du modèle

Ce modèle est appelé par la commande *Mod M*, les paramètres sont donnés par la commande *prop* comme suit :

1. **bulk** : module du volume, K ;
2. **shear** : module de cisaillement, G ;
3. **cohesion** : cohésion du sol ;
4. **friction** : angle de frottement interne ;
5. **dilation** : angle de dilatance, ψ ;
6. **tension** : contrainte limite de traction.

b) Modèle de comportement de l'interface

Les éléments d'interface sont utilisés pour représenter de manière simplifiée le comportement des joints ou les couches minces, et les liaisons entre éléments de structure et éléments de sol/roche.

Flac3D représente des interfaces comme collections d'éléments triangulaires (éléments d'interface), dont chacun est défini par trois nœuds (nœuds d'interface). Des éléments d'interface peuvent être créés à n'importe quel emplacement dans l'espace. Généralement, des éléments d'interface sont fixés à une face de surface de zone ; deux éléments triangulaires d'interface sont définis pour chaque face quadrilatérale de zone.

Des nœuds d'interface sont alors créés automatiquement à chaque sommet d'élément d'interface. Quand une autre surface de modèle entre en contact avec un élément d'interface, le contact est détecté au nœud d'interface, et est caractérisé par des rigidités normales et le cisaillement, et des propriétés de glissement.

La relation fondamentale de contact est définie entre le nœud d'interface et une face de surface de zone, également connus sous le nom de *face de cible*. La direction normale de la force d'interface est déterminée par l'orientation de la face de cible.

Le modèle constitutif est défini par un critère de résistance au cisaillement de Coulomb qui limite la force de cisaillement agissant à un nœud d'interface, des rigidités normales et de cisaillement, contraintes de traction et cisaillement, et un angle de dilatance qui cause une augmentation de la force normale effective sur la facette cible après que la limite de résistance de cisaillement soit atteinte. La **Figure III.12** illustre les composantes du modèle constitutif agissant au nœud d'interface (**P**).

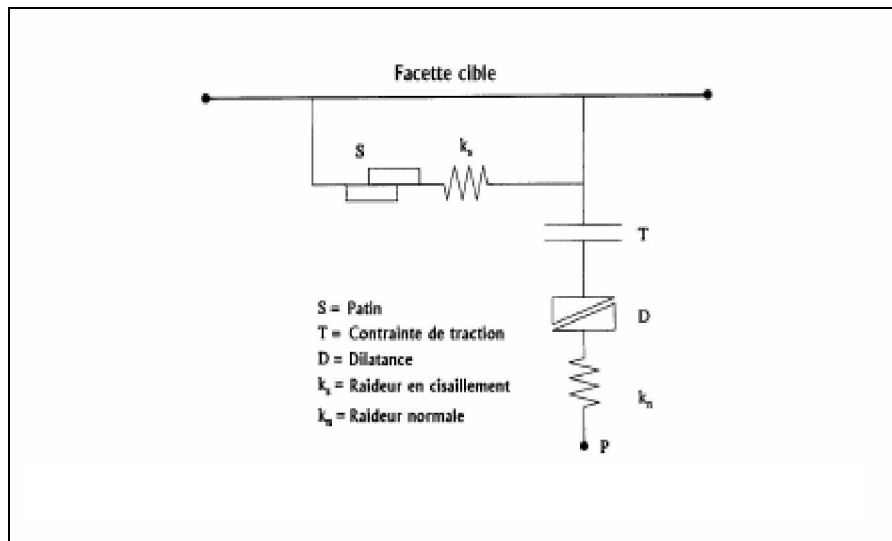


Figure III.12 : Détail des composants d'un élément d'interface (Itasca Flac3D).

Les contacts d'interface sont détectés seulement aux nœuds d'interface et les forces de contact sont transférées seulement aux nœuds d'interface. Les propriétés d'interface sont associées à chaque nœud ; les propriétés peuvent varier du nœud au nœud.

Par défaut, l'effet de *pression interstitielle* est inclus dans le calcul d'interface en employant la contrainte effective comme la base pour la condition de glissement.

Choix des propriétés mécaniques

L'attribution des propriétés mécaniques (en particulier rigidité) à une interface dépend de la manière dans laquelle l'interface est employée. D'une manière générale les valeurs recommandées par les auteurs de Flac consistent à prendre K_n et K_s dix fois plus élevés que la raideur équivalente de la zone voisine la plus raide. La rigidité apparente d'une zone dans la direction normale est :

$$\max \left[\frac{\left(k + \frac{4}{3} G \right)}{\Delta z_{\min}} \right] \quad (\text{III.1})$$

Où :

K et G sont le module volumique et de cisaillement respectivement ; et Δz_{\min} est la plus petite dimension dans la direction normale (voir **Figure III.13**).

La notation $\text{Max} []$ indique que la valeur maximale sur toutes les zones adjacentes à l'interface doit être employée.

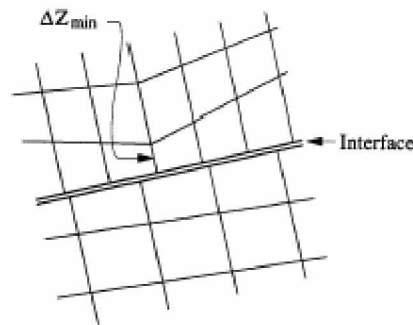


Figure III.13 : Dimension de la zone utilisée pour le calcul des raideurs (Itasca Flac3D).

Cette recommandation permet de ne pas pénaliser les temps de calcul lors de la prise en compte d'une interface.

Les propriétés mécaniques des joints sont conventionnellement dérivées de tests en laboratoire (c'est-à-dire de cisaillement direct et tests triaxiaux), ces essais peuvent fournir des propriétés physiques pour l'angle de frottement, la cohésion, l'angle de dilatance et traction limite, aussi bien que les rigidités normaux et de cisaillement.

Paramètres du modèle

Les paramètres à définir sont :

1. **cohesion** : cohésion de l'interface ;
2. **dilation** : angle de dilatance de l'interface ;
3. **friction** : angle de frottement de l'interface ;
4. **Kn** : rigidité normale ;
5. **Ks** : rigidité de cisaillement;
6. **tension** : contrainte limite de traction.

III.10 Conclusion

La modélisation numérique de l'écoulement autour d'un écran étanche à l'aide d'un code de calcul par différences finies ou, par éléments finis nécessite une modélisation nécessairement approchée d'une réalité complexe. Cela conduit à faire un certain nombre de choix qui concernent aussi bien les paramètres de l'outil numérique que le modèle de comportement utilisé.

Pour simuler l'écoulement autour d'un écran étanche, nous avons retenu le code de calcul Flac. La discrétisation en différences finies suivant l'approche de Wilkins [1964] et, la résolution explicite en éléments lagrangiens lui permettent de simuler des problèmes fortement non linéaire (modules de sols, interfaces), de géométrie complexe (tunnels non circulaires, éléments de soutènement représentés par des coques) avec une bonne stabilité numérique.

L'exploitation des résultats d'un calcul tridimensionnel nécessite une large gamme de représentations graphiques pour l'examen et la représentation des résultats à chaque étape de l'analyse, le code Flac3D donne la possibilité de la définition rapide des vues et sorties graphiques à partir de l'interface graphique.

La décision d'élaborer un modèle tridimensionnel dépend certe 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.

Les progrès réalisés en matière de moyens informatiques, d'algorithmes de résolution rapides et efficaces, et de pré- et post-processeur graphique conviviaux et performants devraient aider ce type d'analyse à s'imposer dans les années à venir.

Finalement, et en conséquence de la complexité mathématique des problèmes l'existence et l'unicité de la solution ne peuvent être démontrées qu'avec des hypothèses restrictives peu applicables à des problèmes réels. Une connaissance expérimentale préalable du problème est toujours indispensable à la formulation mathématique et pour une fiabilité des prévisions numériques (INGEL, RYHMING & R. GOOUGNOT [2002]).

Ce chapitre a été donc l'occasion de présenter l'outil numérique qui sera employé dans la suite du travail. La validation du modèle numérique sera présentée au cours du chapitre suivant.

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_e ; 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 :

- génération du maillage ;
- conditions initiales et aux limites ;
- choix du modèle constitutif et propriétés du matériau ;
- chargement et séquence de modélisation ;
- 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 tridimensionnel 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 coté $b=2r$ 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 coté $b=2r$ 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.

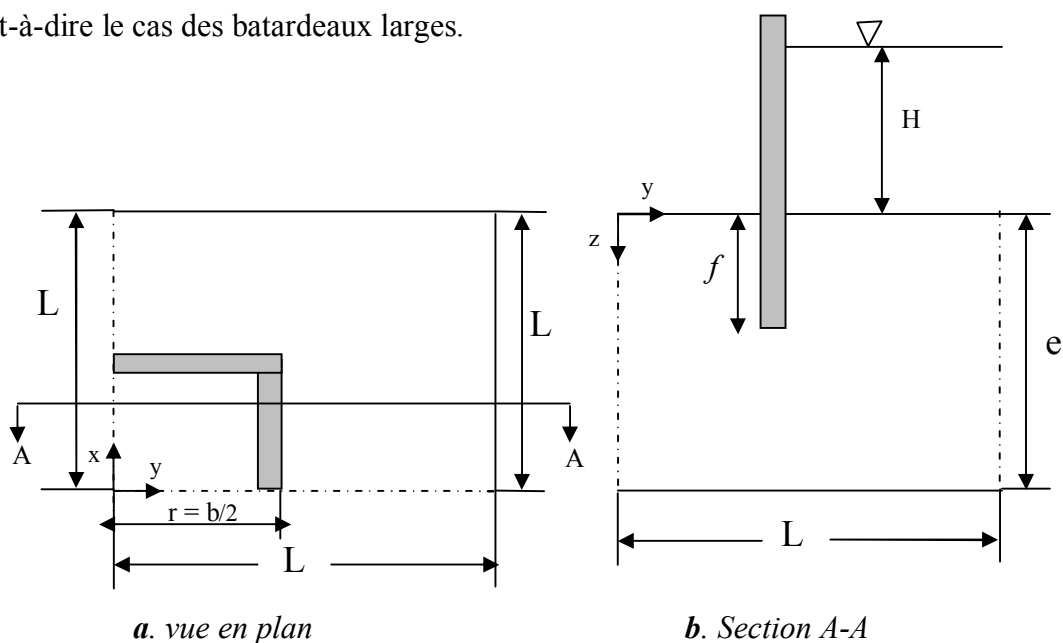


Figure IV.1 : Batardeau carré sans fouille.

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 coté 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 10³PA

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 $2r/e$.

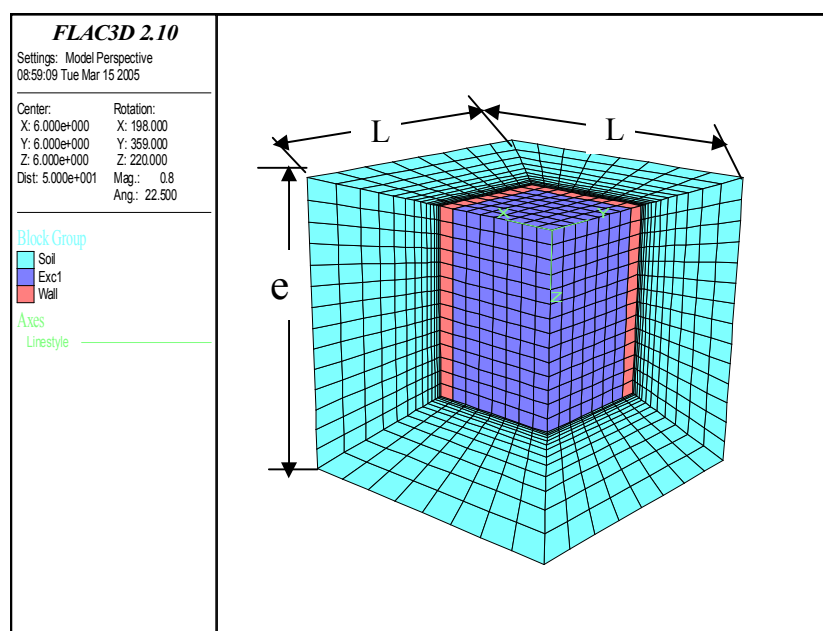


Figure IV.2 : Le maillage adopté en Flac3D - Batardeau carré sans fouille.

- 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 côté 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 $X \text{ m} \times Y \text{ m} \times Z \text{ m}$; le maillage a un nombre total de zones cubiques de $X \times Y \times Z$ de dimensions $x \text{ m} \times y \text{ m} \times z \text{ m}$. 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.

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.

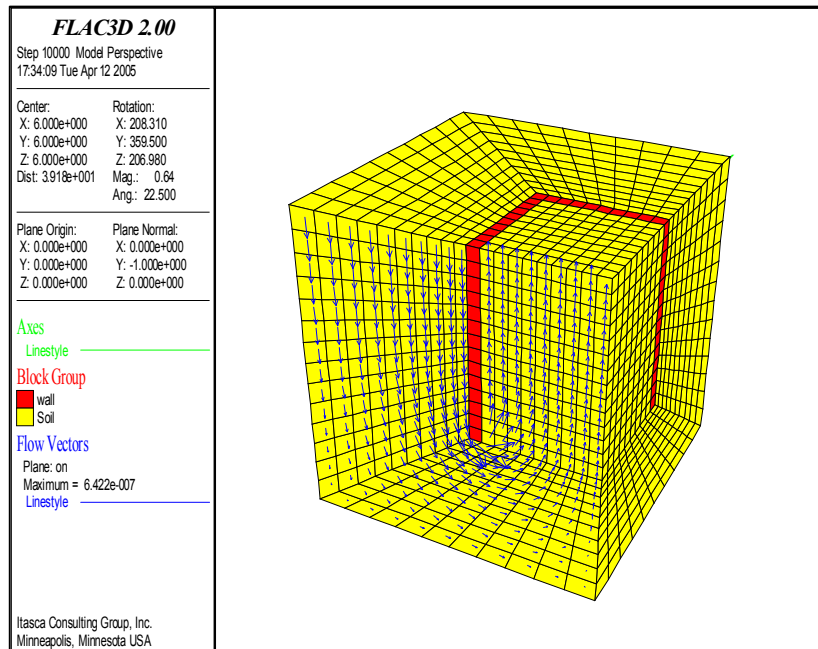


Figure IV.3 : Visualisation de face de l'écoulement pour un modèle Flac3D - Batardeau carré sans fouille– Après calcul.

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 $f/e = 1/8$.

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 $Q_e \approx Q_s$.

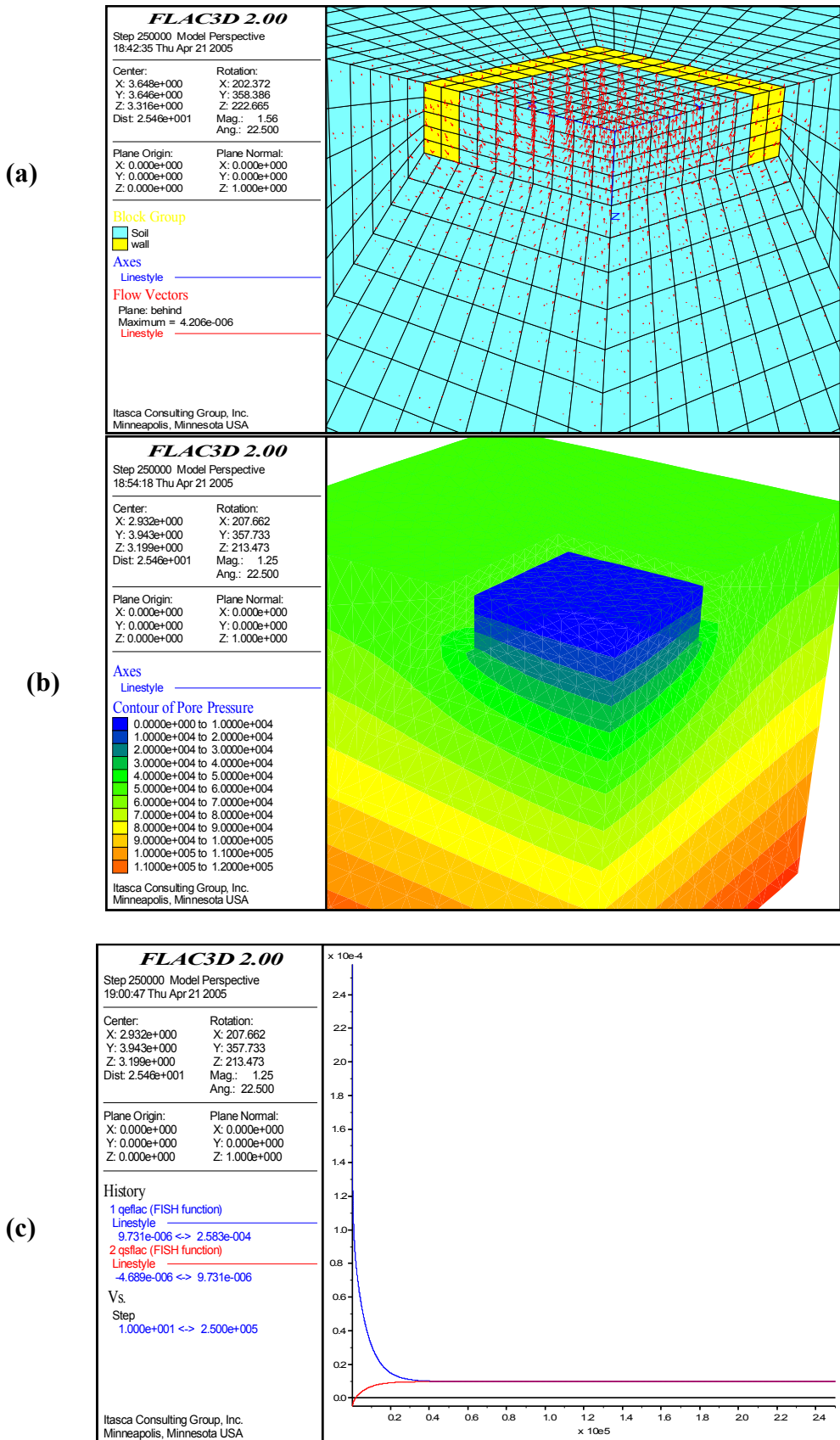


Figure IV.4 : Modèle Flac3D : $2r/e = 0.67, f/e = 1/8$, (a) Vecteurs de l'écoulement permanent (b) Contour de distribution des pressions interstitielles en état d'écoulement permanent, (c) Historique du débit entrant et débit sortant (convergence des calculs).

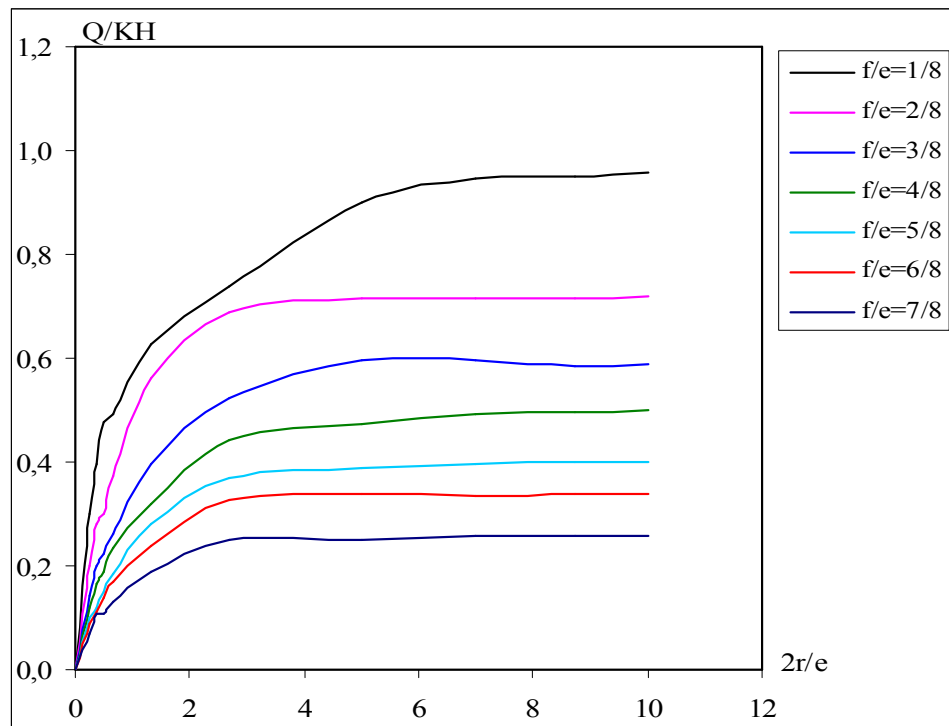


Figure VI.5 : Variation du débit total en fonction de $2r/e \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$.

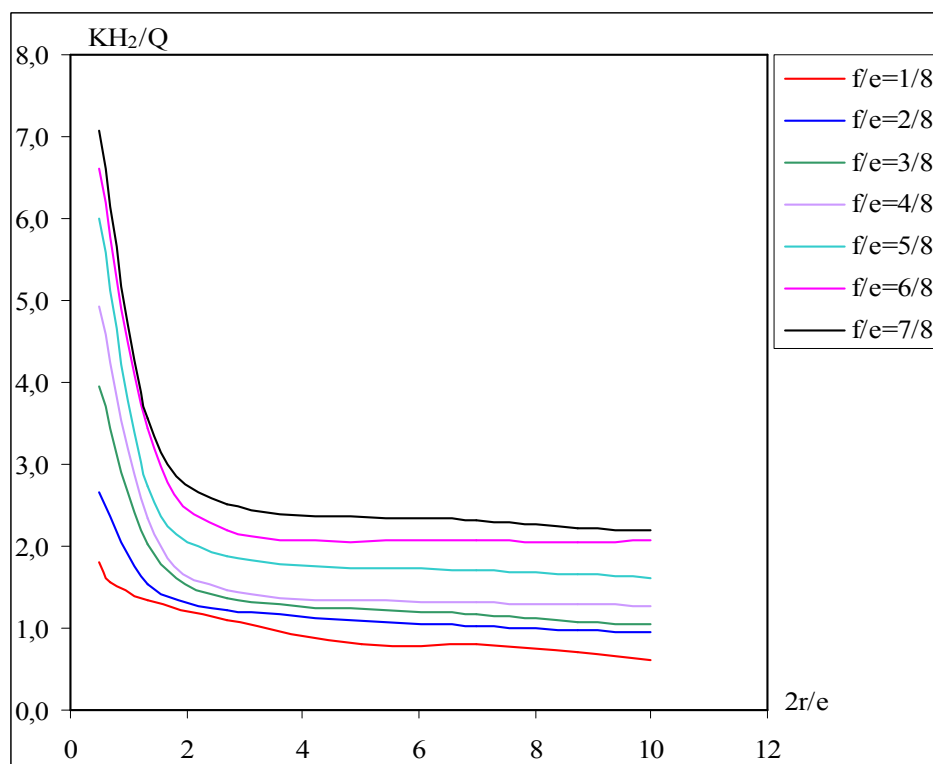


Figure VI.6 : Variation des pertes de charge en fonction de $2r/e \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté aval.

Analyse des résultats

La Figure IV.5 montre clairement la pente 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.

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.

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.

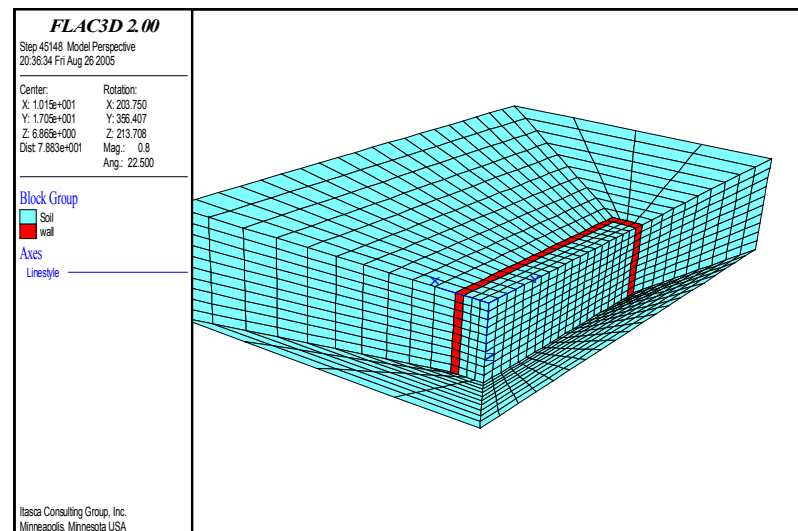


Figure IV.7 : Le maillage adopté en Flac3D
- Batardeau rectangulaire sans fouille -

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

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

$$0.125 < f/e < 0.875$$

qui comprend la gamme de KASTNER :

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

$$0.125 < f/e < 0.875$$

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.

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 $f/e = 1/8$.

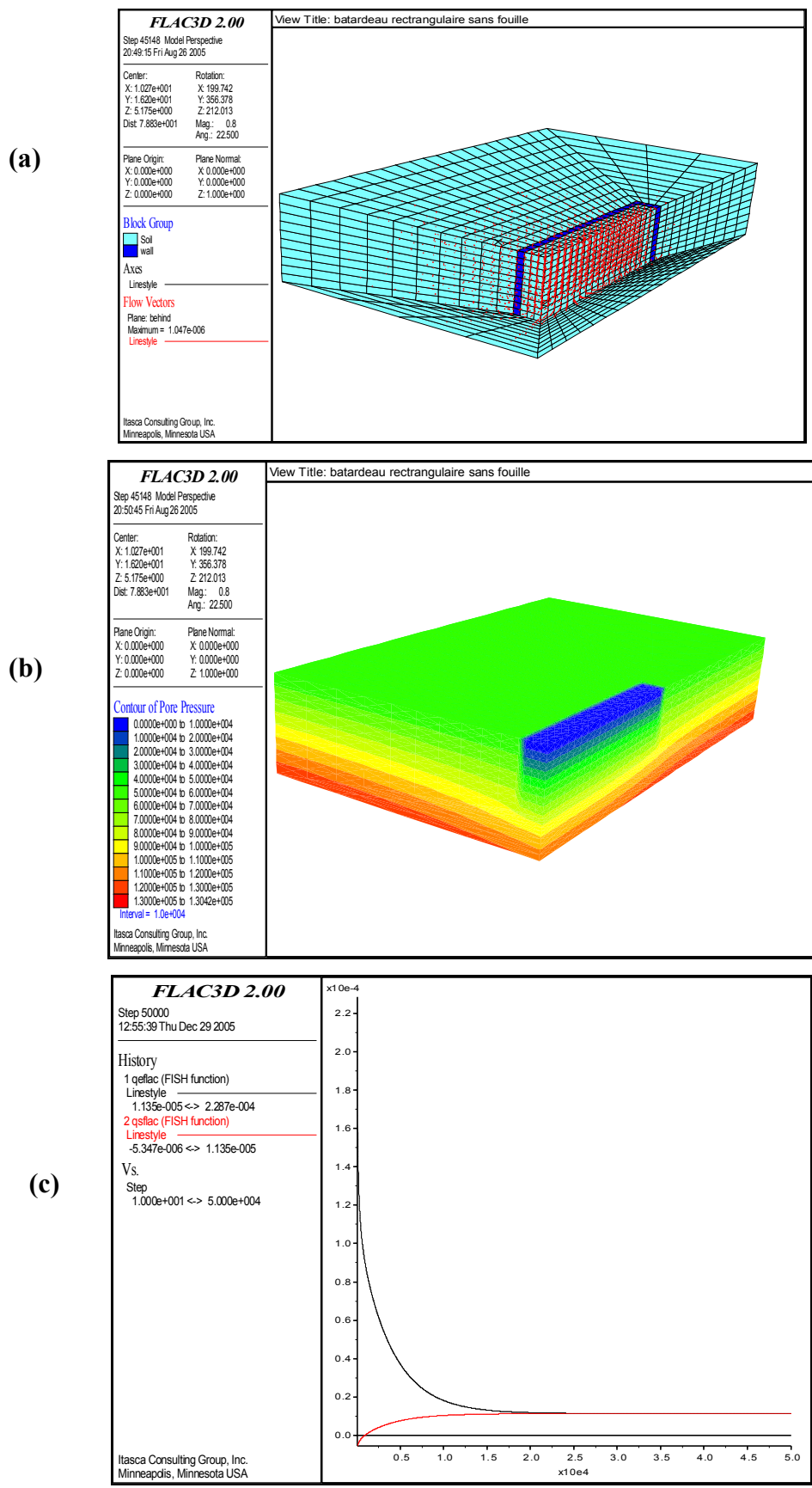


Figure IV.8 : Modèle Flac3D : $2R/e = 2.7$, $r=2m$ et $f/e = 4/8$, (a) Vecteurs d'écoulement (b) Contour de distribution des pressions interstitielles en état d'écoulement permanent, (c) Historique du débit entrant et débit sortant (convergence des calculs).

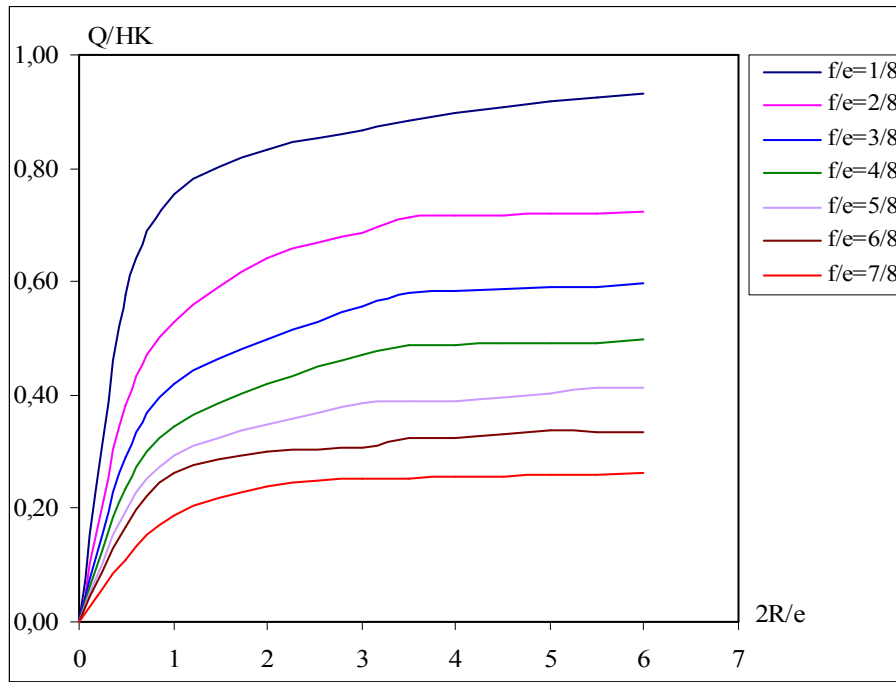


Figure IV.9 : Variation du débit total en fonction de $2R/e \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$.

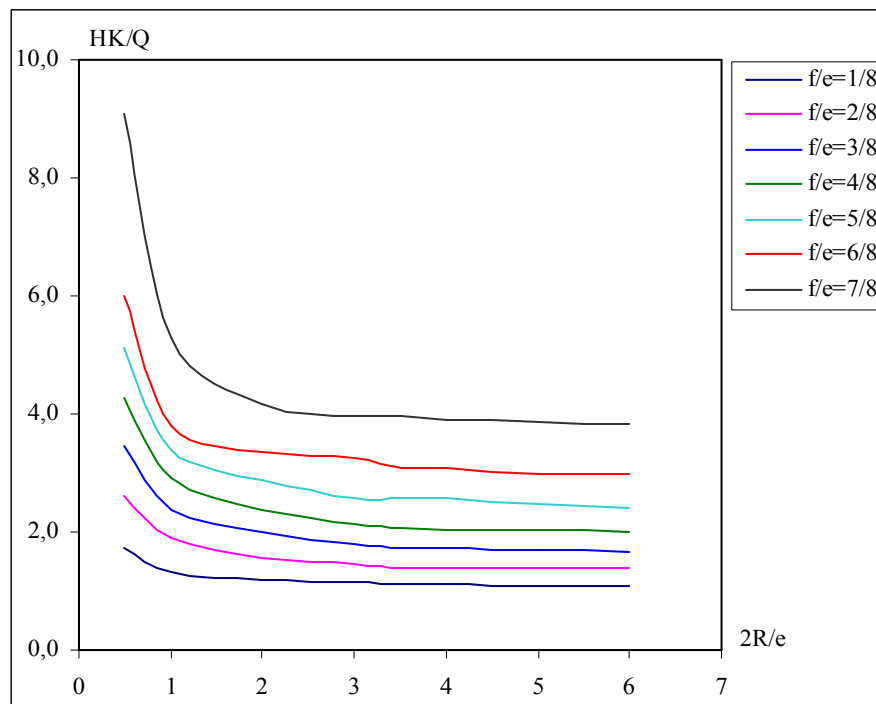


Figure IV.10 : Variation des pertes de charge totales en fonction de $2R/e \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$.

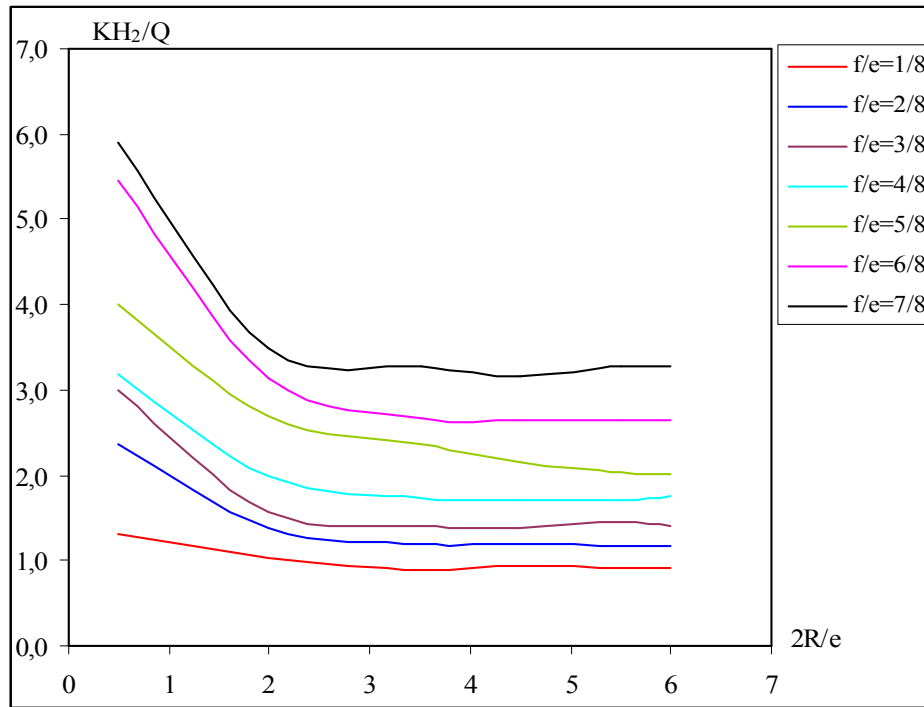


Figure IV.11 : Variation des pertes de charge en fonction de $2R/e \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté aval.

- 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.

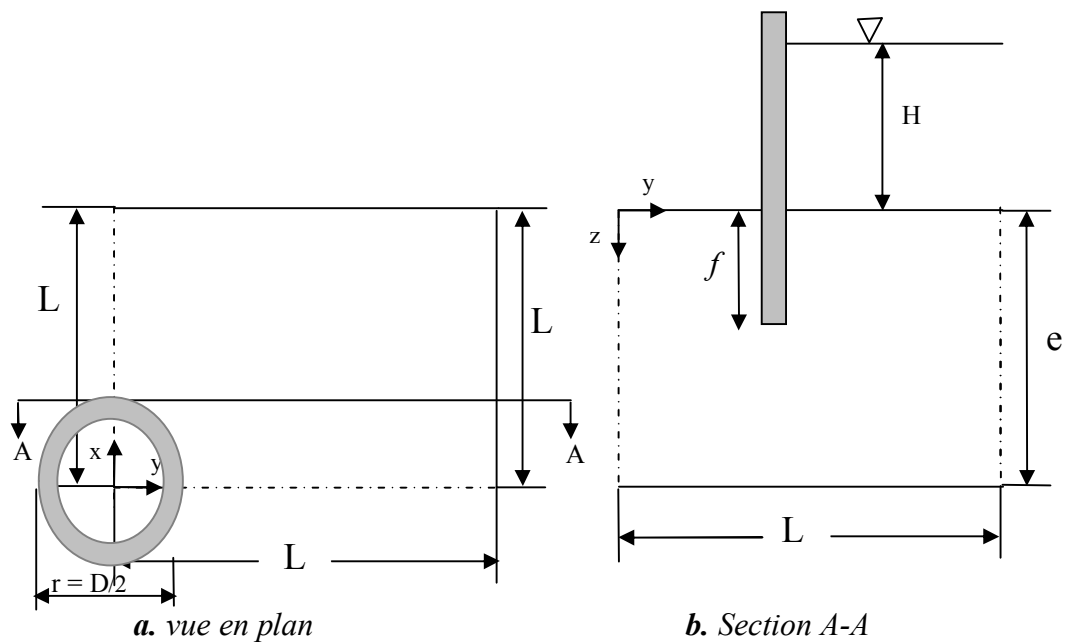


Figure IV.12 : Batardeau circulaire sans fouille.

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/m^3
- Le module de cisaillement, G $1e8$ MPA
- La cohésion coh $1e8$
- La tension $1e10$
- Le module g du vecteur de gravité peut être rapproché à 10 m/s^2 .
- La densité de l'eau, ρ_w 1000 kg/m^3
- La densité de l'écran, ρ_{wallr} 1500 kg/m^3
- La perméabilité, k 10^{-10} $m^2/Pa \cdot s$
- La porosité, n 0.3
- Le module volumique du fluide, K_f $1.0 \cdot 10^3$ 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 .

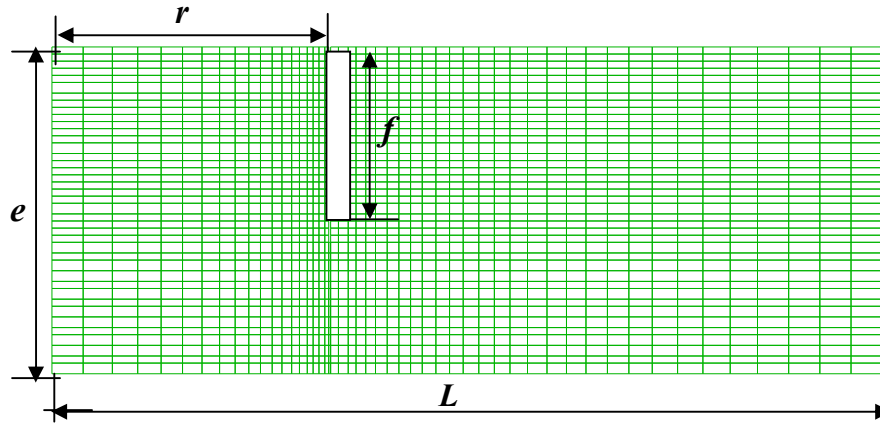


Figure VI.13 : Détail du maillage axisymétrique adopté en Flac2D.
Batardeau circulaire sans fouille.

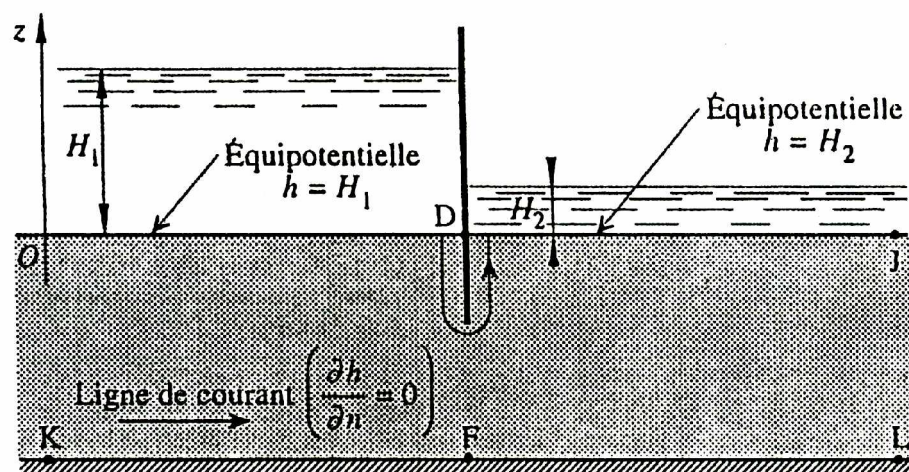


Figure VI.14 : Conditions aux limites hydrauliques.

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.

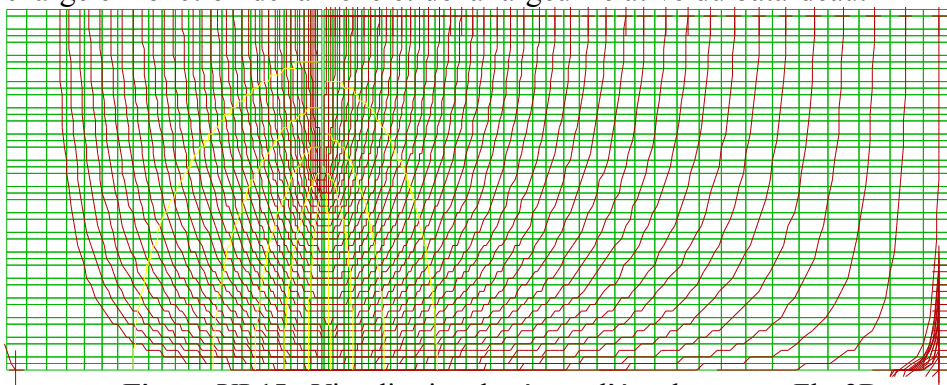


Figure VI.15 : Visualisation du réseau d'écoulement en Flac2D.

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.

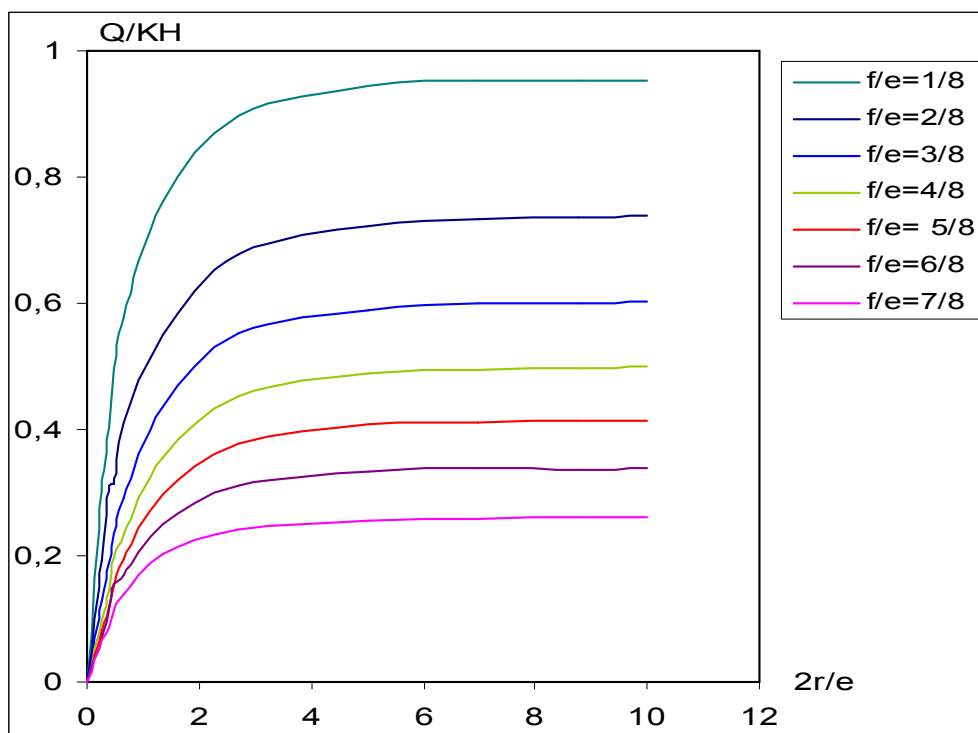


Figure VI.16 : Variation du débit total en fonction de $2r/e$.

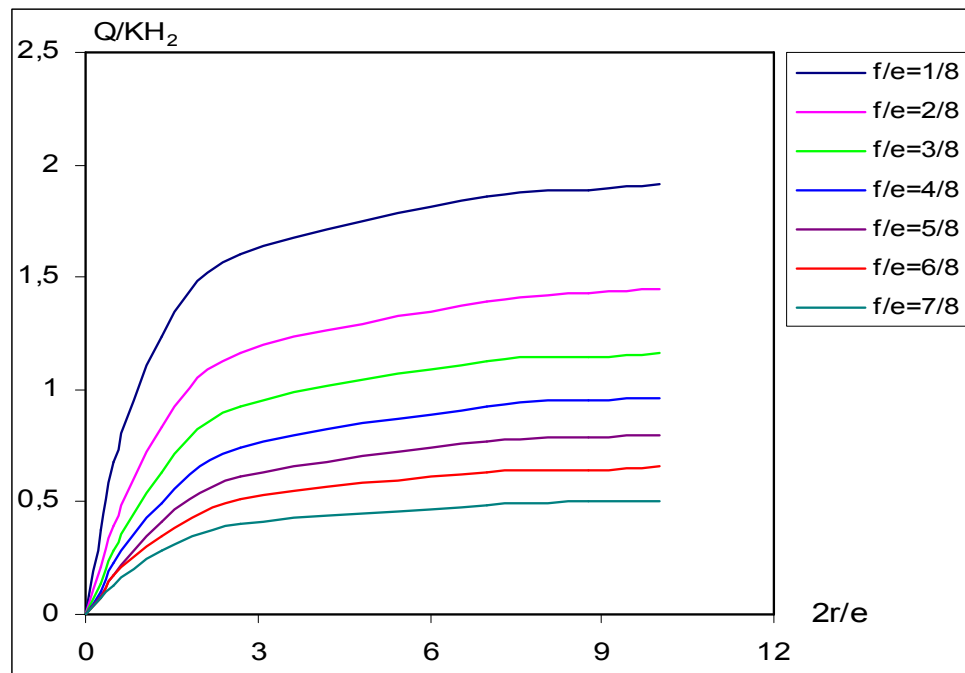


Figure VI.17 : Variation du débit en fonction de $2r/e$ dans le coté aval.

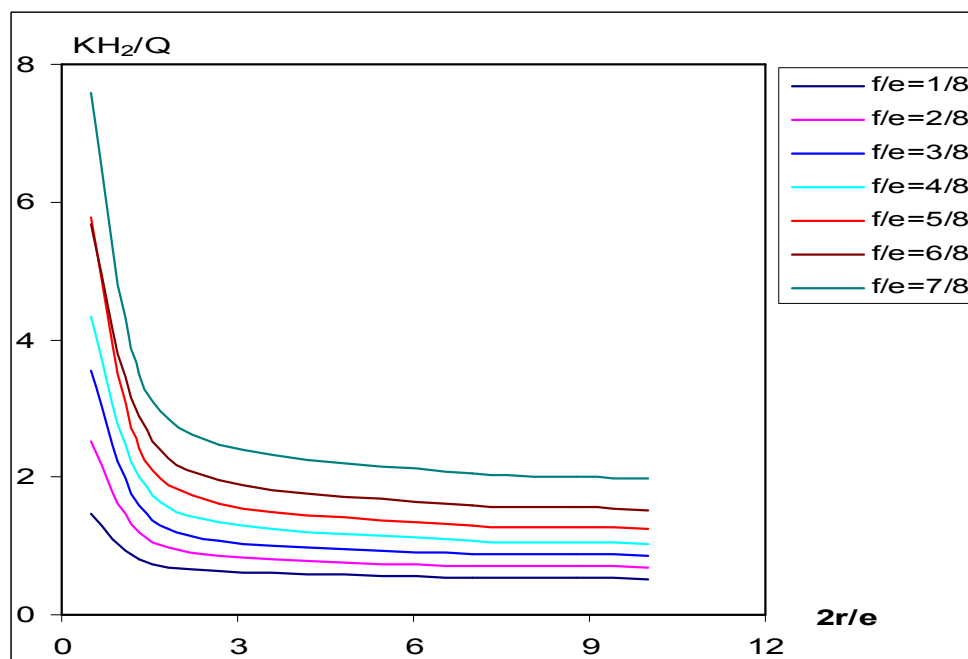


Figure VI.18 : Variation de la perte de charge en fonction de $2r/e$ dans le coté aval.

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**.

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.

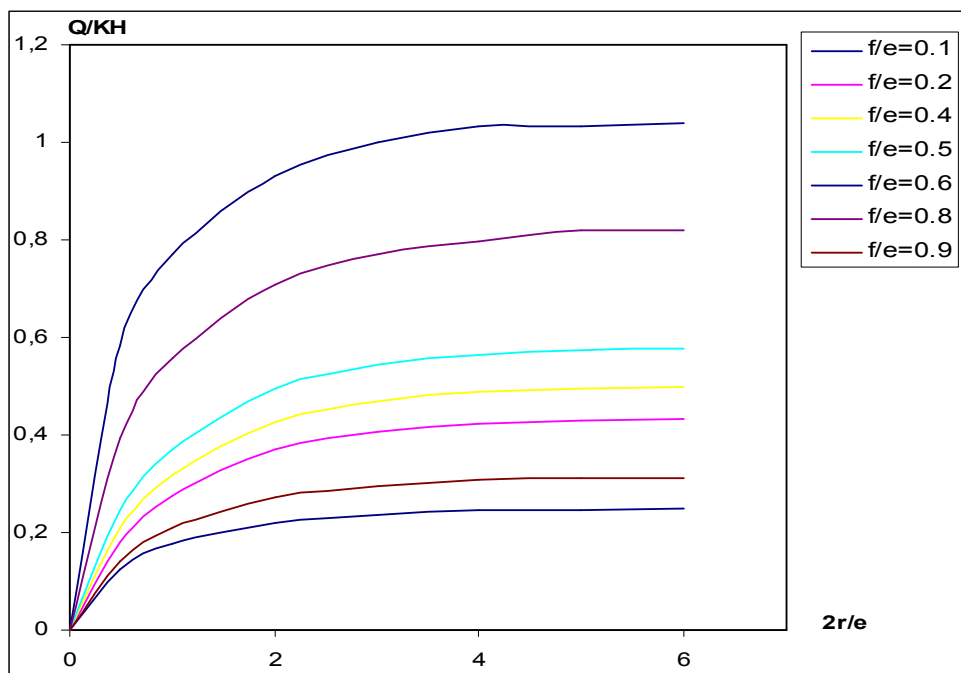


Figure IV.19 : Variation du débit total en fonction de $2r/e$.

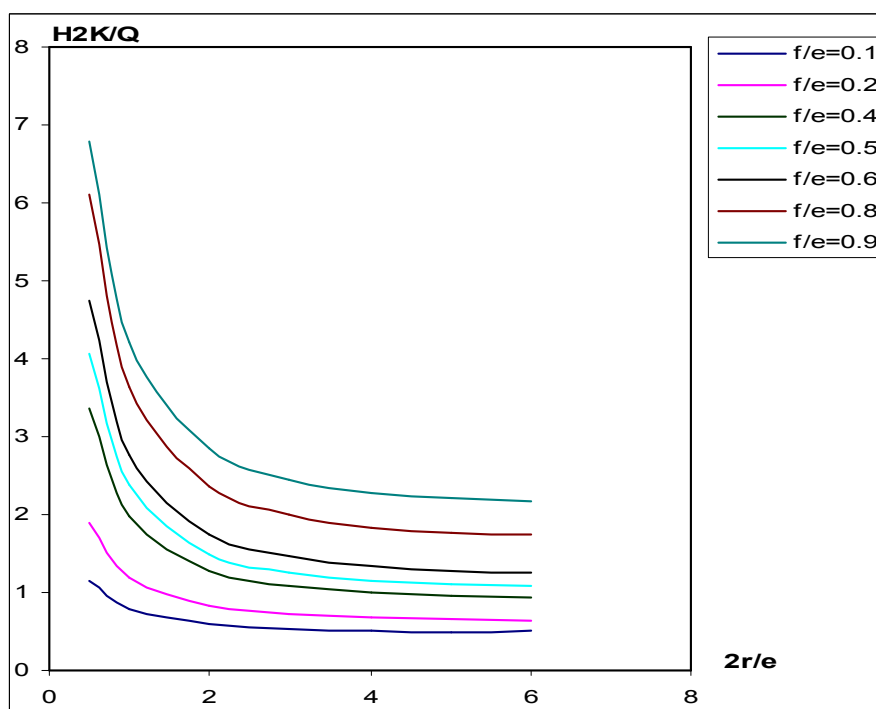


Figure IV.20 : Variation des pertes de charge en fonction de $2r/e$ dans le coté aval.

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.

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**).

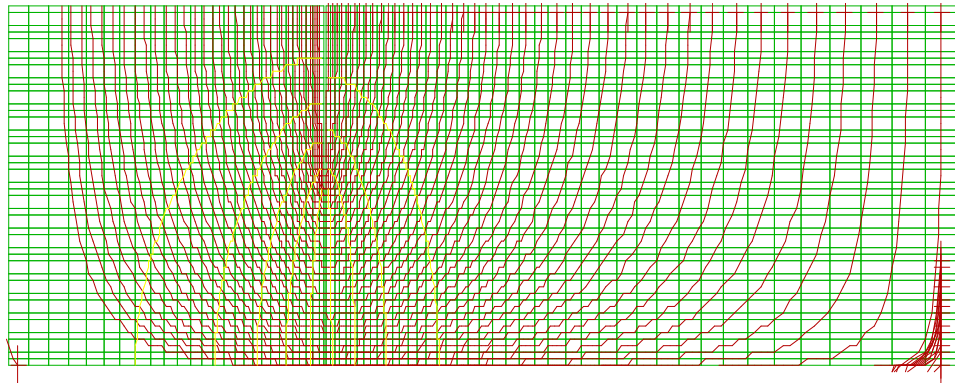


Figure IV.21 : Réseau d'écoulement pour les batardeaux larges.

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.

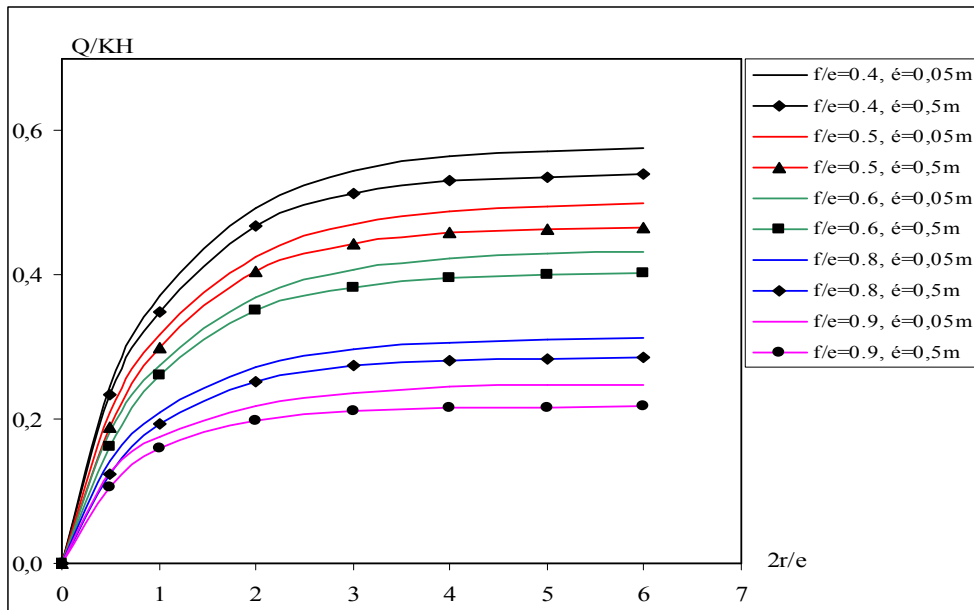


Figure VI.22 : Comparaison du débit de l'épaisseur de l'écran $e' = 0.05$ m et $e' = 0.5$ m.

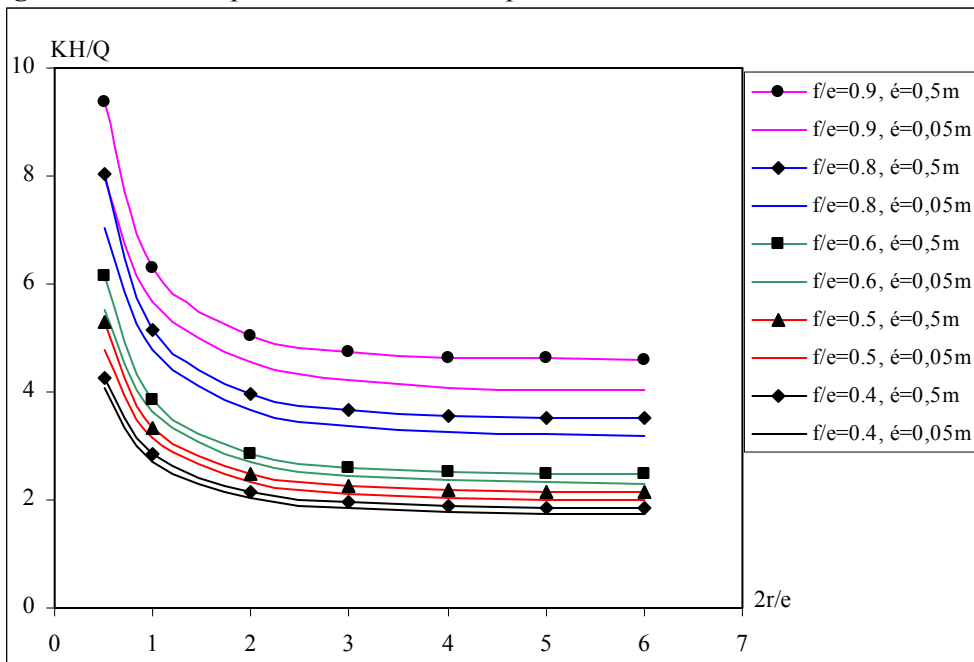


Figure VI.23: Comparaison des pertes de charge pour l'épaisseur de l'écran $e' = 0.05$ m et $e' = 0.5$ m.

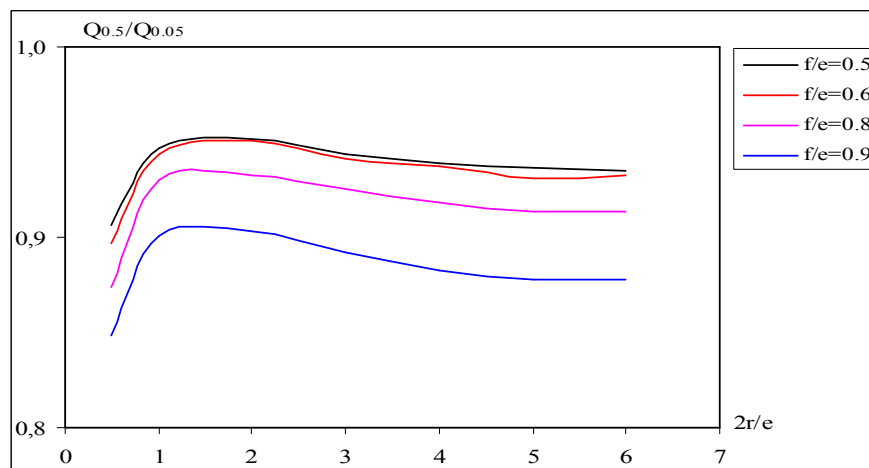


Figure VI.24 : Variation du rapport des débits $Q_{0.5}/Q_{0.05}$ m.

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

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

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

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%.

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 %.

$$\frac{f}{e} < 0.5 \quad \frac{Q}{H\sqrt{K_vKh}} = \frac{1}{\pi} \ln 2 \cot g \frac{\pi}{4} \frac{f}{e}$$

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

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

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 $3 < 2R/e < 6$).

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.

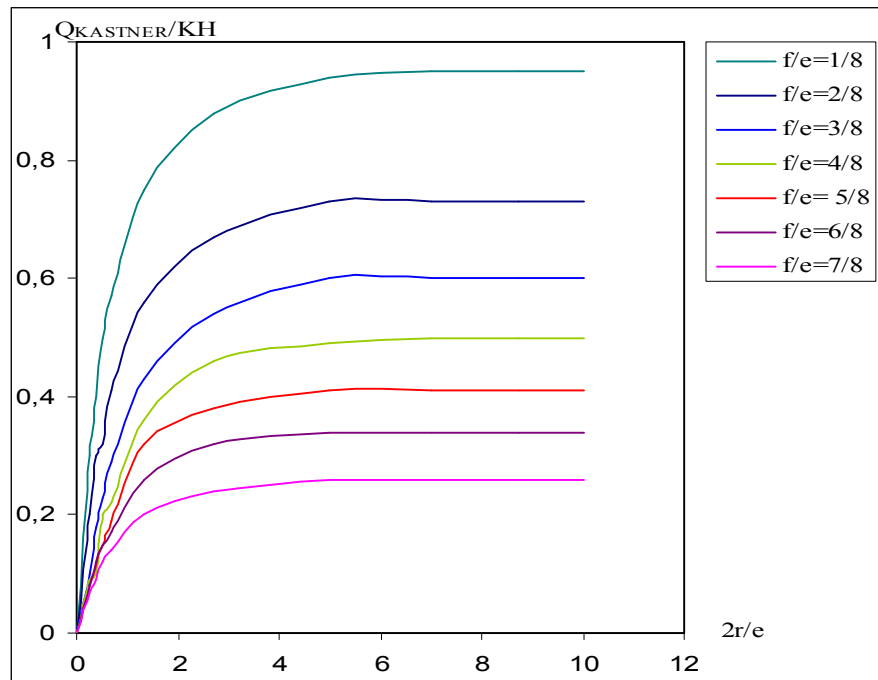


Figure IV.25 : Variation du débit total en fonction de $2r/e \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ d'après KASTNER.

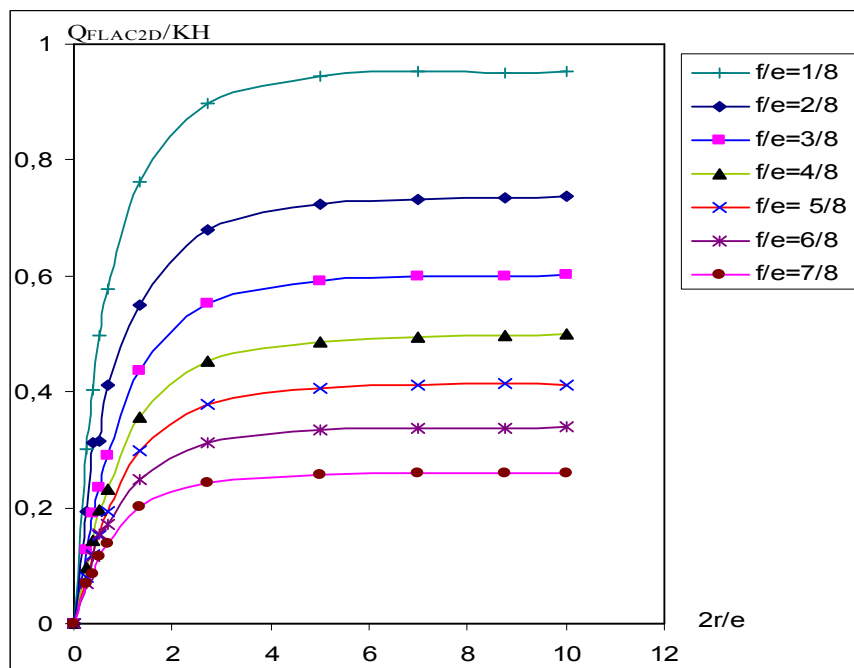


Figure IV.26 : Variation du débit total en fonction de $2r/e \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ d'après Flac2D.

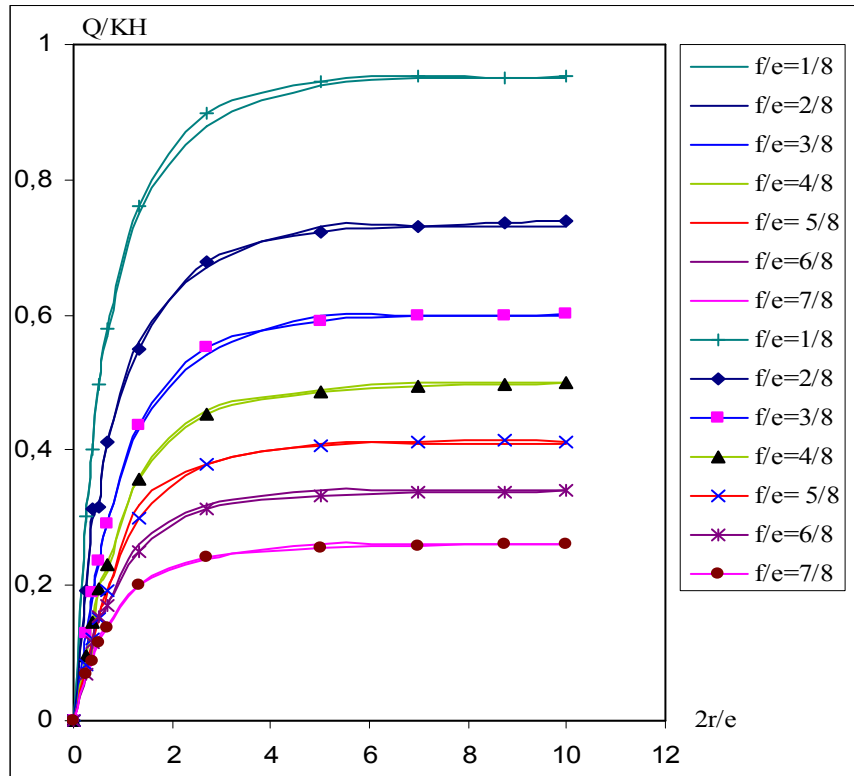


Figure IV.27 : Comparaison du débit total en fonction de $2r/e \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ KASTNER et Flac2D.

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.

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.

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 %.

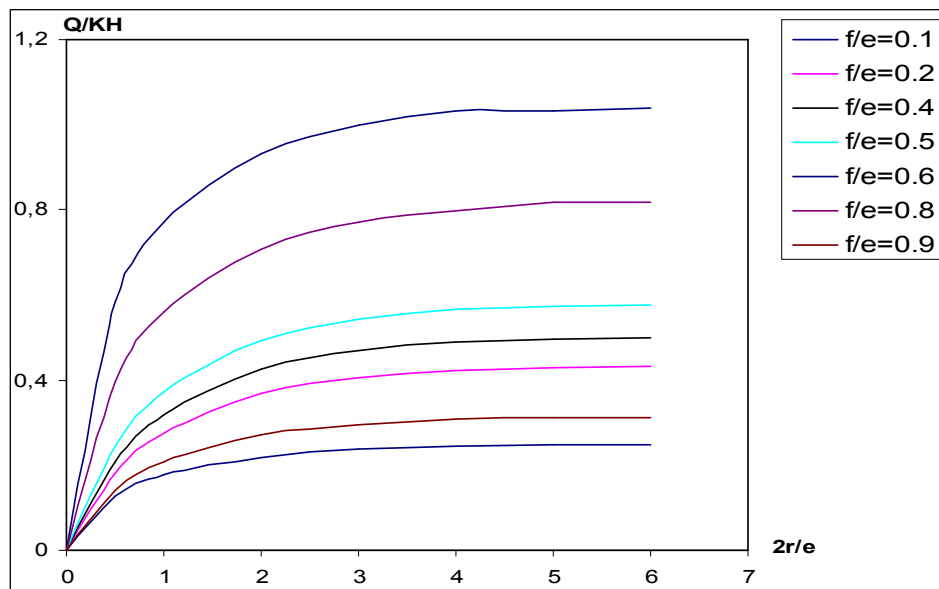


Figure IV.28 : Variation du débit plan en fonction de $2r/e \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$.

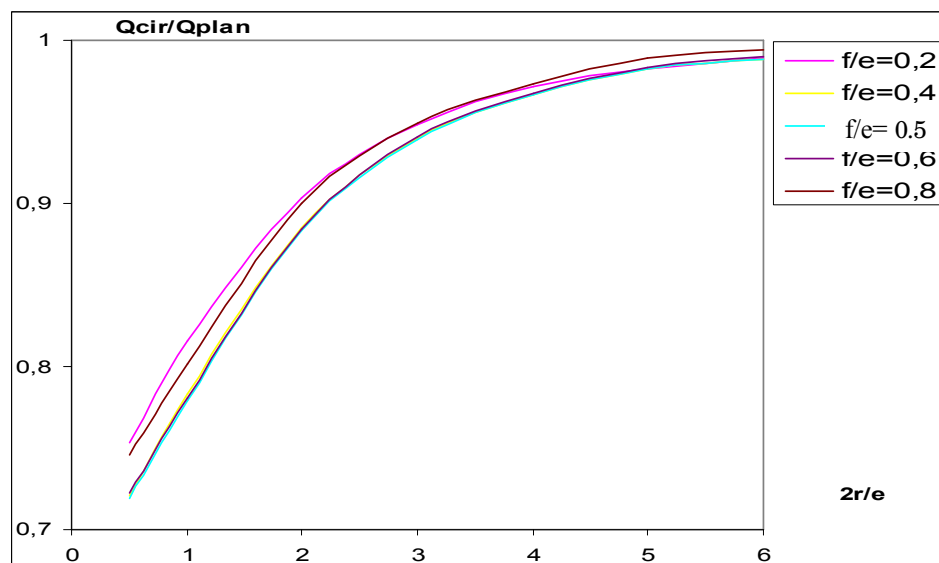


Figure IV.29 : Variation du rapport $Q_{\text{cir}}/Q_{\text{plan}}$ en fonction de $2r/e \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$.

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**.

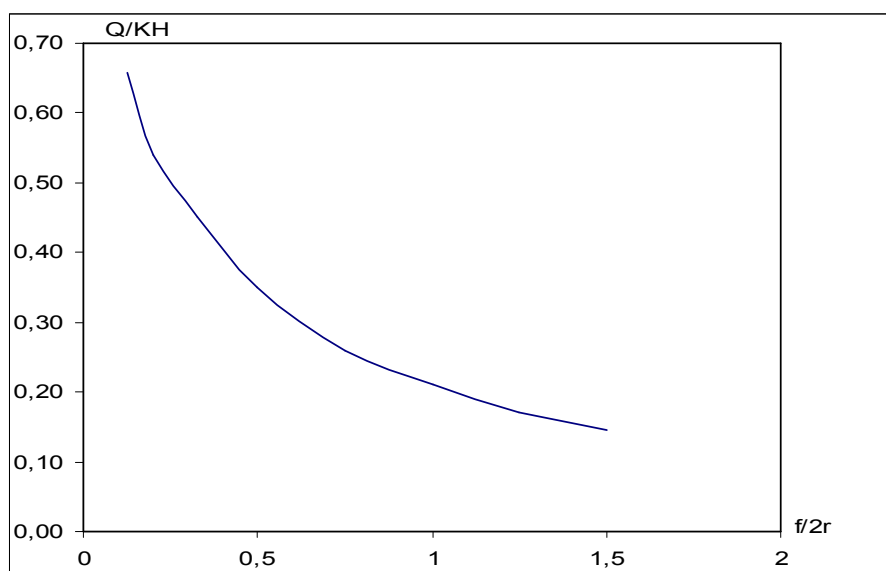


Figure VI.30 : Variation du débit total en fonction de $f/2r$.

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.

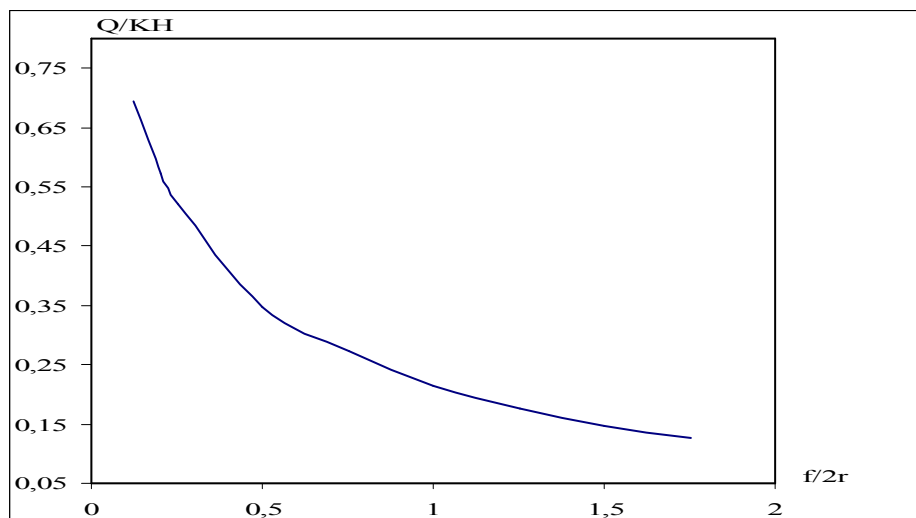


Figure IV.31 : Variation du débit en fonction de $f/2r$ dans un milieu semi-infini.

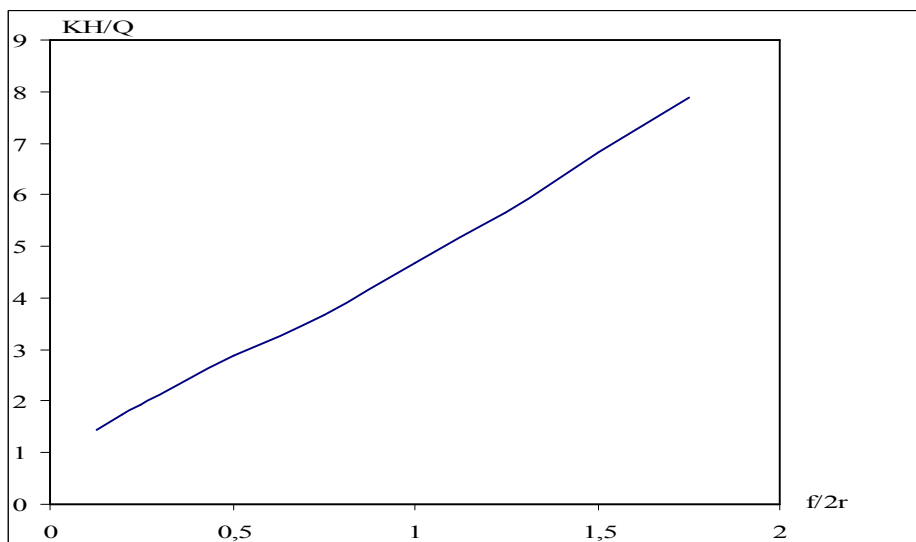


Figure IV.32 : Variation des pertes de charge totales en fonction de $f/2r$.

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.

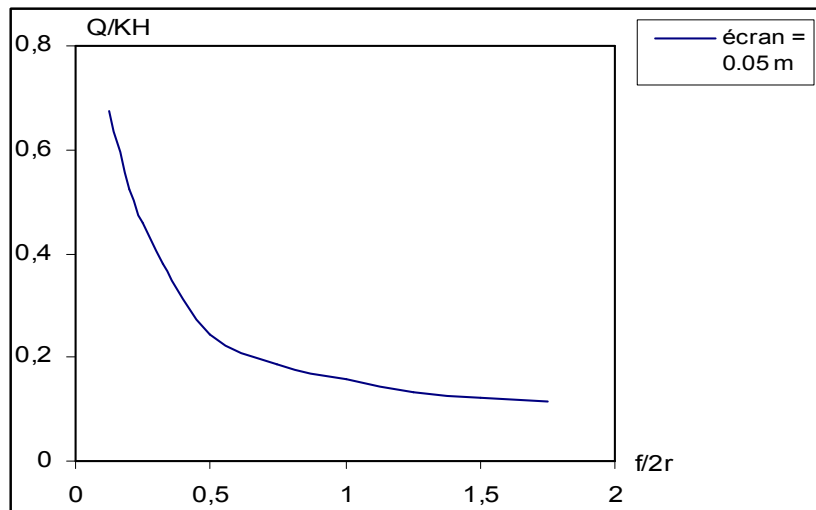


Figure VI.33 : Variation du débit en fonction de la fiche relative du batardeau.

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.

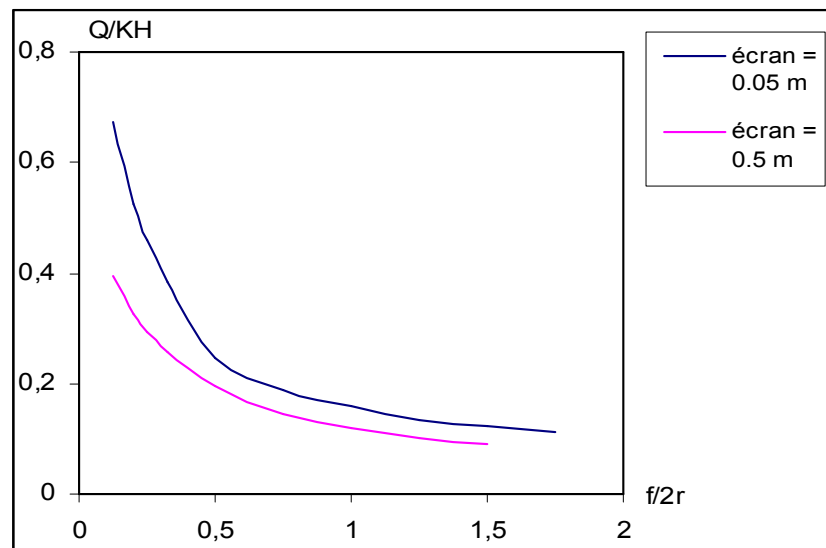


Figure VI.34 : Comparaison du débit de $e' = 0.05$ m et $e' = 0.5$ m.

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 au fur et à 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 -

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.

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 %.

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 :

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

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 %.

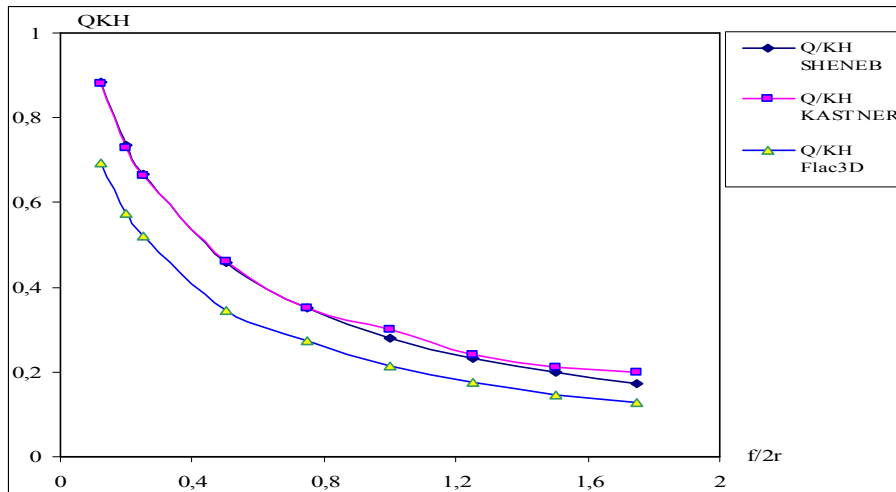


Figure IV.35 : Comparaison avec les résultats en écoulement plan.

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

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

relation :

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

Par comparaison avec nos résultats et ceux de BRILLANT, 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 fêches 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 fêche 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.

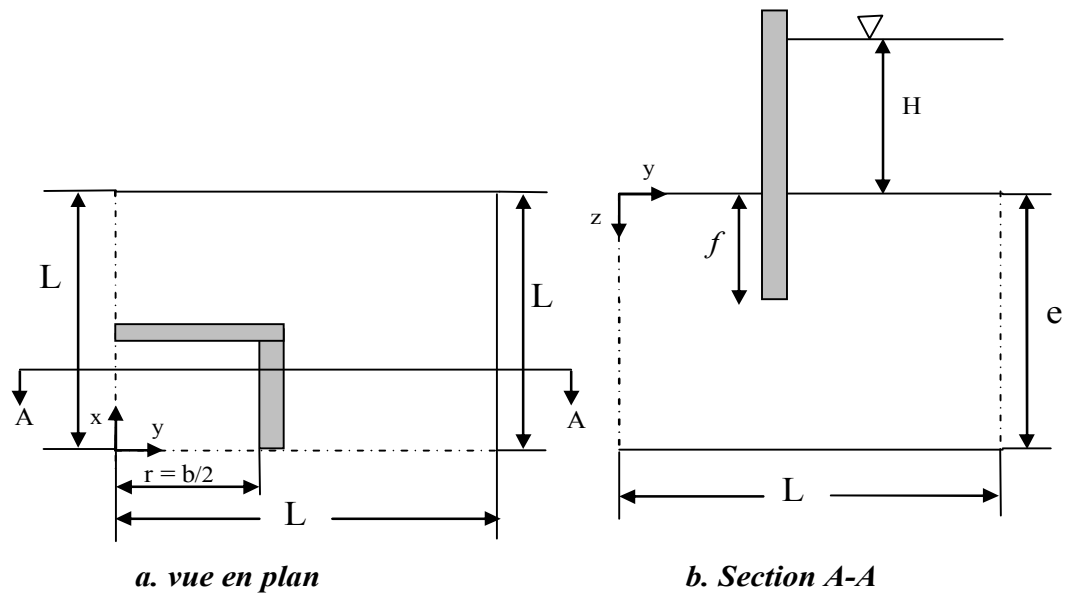


Figure IV.36 : Batardeau carré avec fouille- Excavation –
Un quart de la section.

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.

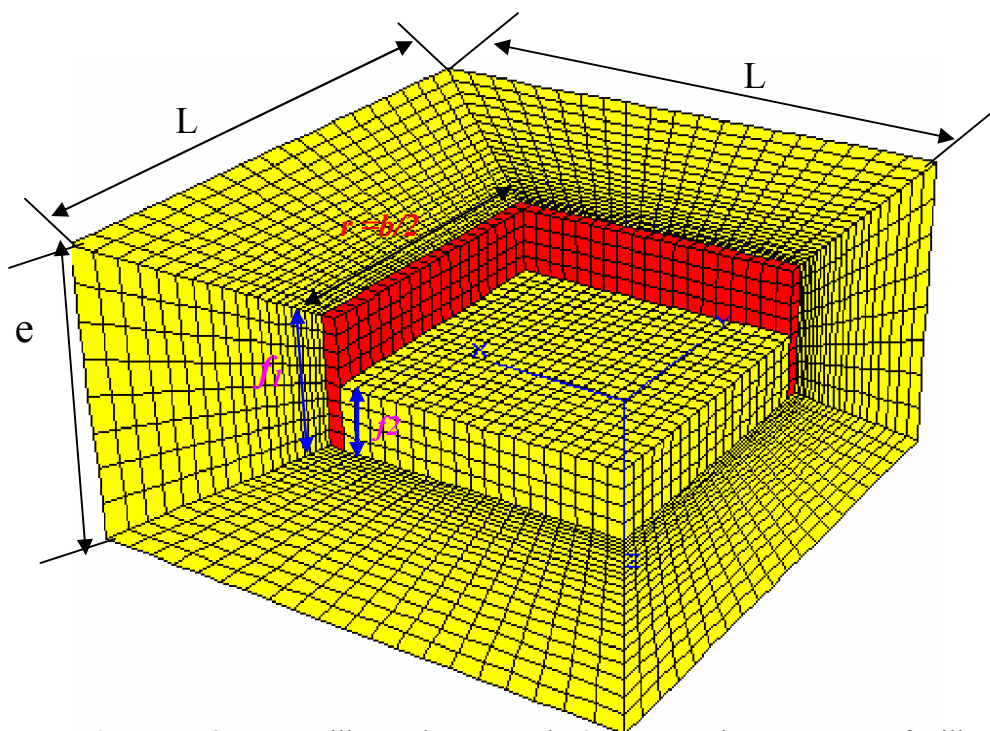


Figure IV.37: Le maillage adopté en Flac3D - Batardeau carré avec fouille.

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.

Visualisation du modèle adopté en Flac3D

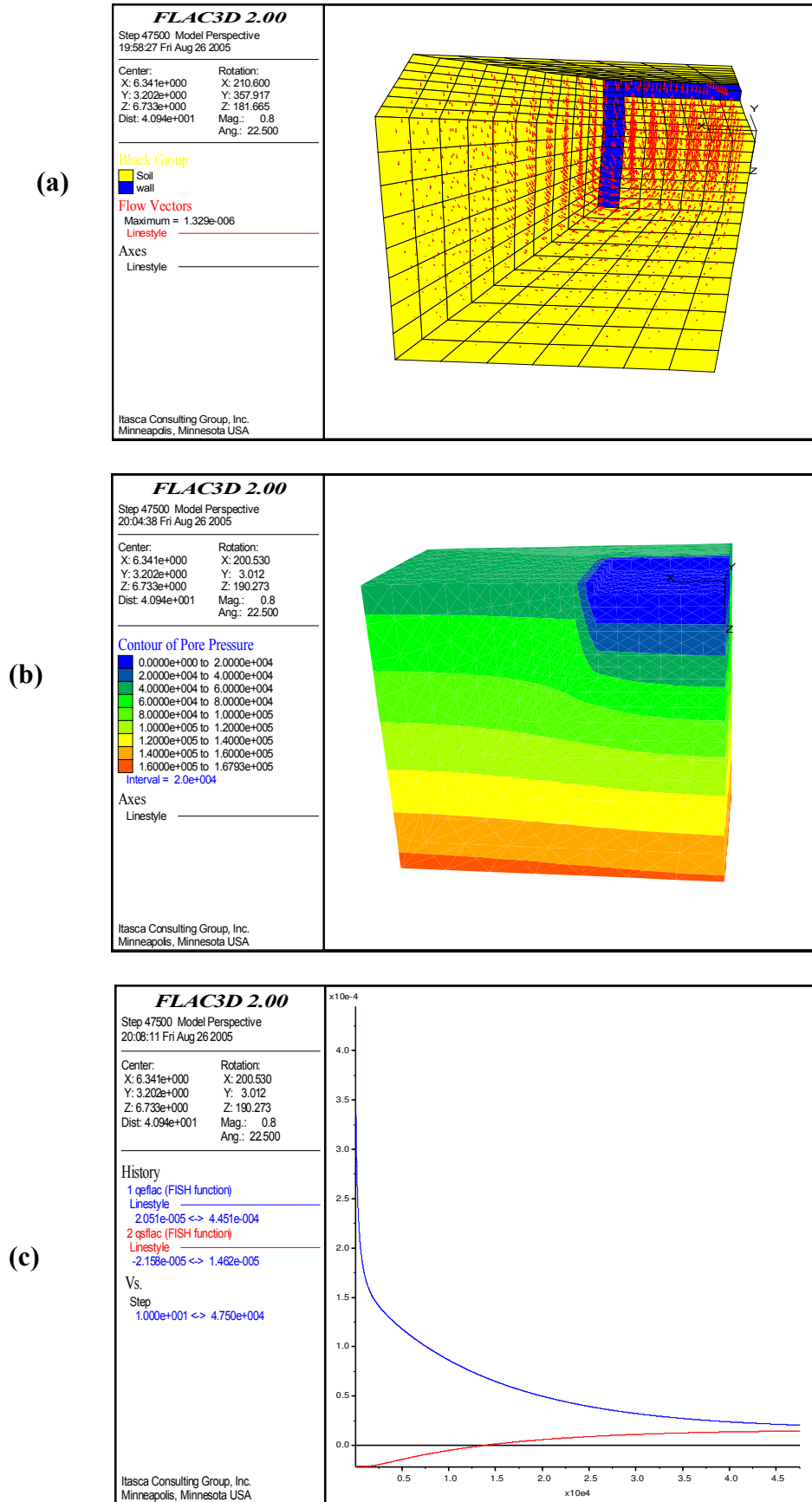


Figure IV.38 : Modèle Flac3D : $2r/e = 1.34, f/e = 1/8$, (a) Vecteurs d'écoulement (b) Contour de distribution des pressions interstitielles en état d'écoulement permanent, (c) Historique du débit entrant et débit sortant (convergence des calculs).

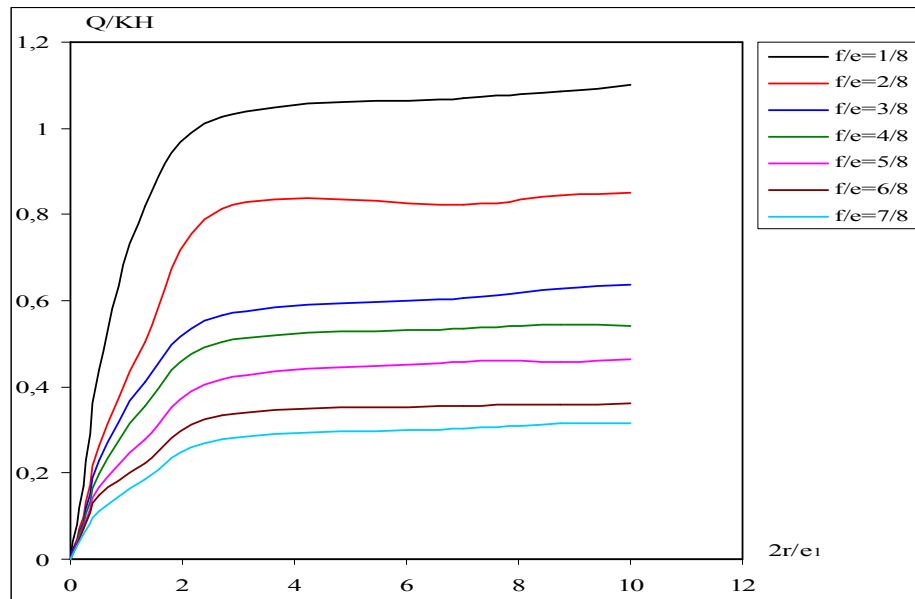


Figure IV.39 : Variation du débit total en fonction de $2r/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$.

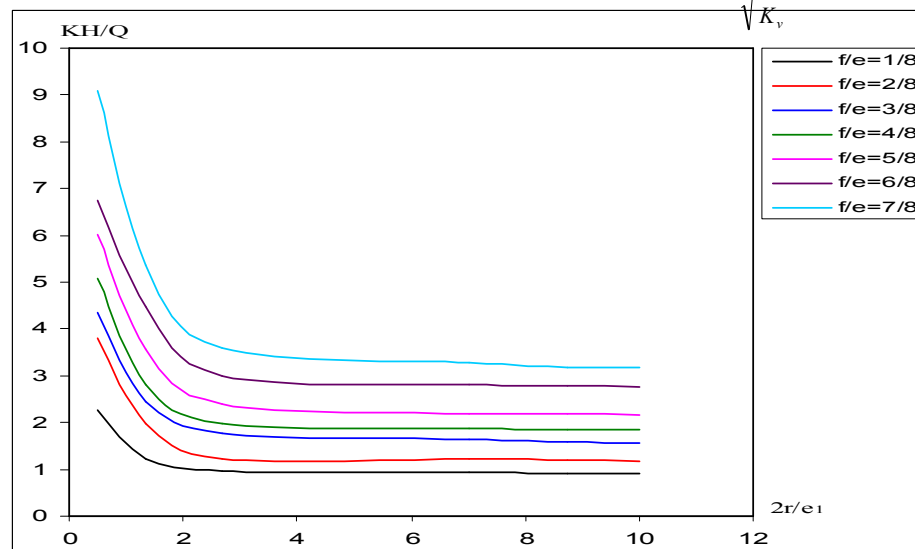


Figure IV.40 : Variation des pertes de charge totales en fonction de $2r/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$.

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 de 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 de 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).

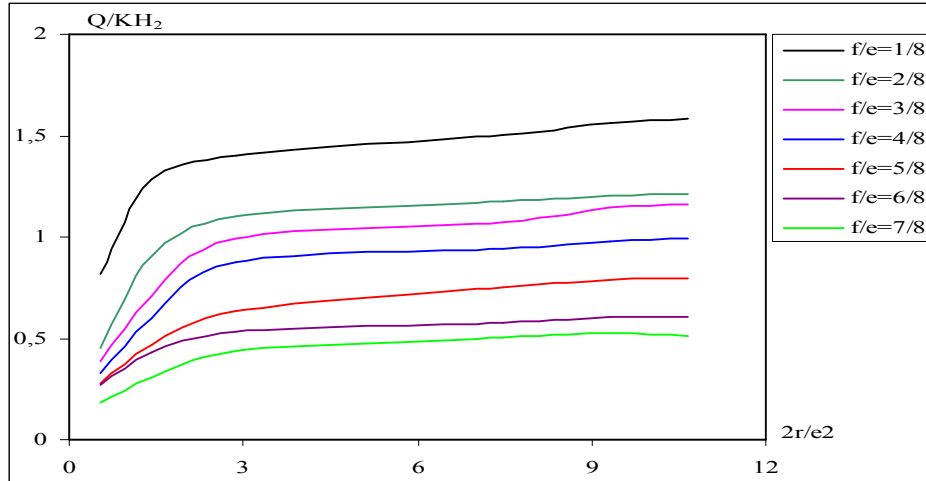


Figure IV.41 : Variation du débit en fonction de $2r/e_2 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté aval.

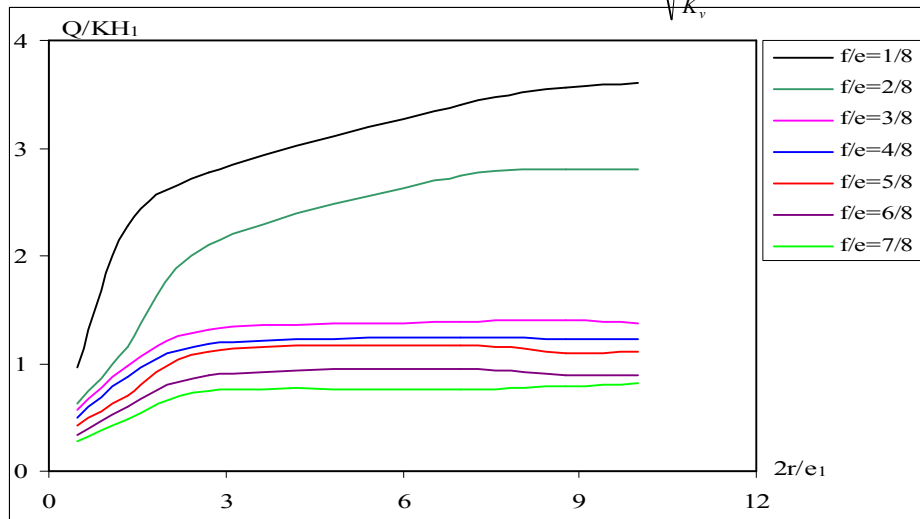


Figure IV.42: Variation du débit en fonction de $2r/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté amont.

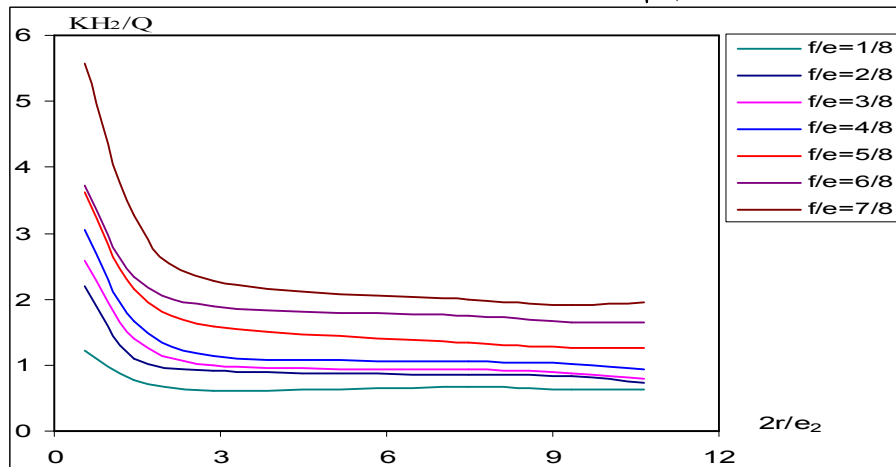


Figure IV.43 : Variation des pertes de charge en fonction de $2r/e_2 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté aval.

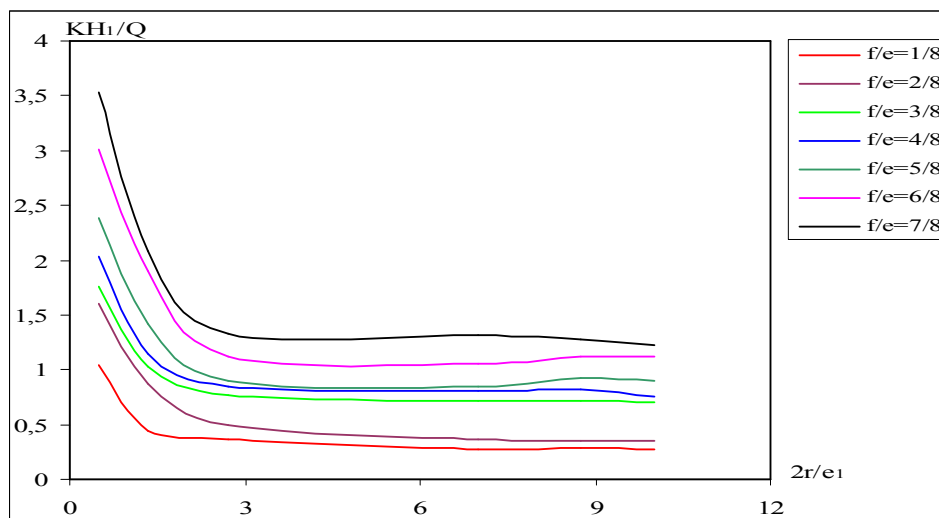


Figure IV.44 : Variation des pertes de charge en fonction de $2r/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté amont.

- 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.

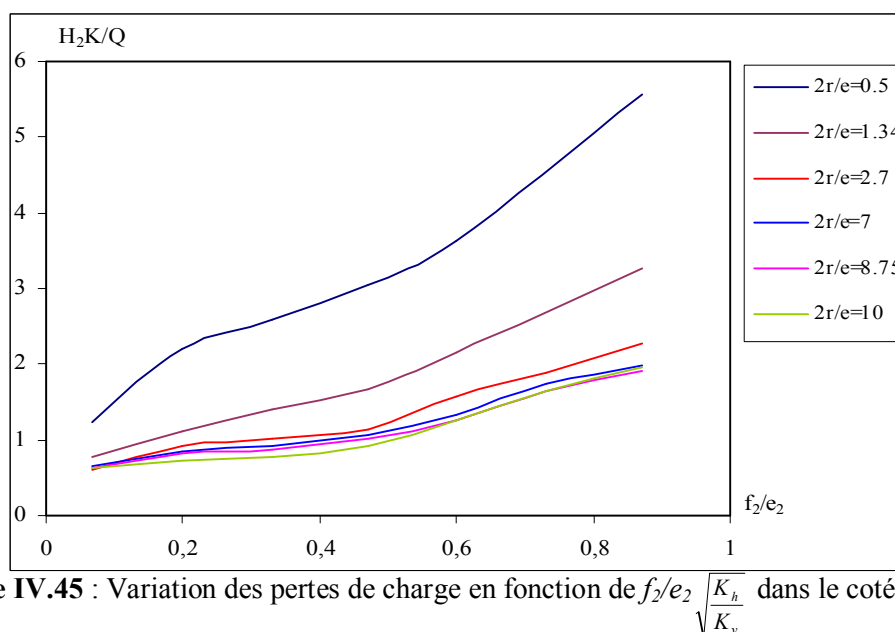


Figure IV.45 : Variation des pertes de charge en fonction de $f_2/e_2 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté aval.

- 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.

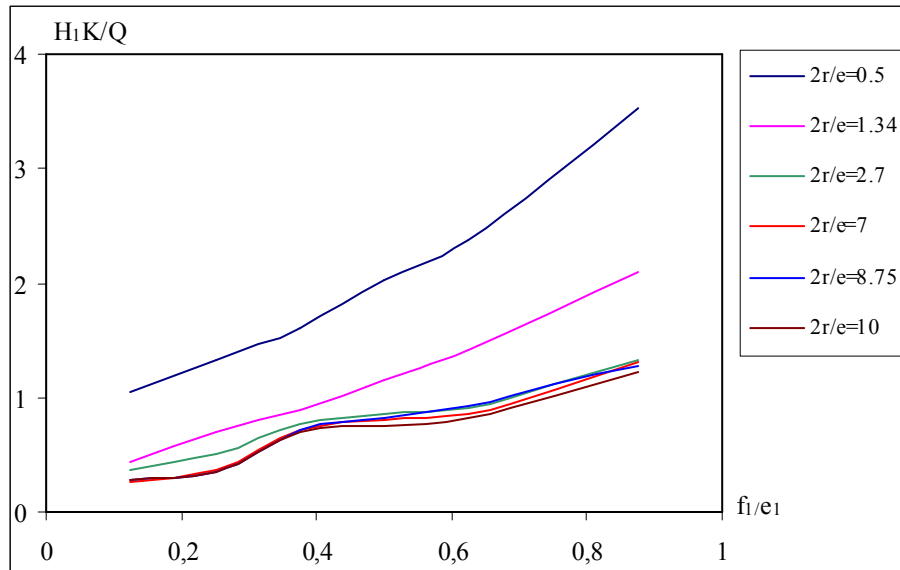


Figure IV.46 : Variation des pertes de charge en fonction de $f_1/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté amont.

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.

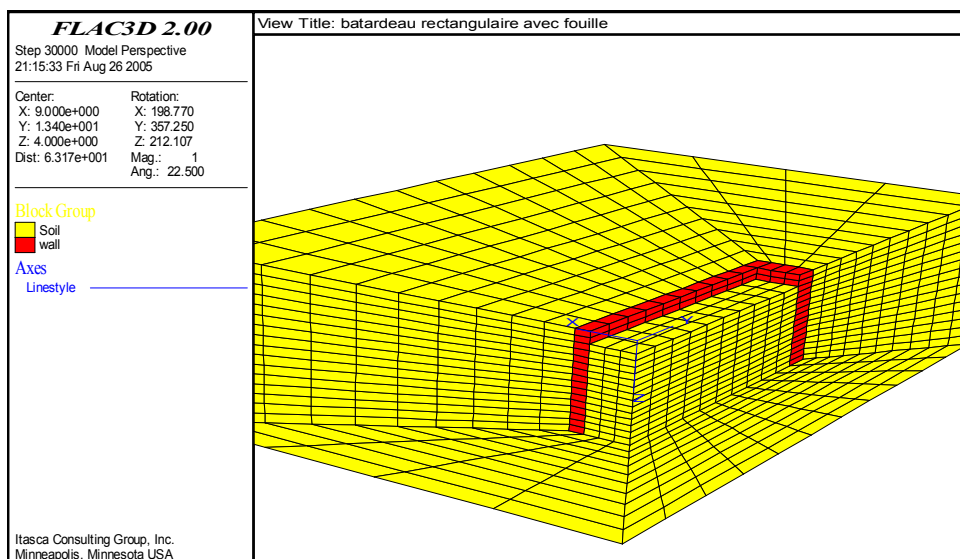


Figure IV.47 : Le maillage adopté en Flac3D - Batardeau rectangulaire avec fouille.

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.

Visualisation du modèle adopté en Flac3D

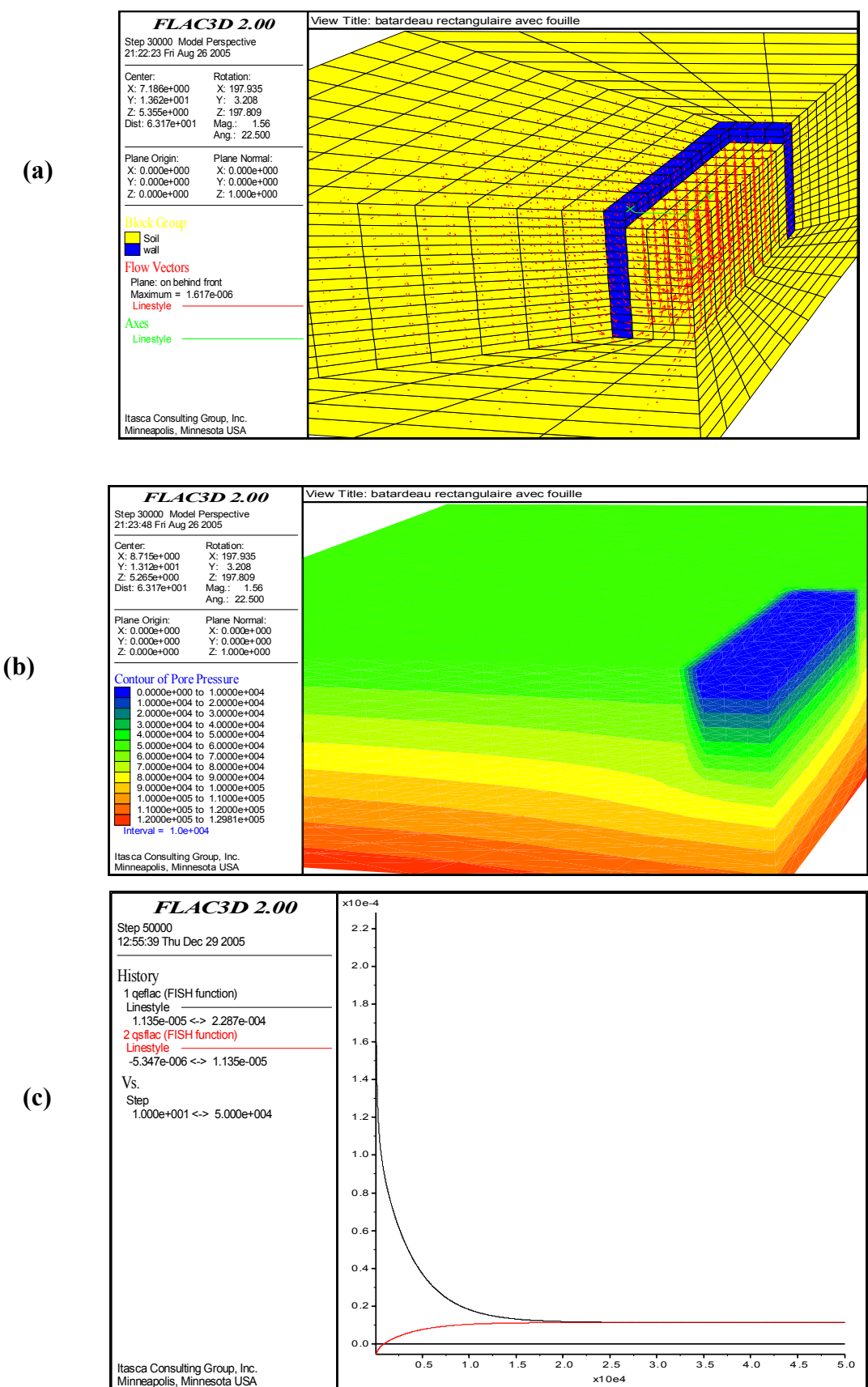


Figure IV.48 : Modèle Flac3D : $2R/e = 0.2,7$, $r=2m$ et $f/e = 4/8$, (a) Vecteurs d'écoulement, (b) Contour de distribution des pressions interstitielles en état d'écoulement permanent, (c) Historique du débit entrant et débit sortant (convergence des calculs).

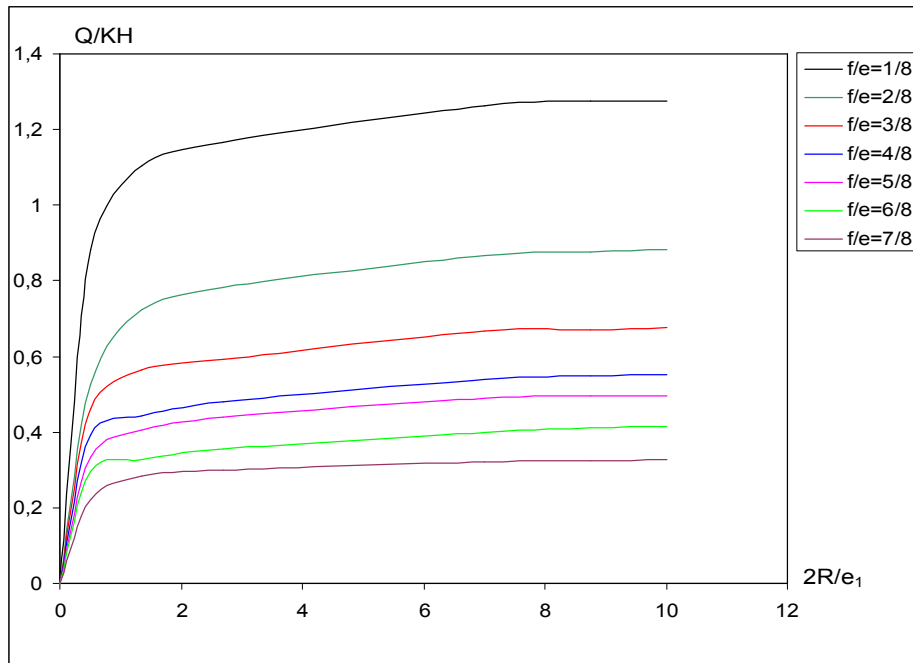


Figure IV.49 : Variation du débit total en fonction de $2R/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$.

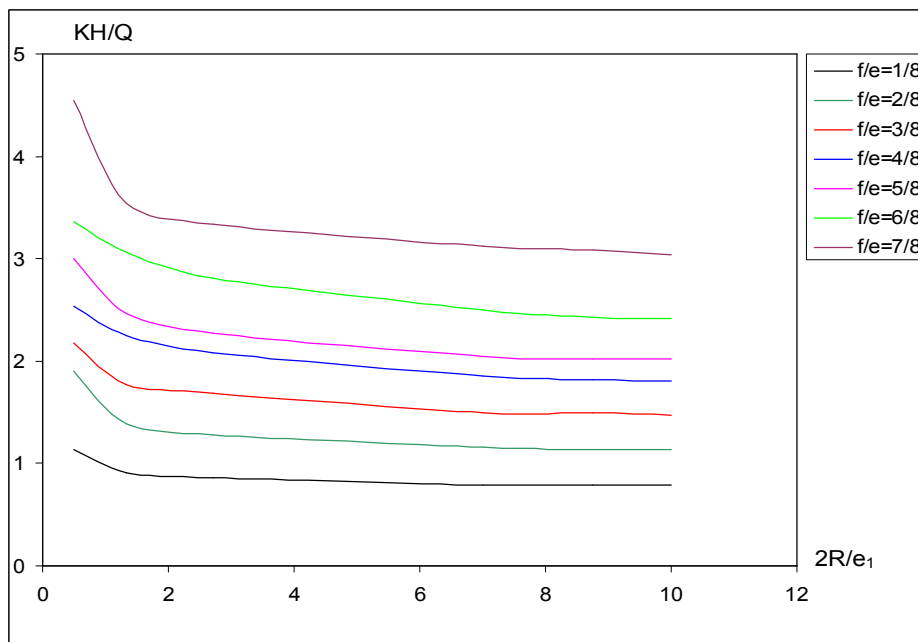
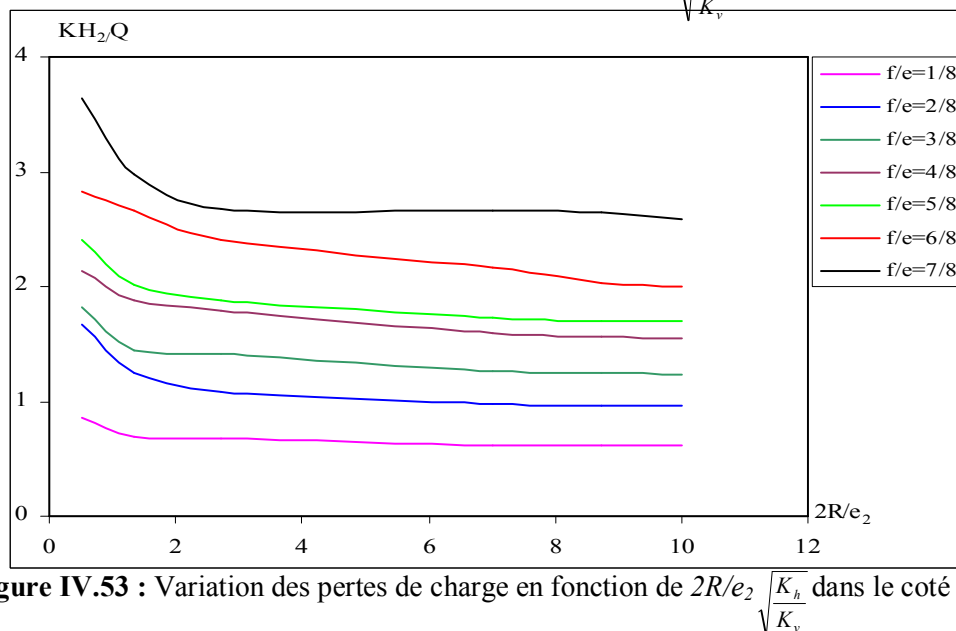
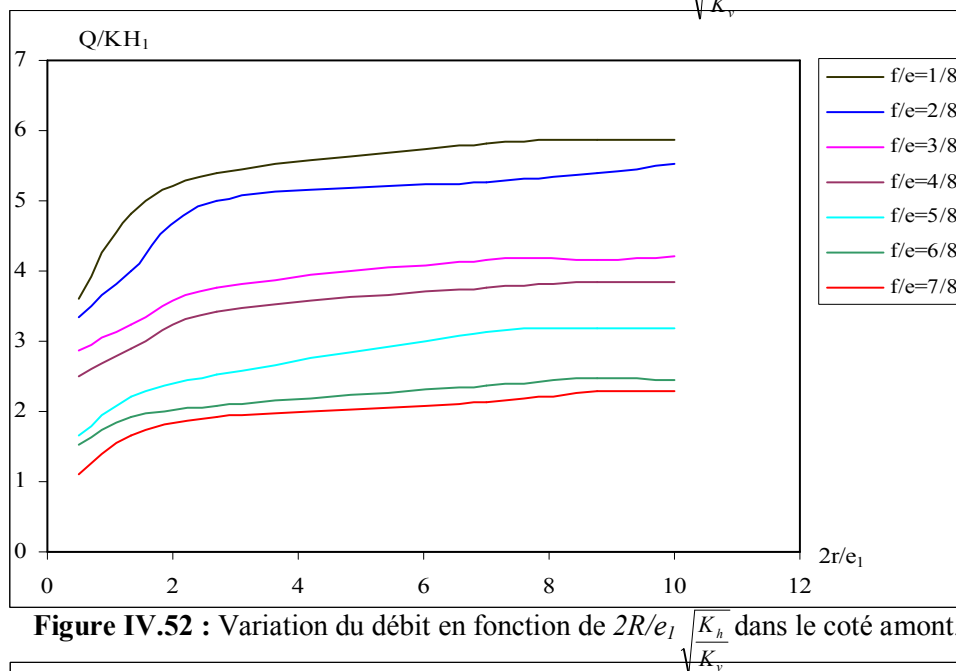
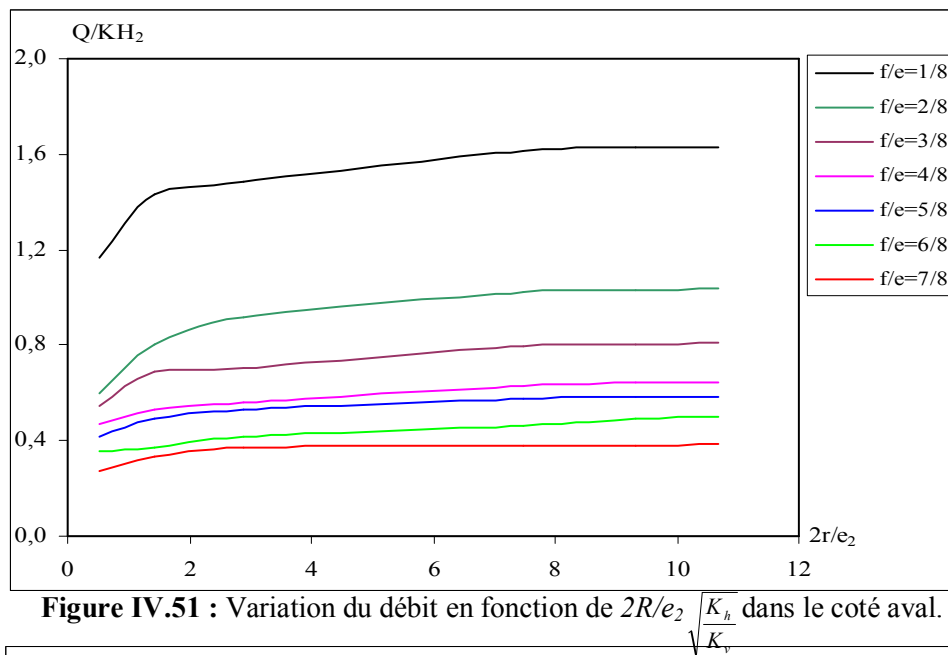


Figure IV.50 : Variation des pertes de charge totales en fonction de $2R/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$.

- 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**).



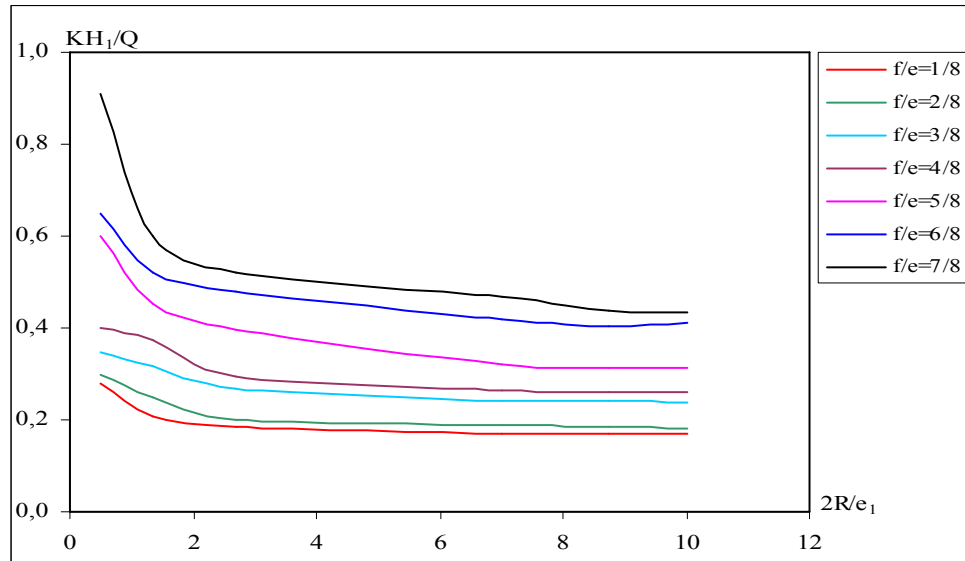


Figure IV.54 : Variation des pertes de charge en fonction de $2R/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté amont.

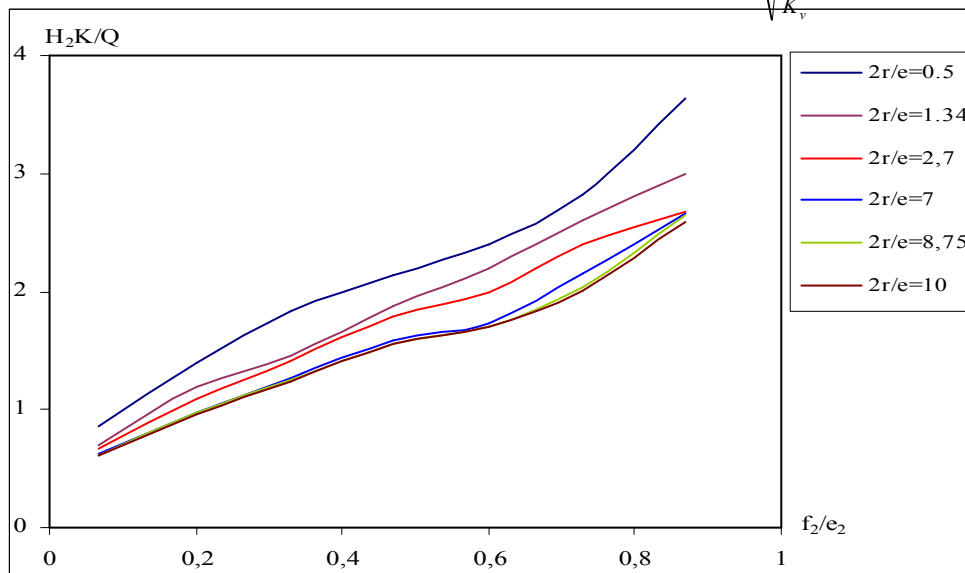


Figure IV.55. : Variation des pertes de charge en fonction de $f_2/e_2 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté aval.

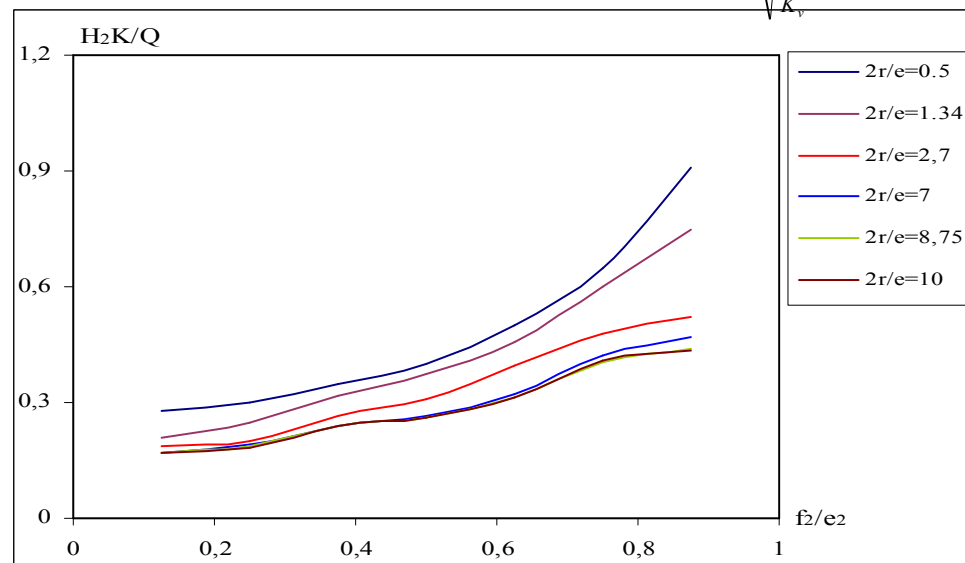


Figure IV.56 : Variation des pertes de charge en fonction de $f_1/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté amont.

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 $2r/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$.

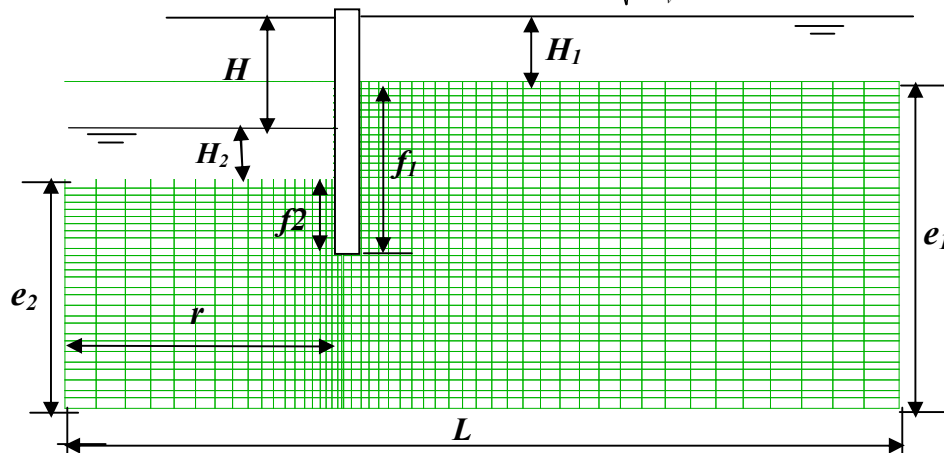


Figure VI.57 : Détail du maillage axisymétrique adopté en Flac2D.
- Batardeau circulaire avec fouille -

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.

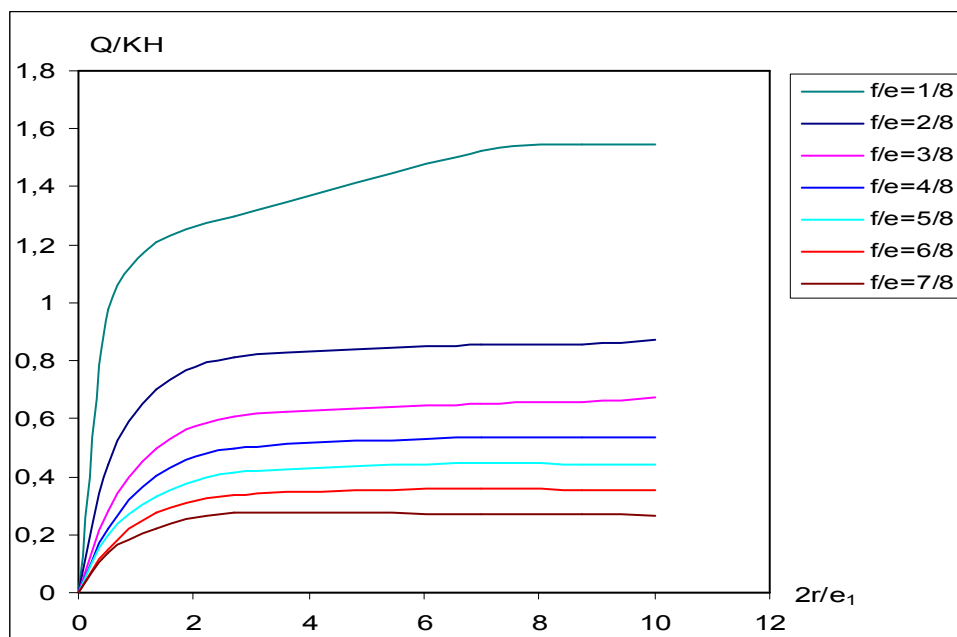


Figure IV.58 : Variation du débit total en fonction de $2r/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$.

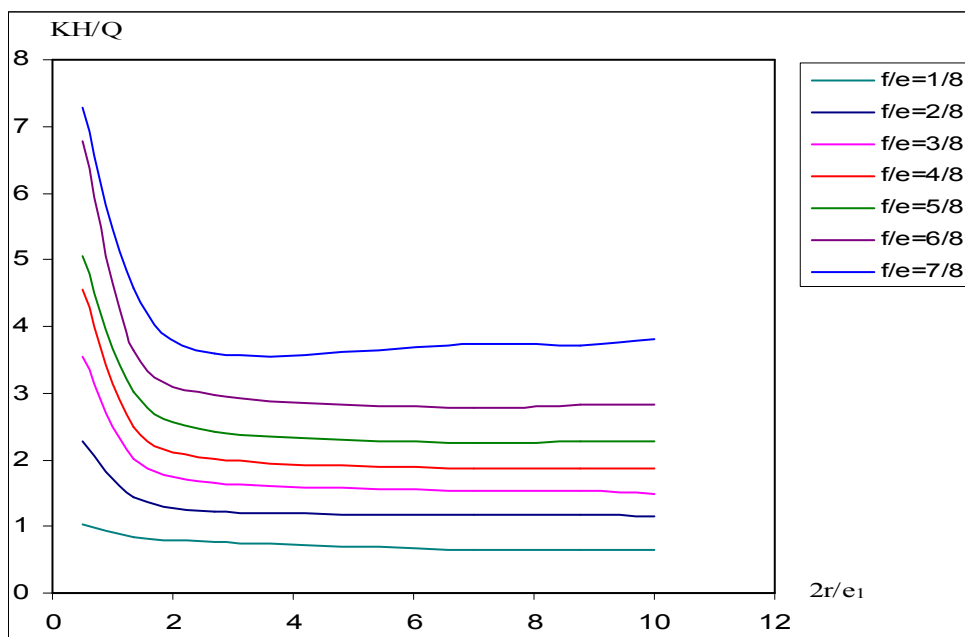


Figure IV.59 : Variation des pertes de charge totales en fonction de $2r/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$.

- 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).

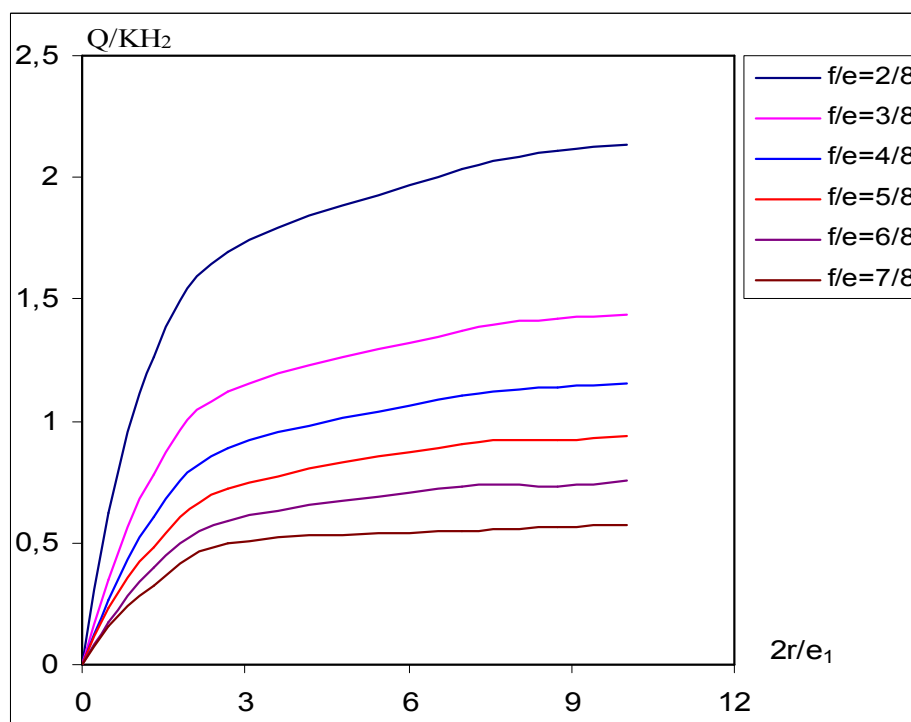


Figure IV.60: Variation du débit en fonction de $2r/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté aval.

- 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.

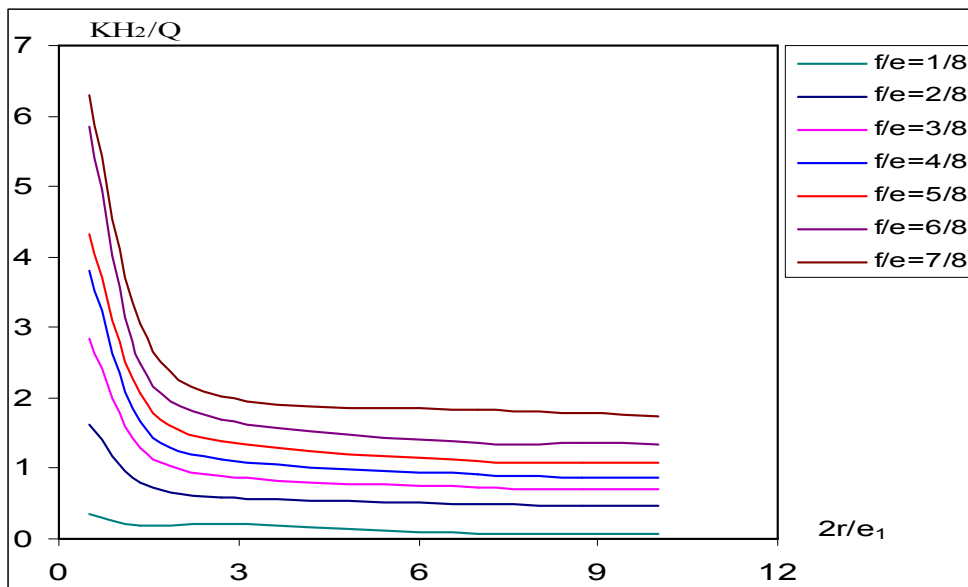


Figure IV.61: Variation des pertes de charge en fonction de $2r/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ coté amont.

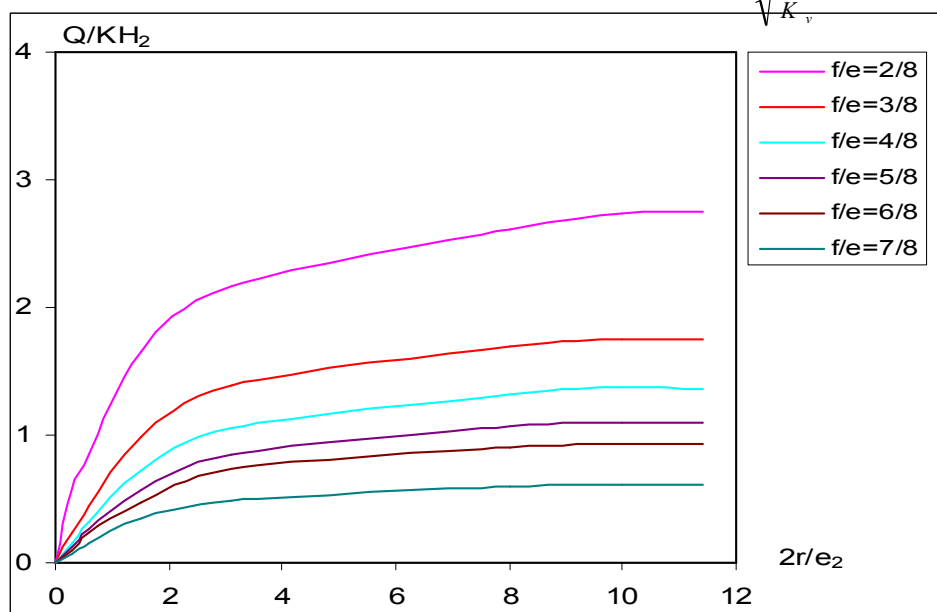


Figure IV.62 : Variation du débit en fonction de $2r/e_1$ dans le coté aval.

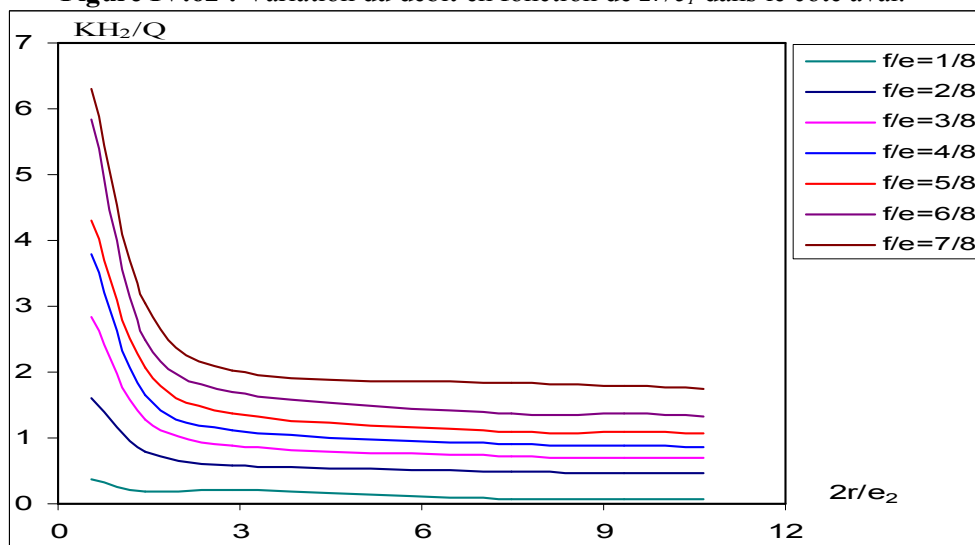


Figure IV.63 : Variation des pertes de charge en fonction de $2r/e_2 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ coté aval.

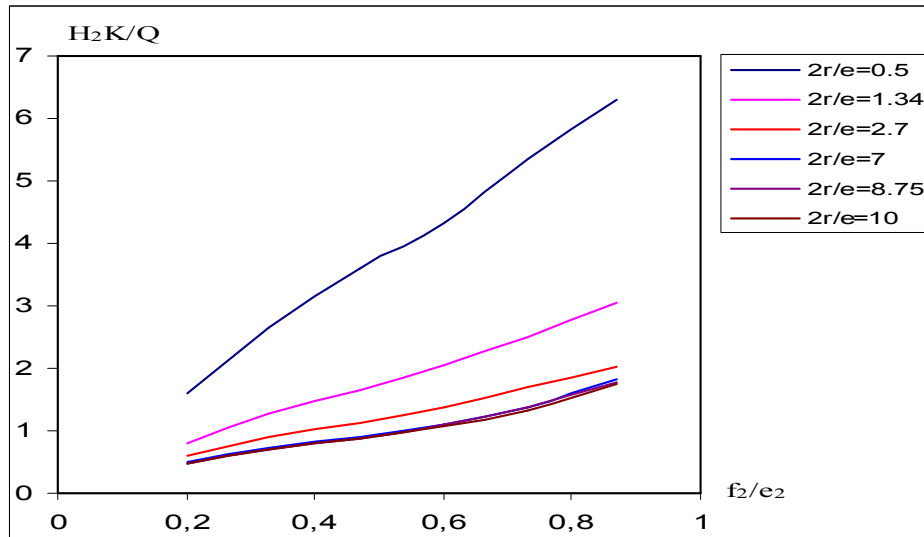


Figure IV.64 : Variation des pertes de charge en fonction de $f_2/e_2 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté aval.

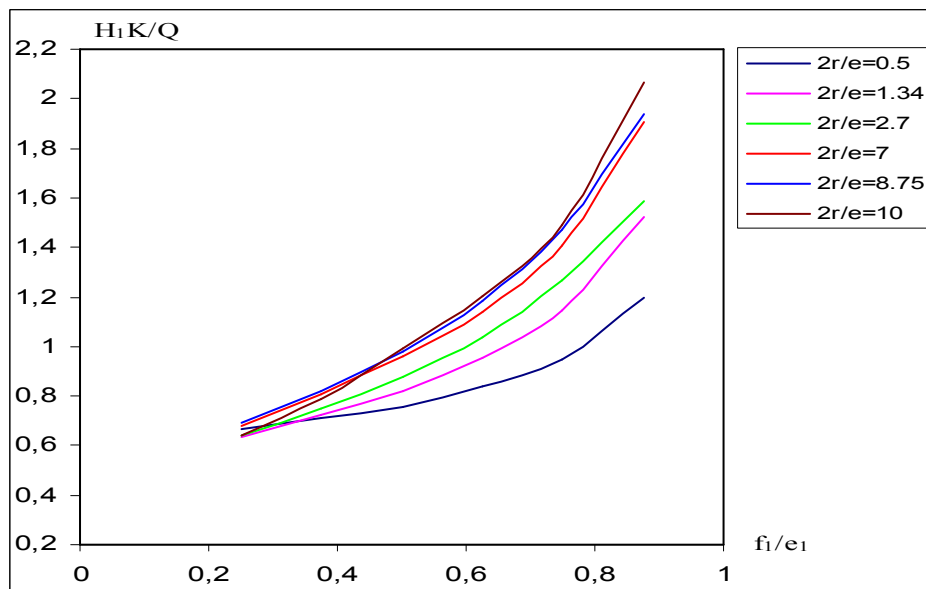


Figure IV.65 : Variation des pertes de charge en fonction de $f_1/e_1 \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ dans le coté amont.

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 de 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.

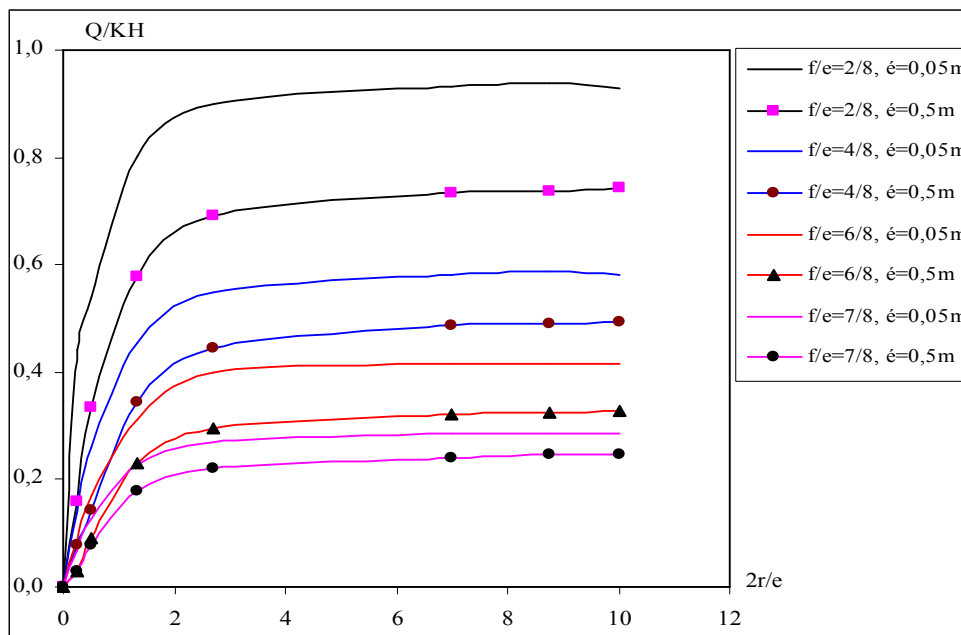


Figure IV.66 : Comparaison du débit de l'écran $e' = 0.05$ m et $e' = 0.5$ m.

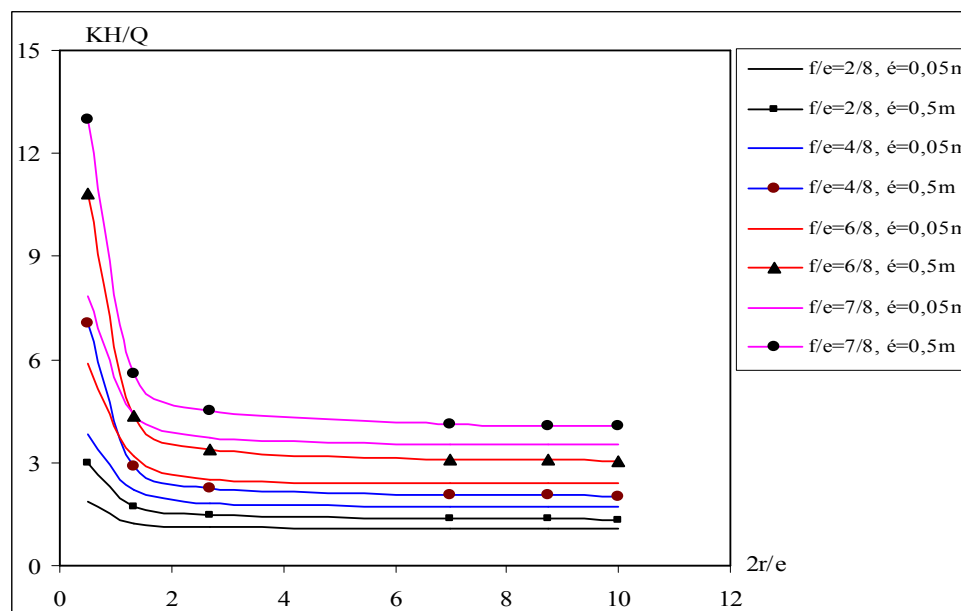


Figure IV.67 : Comparaison des pertes de charge pour l'épaisseur de l'écran $e' = 0.05$ m et $e' = 0.5$ m.

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.

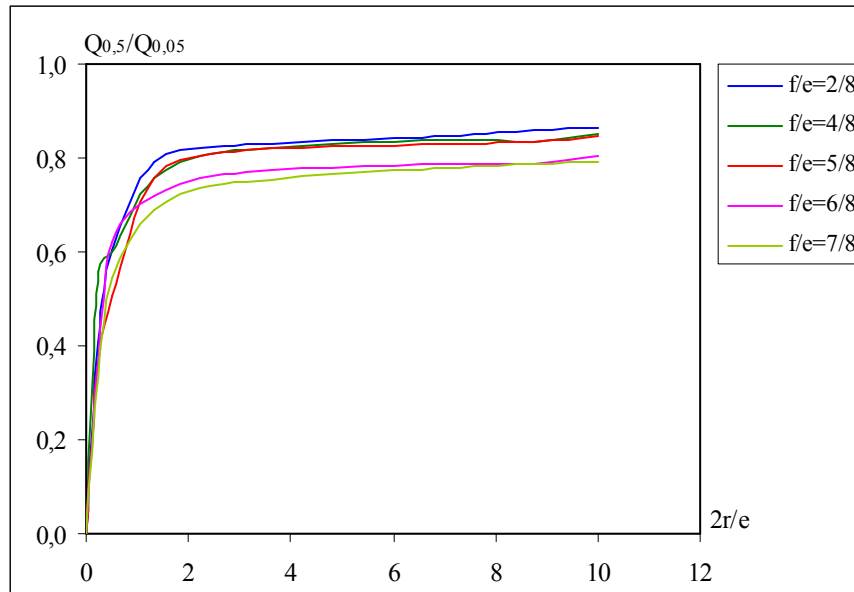


Figure IV.68 : Variation du rapport des débits $Q_{0,5}/Q_{0,05}$.

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

Pertes de charge dans le coté aval

MANDEL [1939] a proposé deux relations pour le calcul de la perte de charge partielle pour un écoulement plan avec fouille dans un milieu fini :

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

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

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 $2r/e=2.7$, 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*.

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.

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 : Ecarts entre les deux approches au niveau des débits d'exhaure.

2. Comparaison avec MANDEL

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 : Ecarts entre les deux approches au niveau des pertes de charge (coté aval).

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 %.

f/e	$2r/e$	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.

f/e	$2r/e$	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**.

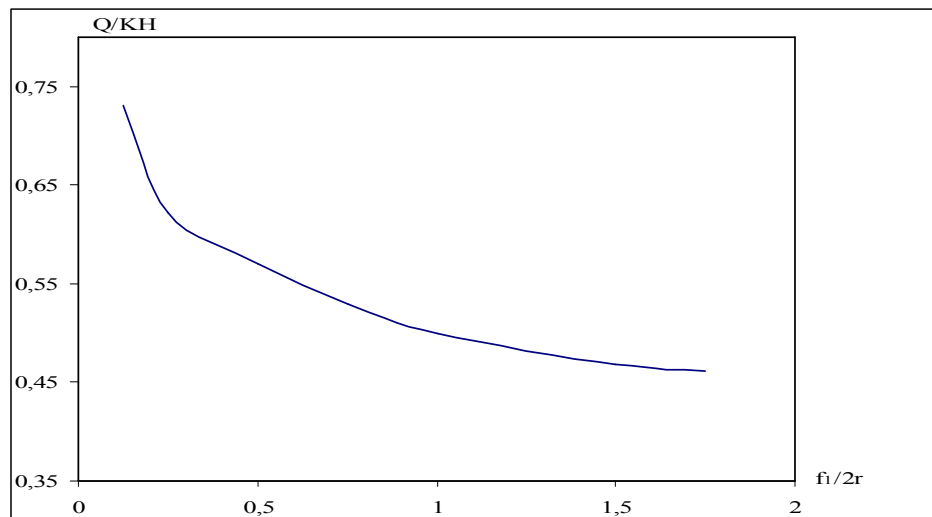


Figure IV.69 : Variation du débit total en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

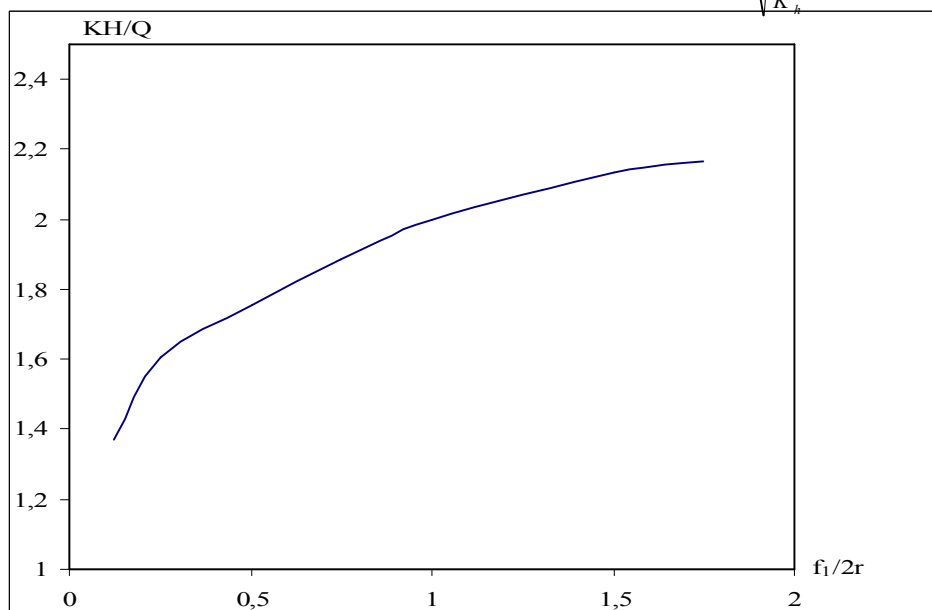


Figure IV.70 : Variation des pertes de charge totales en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

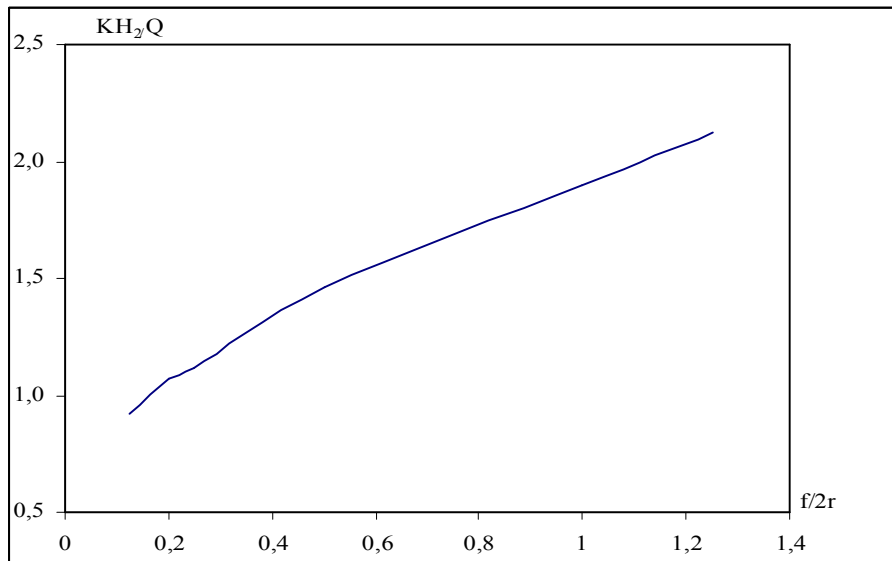


Figure IV.71 : Variation des pertes de charge en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$ coté aval.

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**.

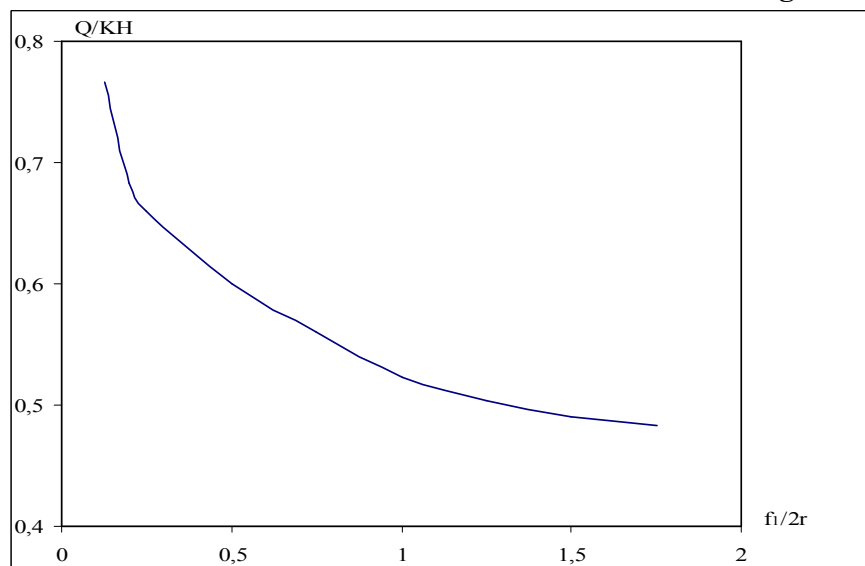


Figure IV.72 : Variation du débit total en fonction de $f_i/2r$.

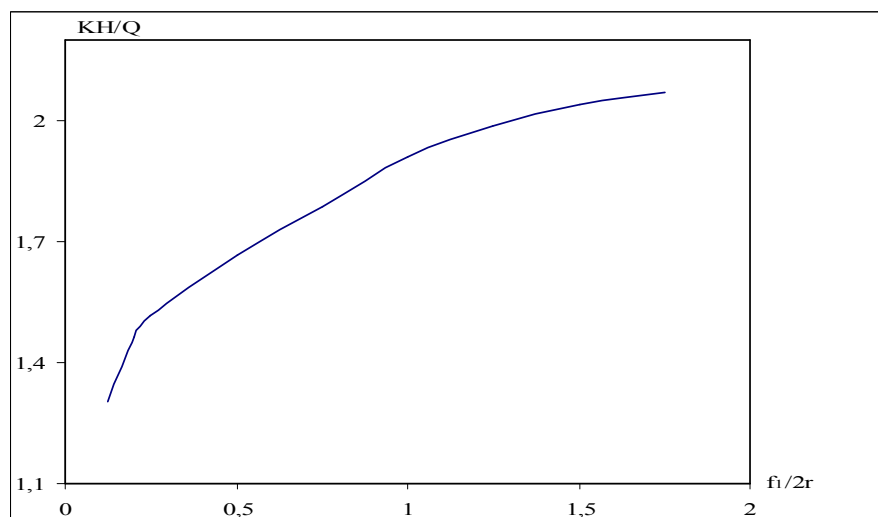


Figure IV.73 : Variation des pertes de charge totales en fonction de $f_i/2r$.

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.

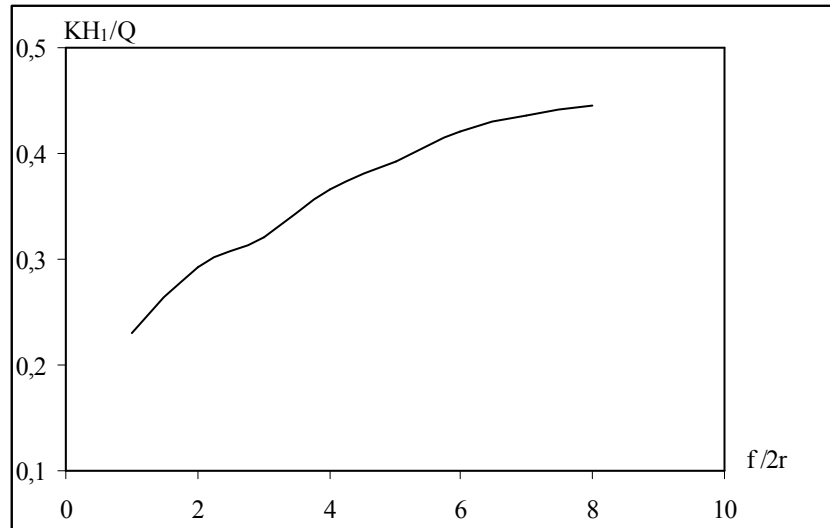


Figure IV.74 : Variation des pertes de charge en fonction de $f/2r$ dans le coté amont.

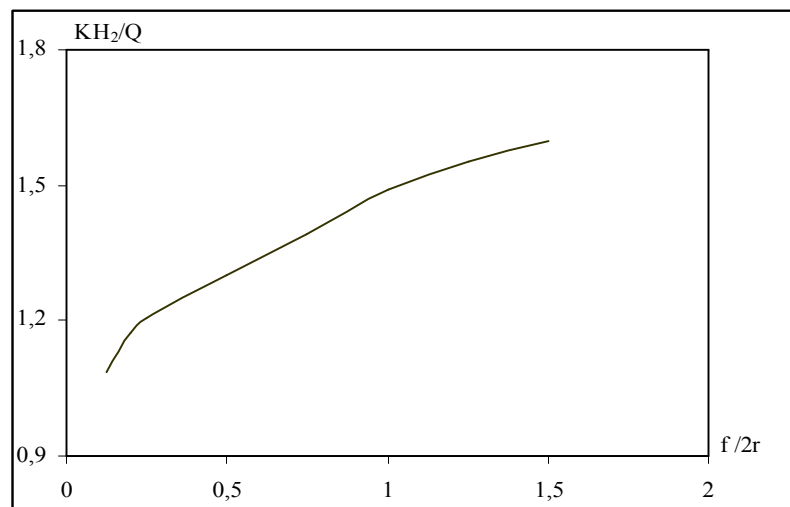


Figure IV.75 : Variation des pertes de charge en fonction de $f/2r$ dans le coté aval.

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 $f/2r$.

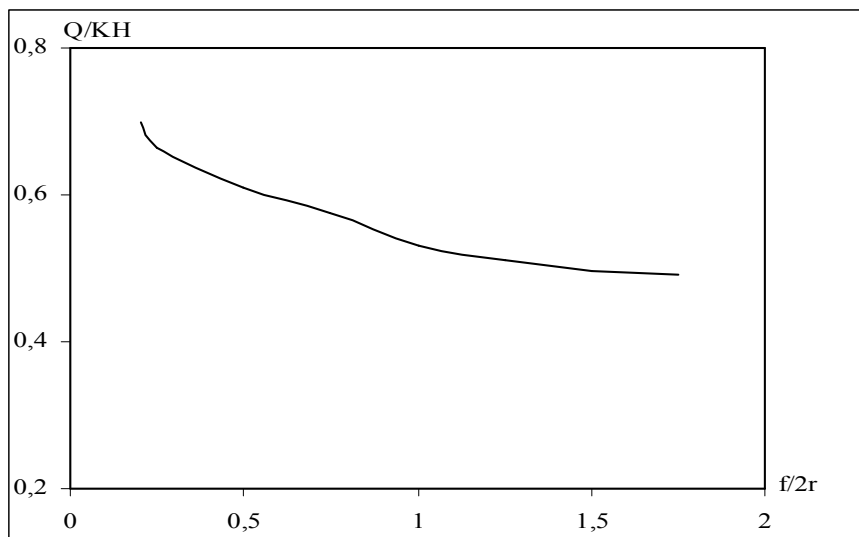


Figure IV.76 : Variation du débit total en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

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).

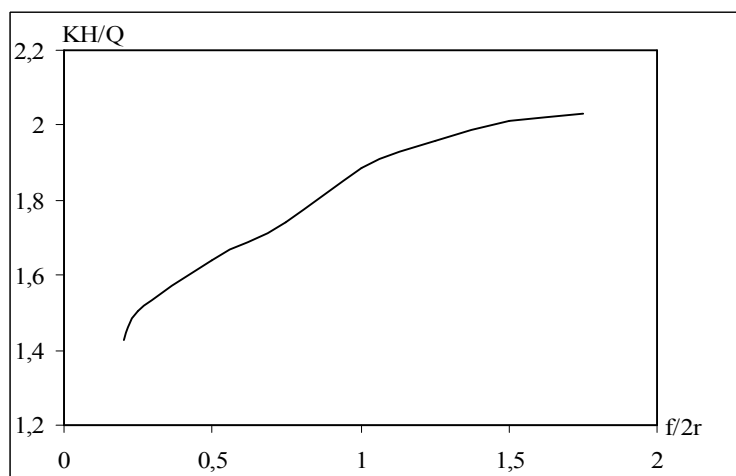


Figure IV.77 : Variation des pertes de charge totales en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

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.

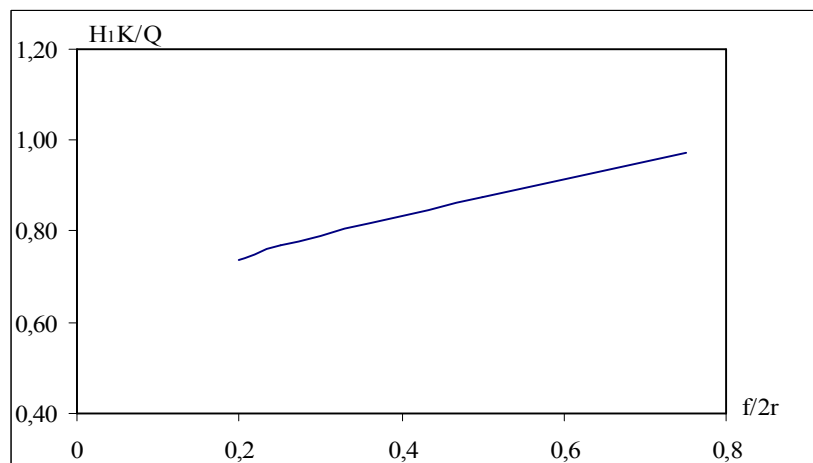


Figure IV.78 : Variation des pertes de charge en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$ dans le coté amont.

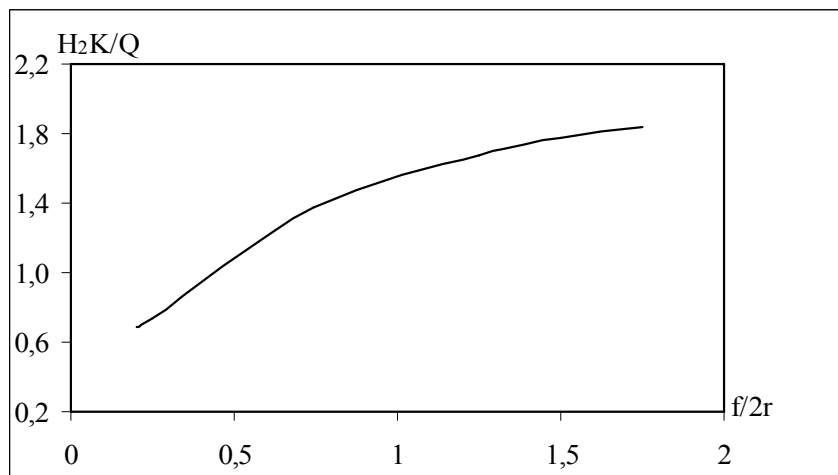


Figure IV.79 : Variation des pertes de charge en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$ dans le coté aval.

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

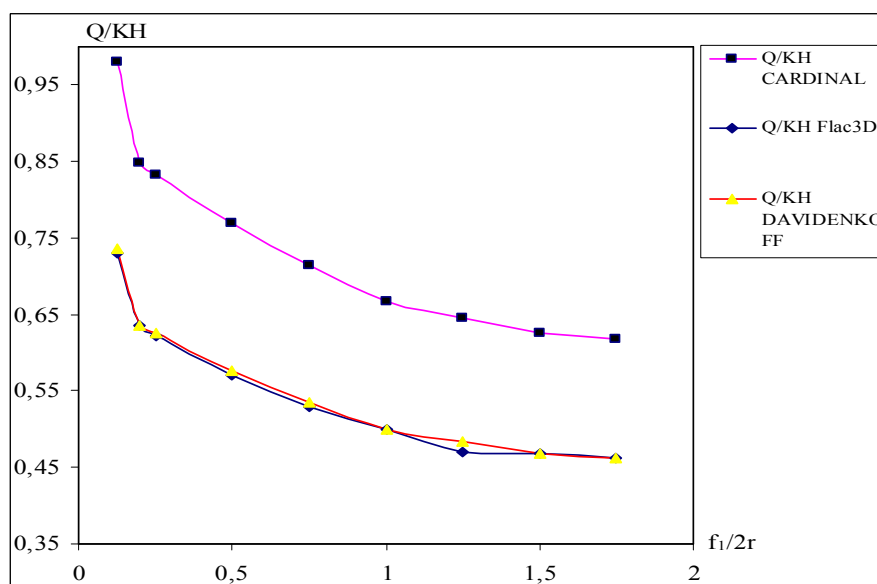


Figure IV.80 : Comparaison du débit total en fonction de $f_1/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

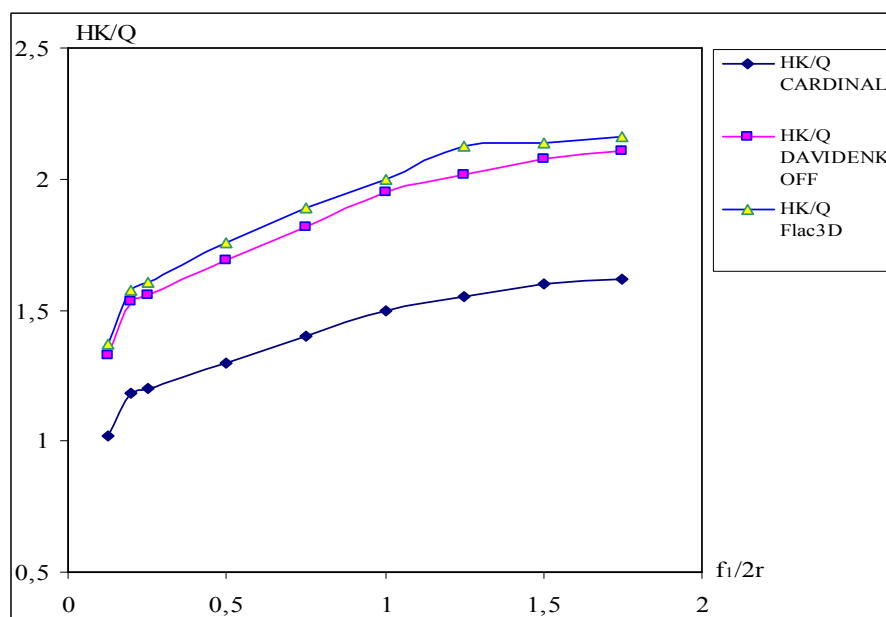


Figure IV.81 : Comparaison des pertes de charge totales en fonction de $f_1/2r \frac{K_v}{\sqrt{K_n}}$.

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 numérique 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 $(HK/Q)_{plan} * 1.3$	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

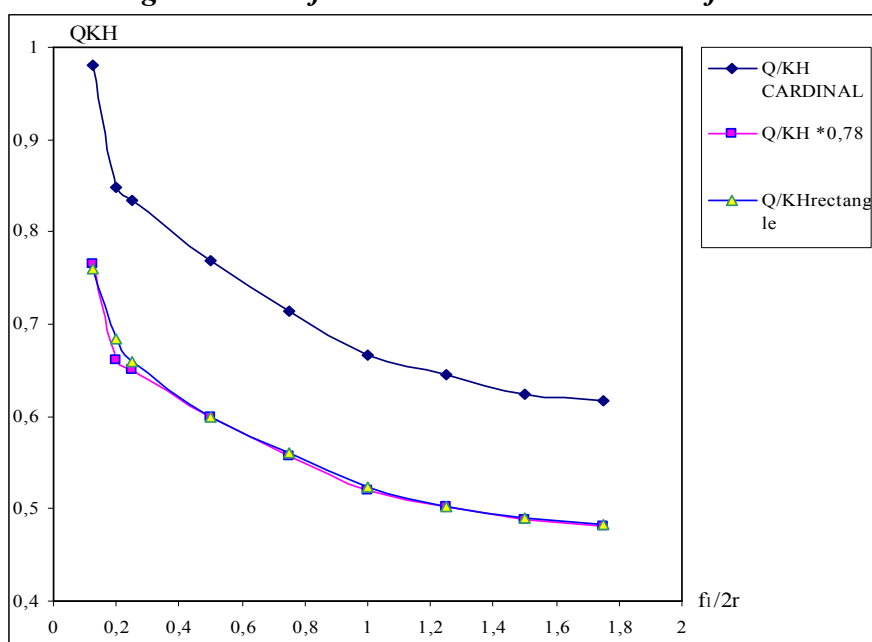


Figure IV.82 : Comparaison du débit total en fonction de $f_i/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

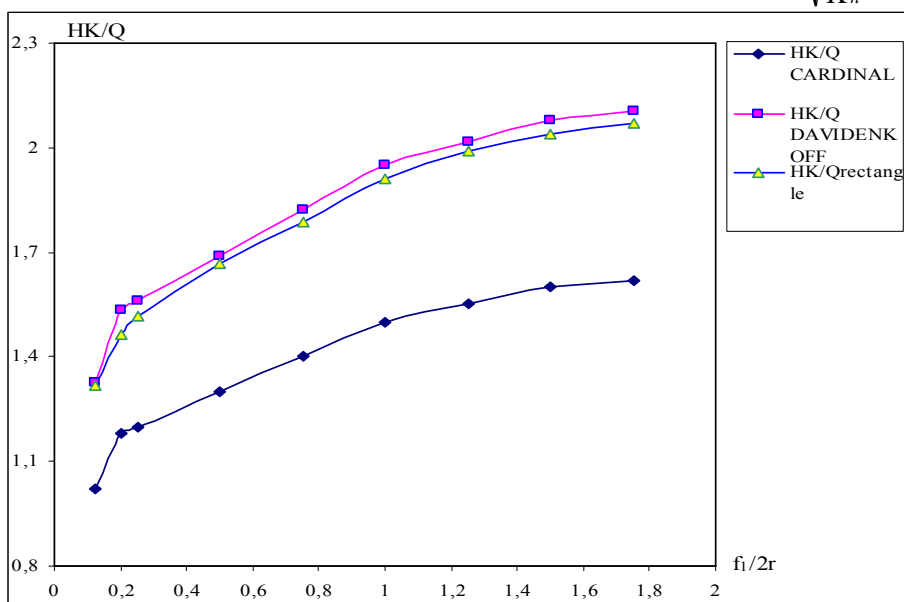


Figure IV.83 : Comparaison des pertes de charge totales en fonction de $f_i/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

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 %.

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 DAVIDONKOFF 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

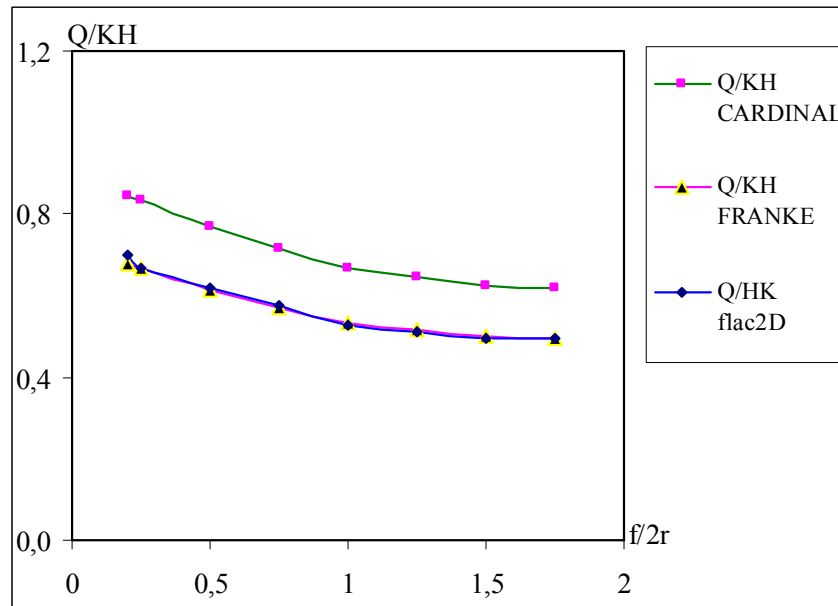
Tableau IV.25 : Comparaison des pertes de charge totales avec DAVIDENKOFF et FRANKE.

$f/2r$	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.

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.

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.

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

Il ressort de cette étude que la vitesse de résolution obtenue par un modèle numérique en **axisymétrie** permet d'effectuer des études en un court laps 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.

CHAPITRE V

PREVISION NUMERIQUE TRIDIMENSIONNELLE DU RENARD DANS LES ÉCOULEMENTS DE CONTOURNEMENT DES ÉCRANS ÉTANCHES

V.1 Introduction

Les rabattements de nappe à l'abri d'une enceinte étanche sont particulièrement favorables à l'apparition du renard par l'écoulement vertical ascendant qu'ils induisent. Le terme renard couramment utilisé recouvre en fait deux phénomènes distincts. La boullance et le soulèvement généralisé, le second, accident brutal pouvant avoir des conséquences dramatiques, est heureusement assez rare car souvent précédé par la boullance. Celle-ci, phénomène de surface souvent localisé, apparaît plus fréquemment, parfois même sous l'effet d'écoulement naturel, ne mettant pas en cause brutalement la stabilité d'ensemble du fond de fouille, ces incidents n'en ont pas moins des conséquences parfois importantes pour le chantier lui-même (difficultés de circulation des engins, débits très importants pouvant conduire à l'arrêt du chantier, injections d'étanchement), comme pour son environnement (tassement dû à l'entraînement d'horizons de sable fin) (KASTNER [1982]).

Le phénomène élémentaire provoquant le renard est bien connu et expliqué par la notion de gradient hydraulique critique. Par contre, l'application de cette notion au problème de l'écoulement autour d'un écran étanche est complexe, cet écoulement n'étant pas uniforme de plus, le frottement interne du sol s'oppose partiellement au soulèvement généralisé. En pratique, le problème est encore compliqué par l'hétérogénéité marquée du sol vis à vis de la perméabilité.

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

Le présent chapitre de notre étude a pour but, la prévision numérique des gradients moyen et de sortie caractérisant le phénomène de renard dans les écoulements contournant des écrans étanches de forme : *carré*, *rectangulaire* et *circulaire* à partir des résultats issues du calcul numérique du chapitre précédent.

Afin de mettre au point un nouvel outil de calcul de ces grandeurs dans les écoulements tridimensionnels, des abaques à base de calcul numérique seront proposés.

V.2 Gradient de sortie des batardeaux tridimensionnels et coefficient de sécurité à la boulangerie

Dans l'approche numérique, le gradient de sortie peut être évalué au sein de chaque maille ou chaque point. Ainsi, on a pu évaluer le gradient de sortie suivant chaque maille du modèle **3D** testé.

En outre, le gradient de sortie est obtenu par la différence de charge dans une maille par la longueur du parcours de l'écoulement.

Habituellement, le gradient hydraulique de sortie le plus maximum est obtenu aux points de sortie au contact de l'écran étanche ou autour des *coins* (corners) (MUNI BUDHU [2000]).

De notre côté, On a constaté après plusieurs tests de calculs numériques par le code numérique Flac3D, que le gradient de sortie en **3D** le plus maximum est obtenu dans la zone du *coin* de batardeau (l'angle) où les pressions interstitielles sont les plus grandes et par conséquent les pertes de charge sont prépondérantes comme le montre la figure suivante : (Figure V.1).

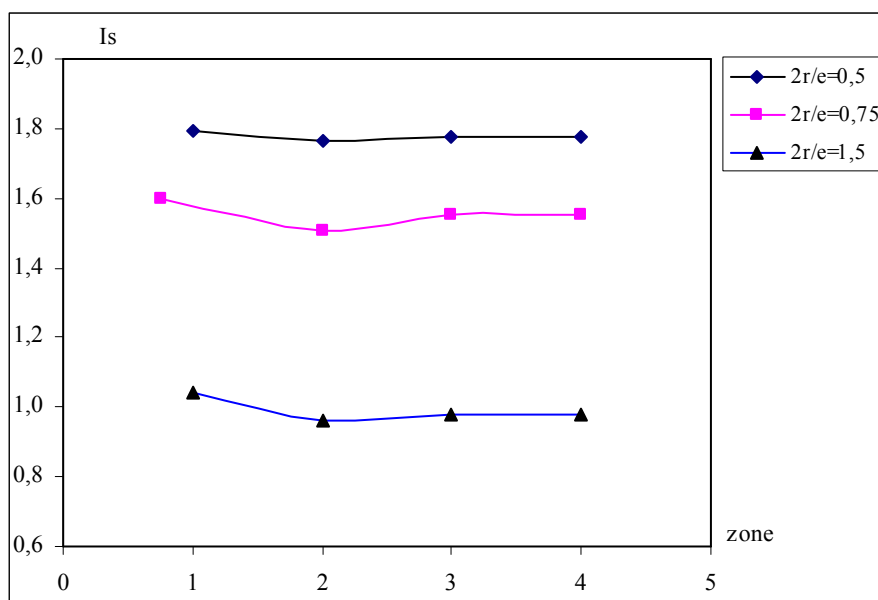


Figure V.1 : Variation du gradient de sortie en fonction de $2r/e \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

Dans cette figure, la plus grande valeur de $I_s = 1.792$ est celle calculée dans la zone **1** du coin de la fouille, et cette valeur diminue avec l'augmentation de la largeur du batardeau.

1. Coefficient de sécurité à la boulangerie F_b

Par définition, le coefficient de sécurité à la boulangerie est le rapport entre le gradient critique et le gradient de sortie (I_{max}).

$$\text{Soit :} \quad F_b = I_c / I_s \quad (\text{V.1})$$

Où :

$$I_c = (G_s - 1)(1 - n) \quad (\text{V.2})$$

Avec G_s poids volumique du sol, n la porosité du milieu et I_c le gradient critique. Dans le cas qui intéresse notre étude $I_c = 1$.

Donc :
$$F_b = \frac{1}{I_s} \quad (\text{V.3})$$

Avec :

F_b : coefficient de sécurité à la boullance.
 I_s : gradient de sortie.

Remarque

Du moment que le gradient de sortie est inférieur au gradient moyen, le phénomène de la boullance se passe après le soulèvement.

Pour une géométrie particulière de l'excavation et le type de sol, le gradient de sortie peut être déterminé (par le réseau d'écoulement ou l'analyse numérique) et ainsi on peut déduire le facteur de sécurité.

Le facteur de sécurité contre le soulèvement est pris égal à $(\gamma')/(I_m \gamma_w)$. Utilisant notre méthode numérique, I_m peut être déterminé de la charge moyenne le long de la fiche d'où on calcule le facteur de sécurité.

V.3 Gradient moyen des batardeaux tridimensionnels et coefficient de sécurité au soulèvement

De même comme pour le cas du gradient de sortie, on a constaté après plusieurs tests de calculs numériques que le gradient moyen le plus maximum en **3D** est obtenu dans la zone au-dessous immédiat de l'écran étanche du *coin* du batardeau (l'angle) où les pressions interstitielles sont les plus grandes et ainsi les pertes de charge sont prépondérantes comme le montre la figure suivante :

(Figure V.2).

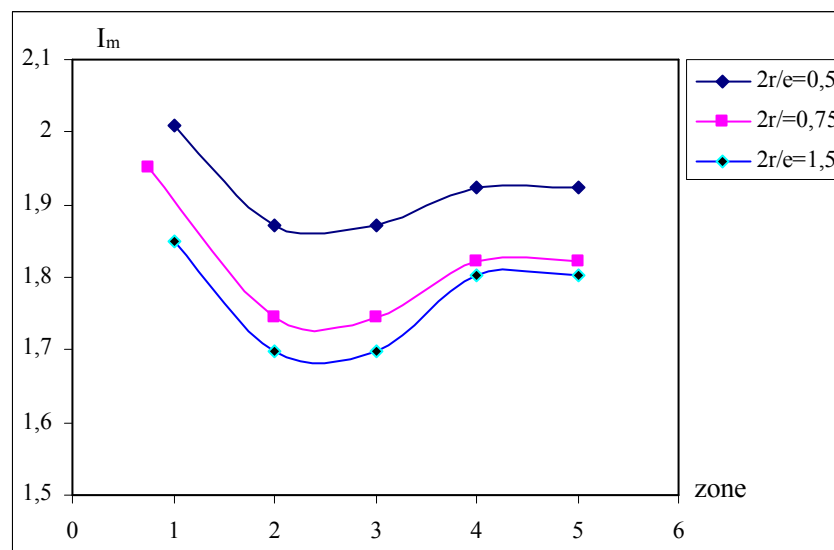


Figure V.2 : Variation du gradient moyen en fonction de $2r/e \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

Dans cette figure, la plus grande valeur de $I_m = 2.009$ est celle calculée dans la zone du *coin* de la fouille au-dessous de l'écran étanche, et cette valeur diminue avec l'augmentation de la largeur du batardeau.

2. Coefficient de sécurité au soulèvement

Par définition, le coefficient de sécurité au soulèvement est le rapport entre le gradient critique et le gradient moyen (I_m).

$$\text{Soit :} \quad F_s = I_c/I_m \quad (\text{V.4})$$

Où $I_c = 1$

$$\text{Donc :} \quad F_s = \frac{1}{I_m} \quad (\text{V.5})$$

Avec :

F_s : coefficient de sécurité au soulèvement.

I_m : gradient moyen.

V.4 Gradient de sortie et coefficients de sécurité des batardeaux tridimensionnels sans fouille en milieu fini

Les figures V.3, V.5, V.7 et V.8 présentent les variations des valeurs du gradient de sortie obtenues par les codes numériques Flac3D et Flac2D en fonction de la fiche relative du batardeau dans un milieu fini. Les figures V.4, V.6 et V.9 quant à elles présentent les variations des coefficients de sécurité en fonction de la largeur et de la fiche relative du batardeau.

V.4.1 Cas des batardeaux tridimensionnels carrés

On constate dans ce cas que le gradient de sortie augmente lorsque $f/e < 0.45$, et dès que $f/e > 0.5$, le gradient de sortie diminue.

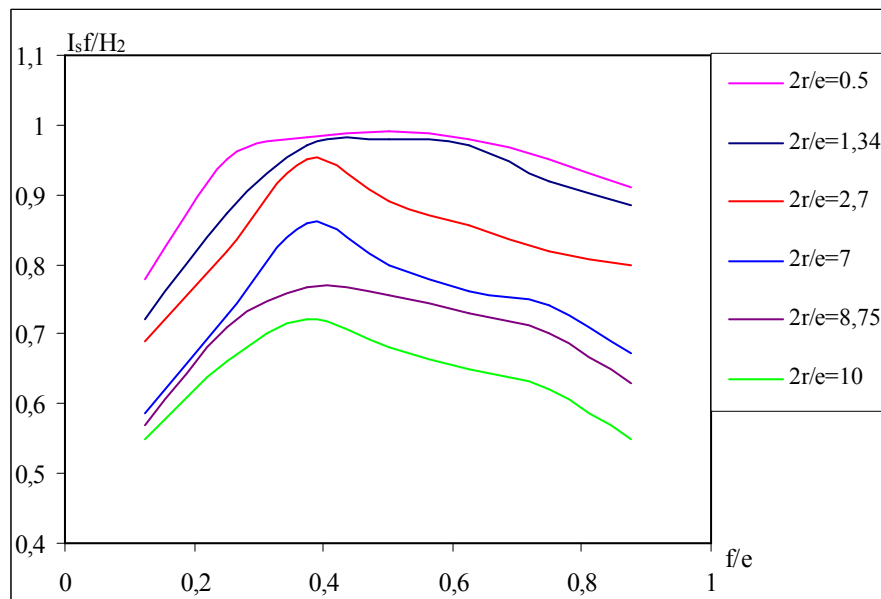


Figure V.3 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f/e \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

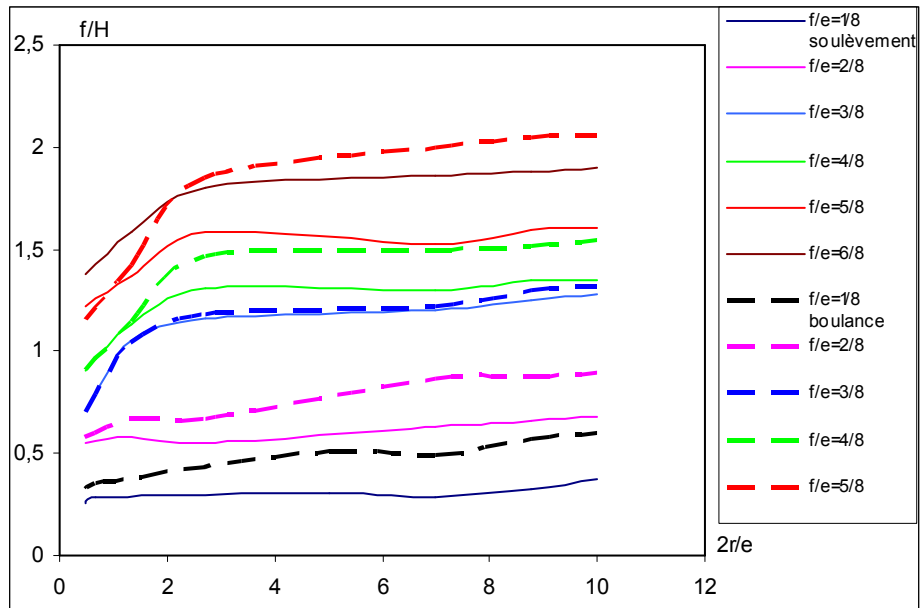


Figure V.4: Variation des coefficients de sécurité en fonction de $2r/e \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

V.4.2 Cas des batardeaux tridimensionnels rectangulaires

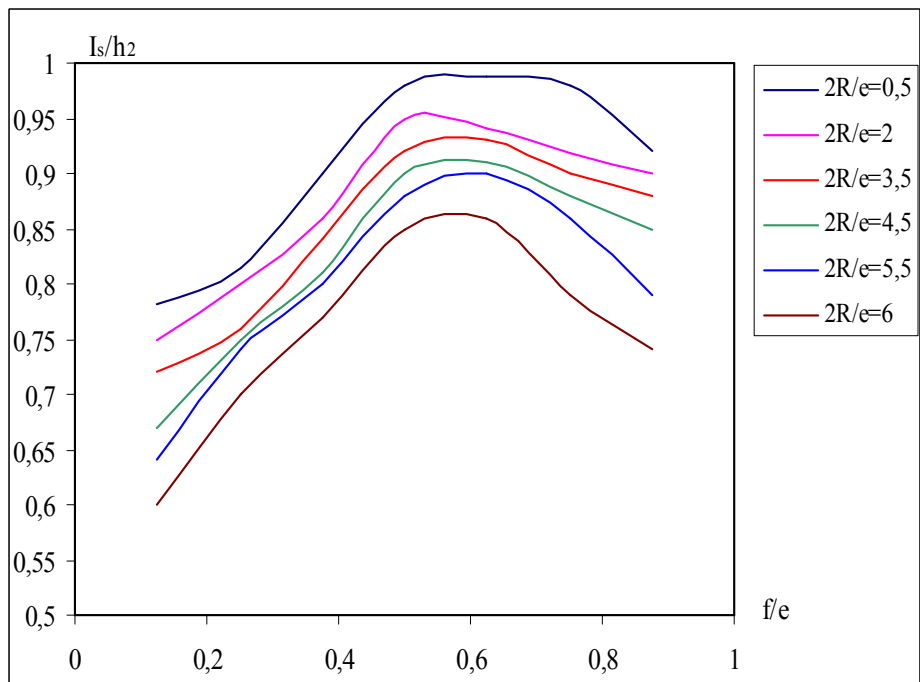


Figure V.5 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f/e \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

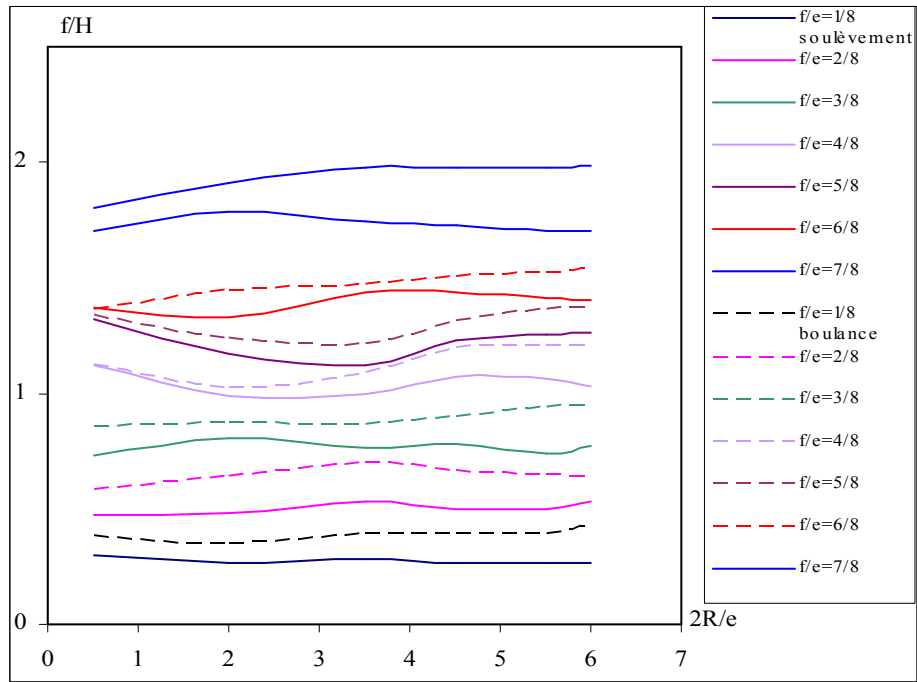


Figure V.6 : Variation des coefficients de sécurité en fonction de $2R/e \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

V.4.3 Cas des batardeaux axisymétriques circulaires

On constate que le gradient de sortie augmente lorsque $f/e < 0.45$, et dès que $f/e > 0.45$, le gradient de sortie diminue.

On remarque que les valeurs des coefficients de sécurité restent constantes dès que $2r/e=2.5$ ce qui représente les fouilles larges.

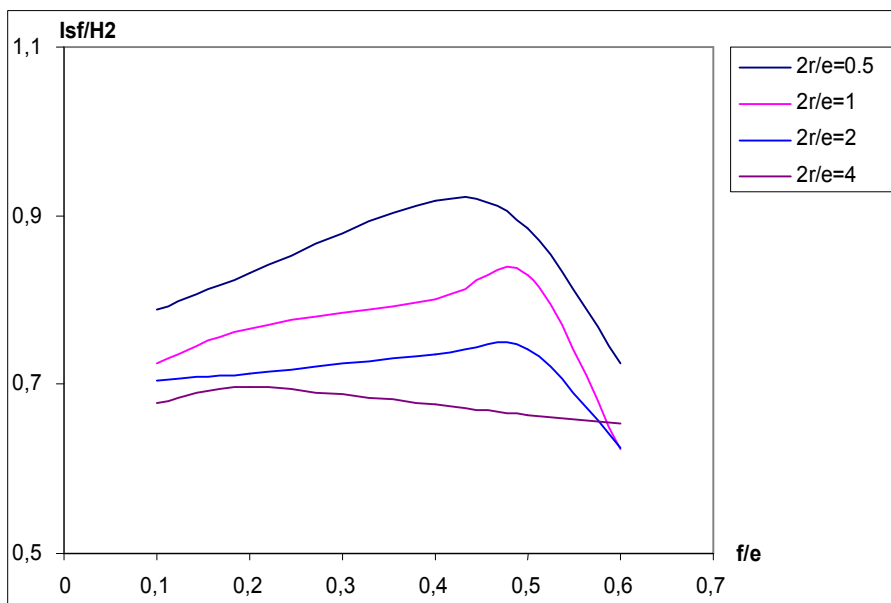


Figure V.7 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f/e \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

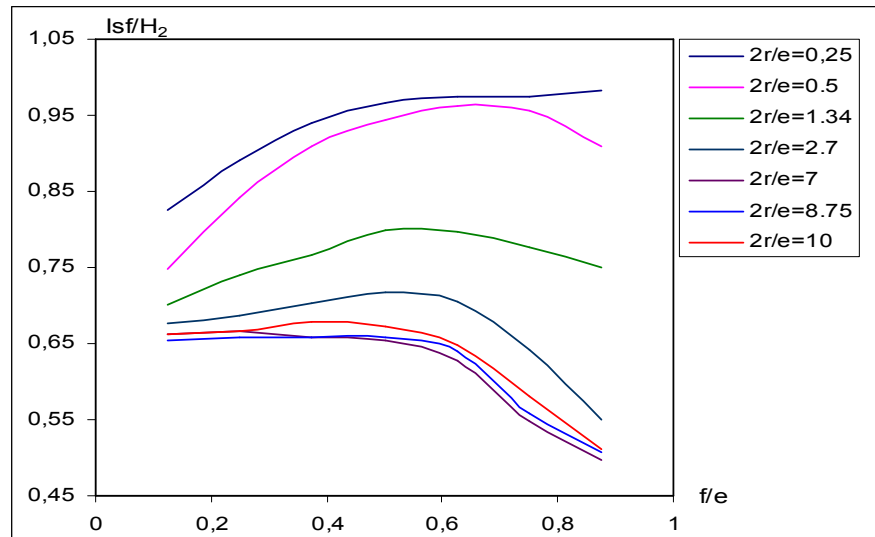


Figure V.8 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f/e \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

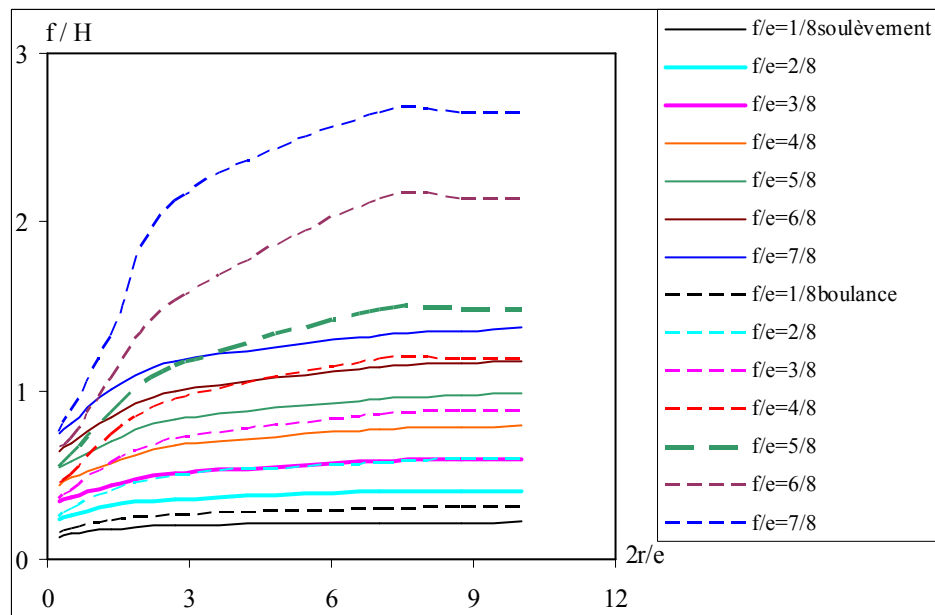


Figure V.9 : Variation des coefficients de sécurité en fonction de $2r/e \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

V.5 Gradient de sortie et coefficients de sécurité des batardeaux tridimensionnels sans fouille en milieu semi-infini

On présente sur les figures V.10, V.12 et V.14 les variations des valeurs du gradient de sortie obtenues par les codes Flac3D et Flac2D en fonction de la fiche relative dans un milieu semi-infini. Les figures V.11, V.13 et V.15 quant à elles donnent les variations des coefficients de sécurité en fonction de la largeur et de la fiche relative du batardeau.

V.5.1 Cas des batardeaux tridimensionnels carrés

On constate que la courbe du gradient de sortie augmente légèrement au début et elle augmente fortement à partir de la valeur $f/2r=0,5$ ce qui représente les batardeaux étroits.

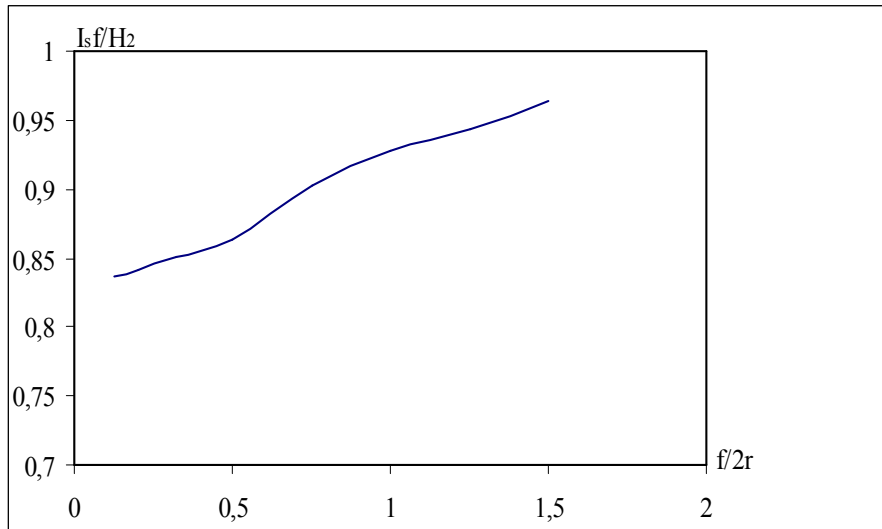


Figure V.10 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

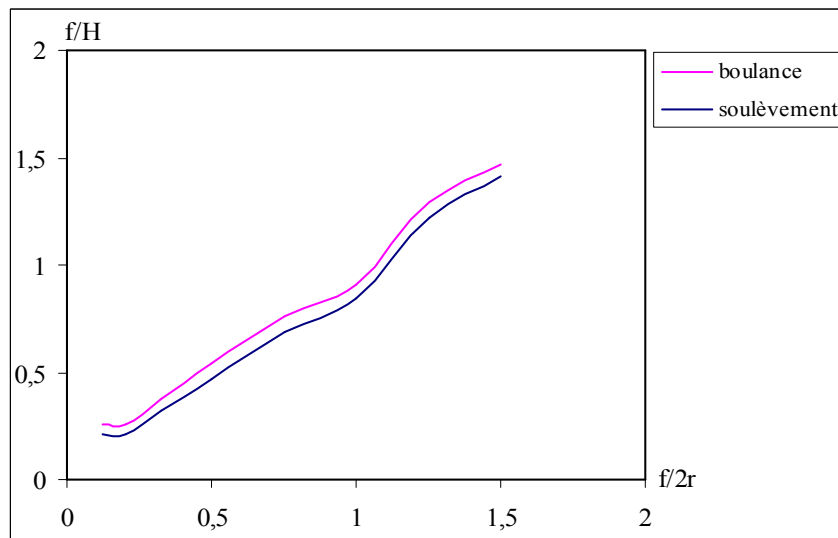


Figure V.11 : Variation des coefficients de sécurité en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

V.5.2 Cas des batardeaux tridimensionnels rectangulaires

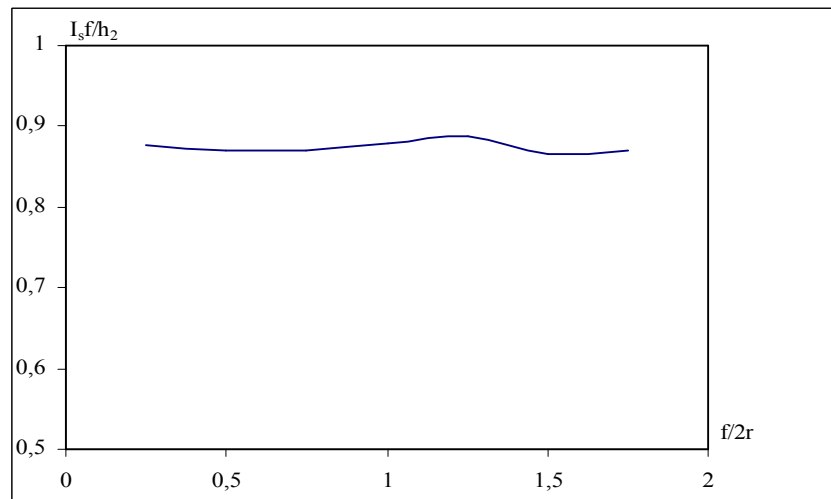


Figure V.12 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

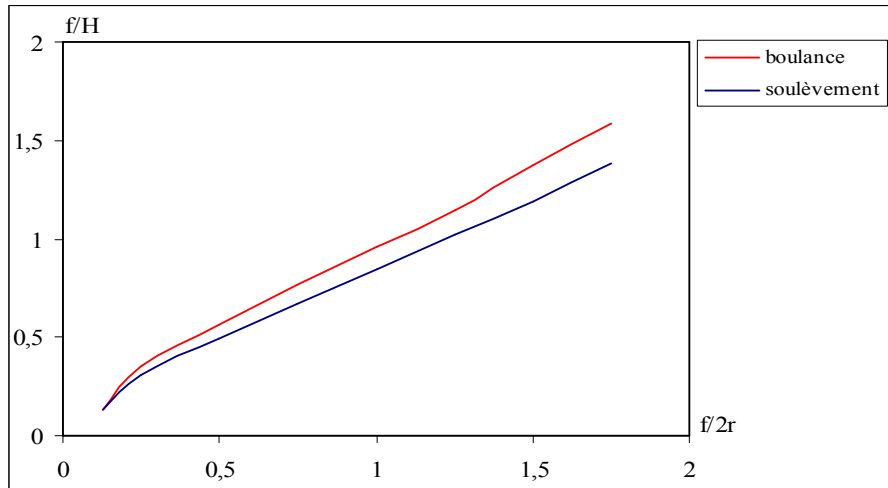


Figure V.13: Variation des coefficients de sécurité en fonction de $f/2r$.

V.5.3 Cas des batardeaux axisymétriques circulaires

On constate que la courbe du gradient de sortie diminue légèrement au début et elle devient presque constante pour $0.23 < f/2r < 0.65$ qui représente les batardeaux larges, et elle augmente à partir de la valeur $f/2r = 0.75$ ce qui représente les batardeaux étroits. De plus, la Figure V.15 nous montre qu'il est presque difficile de faire la distinction entre les deux facteurs de sécurité, car les deux courbes sont confondues.

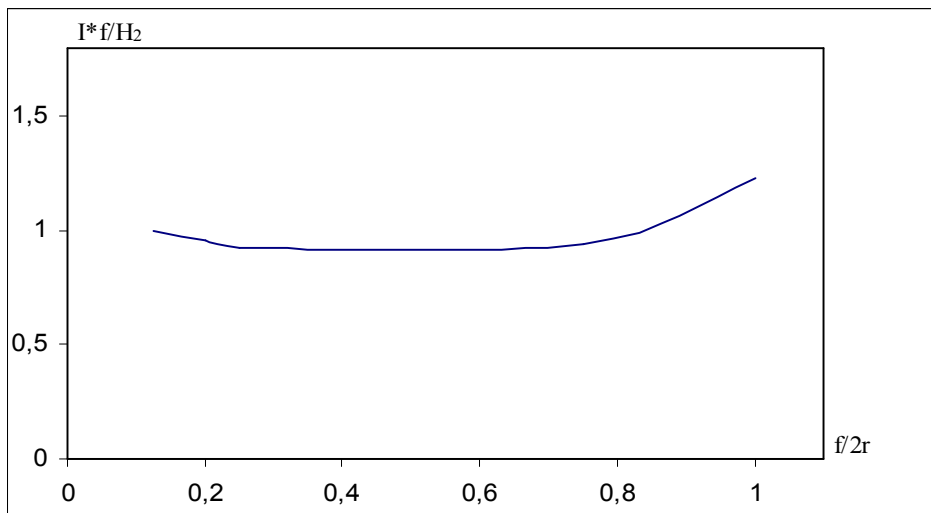


Figure V.14 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f/2r$.

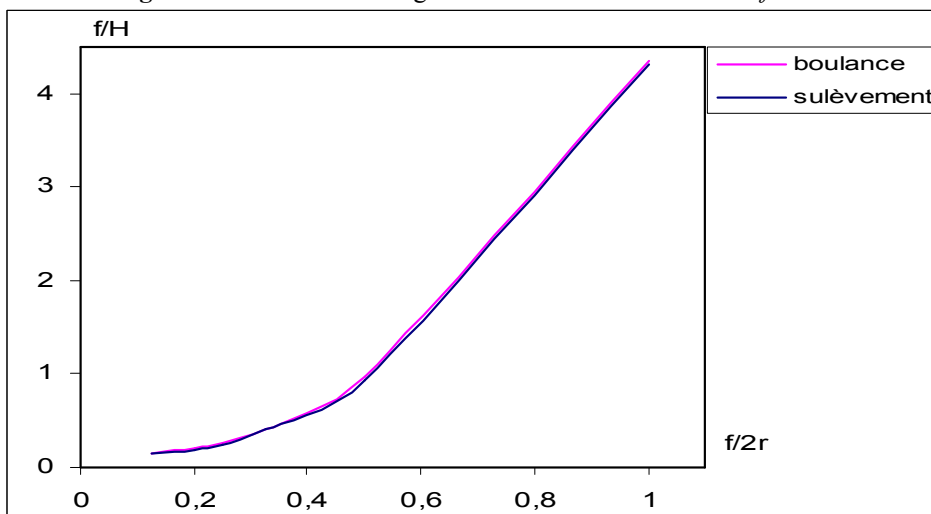


Figure V.15 : Variation des coefficients de sécurité en fonction de $f/2r$.

V.6 Gradient de sortie et coefficients de sécurité des batardeaux tridimensionnels avec fouille en milieu fini

Les figures V.16, V.18, V.20 et V.21 donnent les variations du gradient de sortie en fonction de $f_2/e_2 \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$ en milieu fini. Tandis que les figures V.17, V.19 et V.22 présentent les variations des coefficients de sécurité en fonction de la largeur et de la fiche relative du batardeau.

V.6.1 Cas des batardeaux tridimensionnels carrés

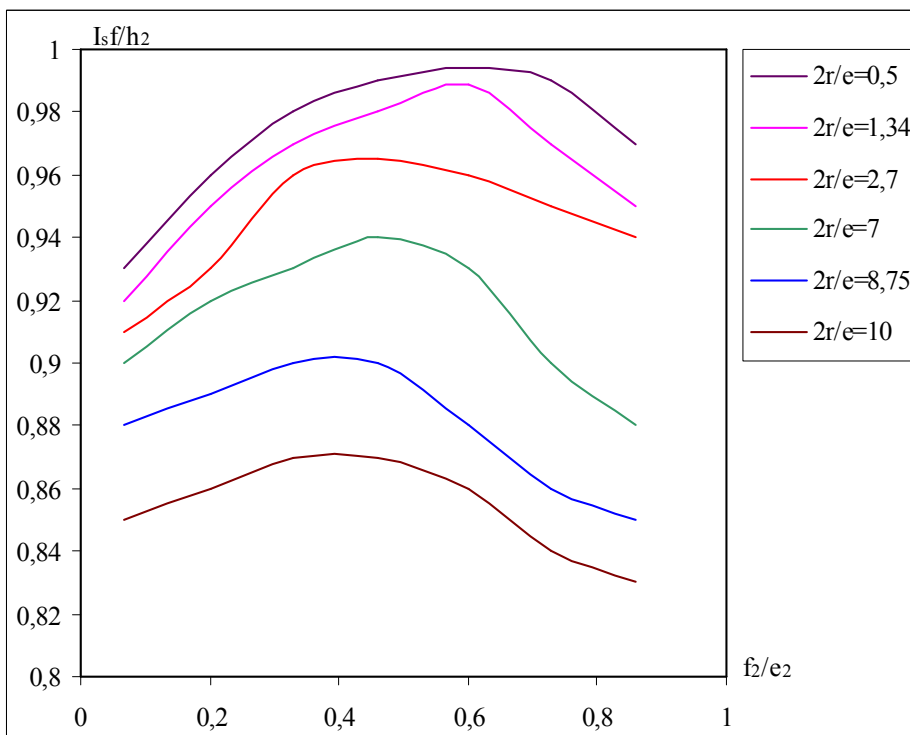


Figure V.16 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f_2/e_2 \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

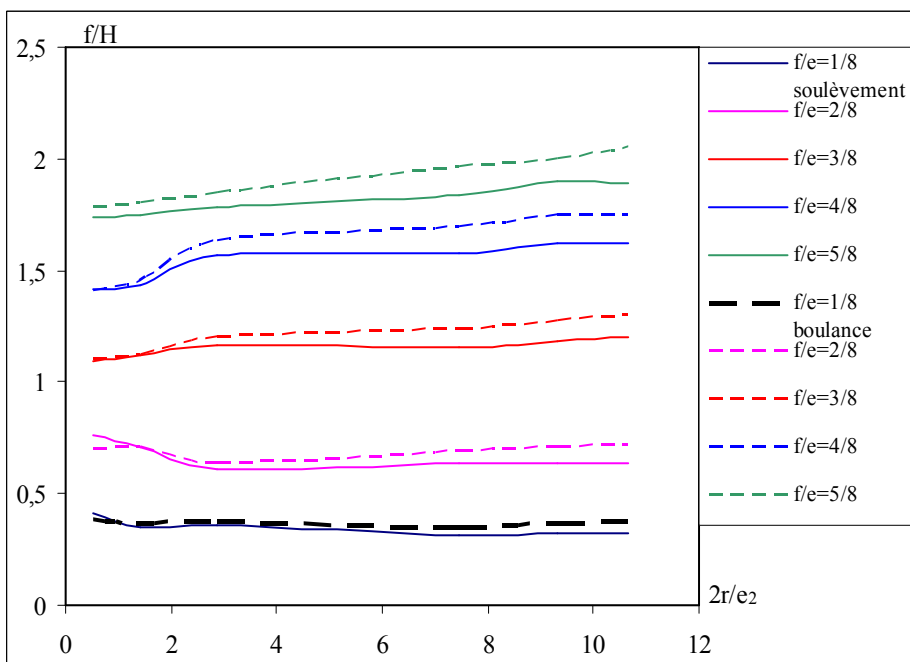


Figure V.17 : Variation des coefficients de sécurité en fonction de $2r/e_2 \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

V.6.2 Cas des batardeaux tridimensionnels rectangulaires

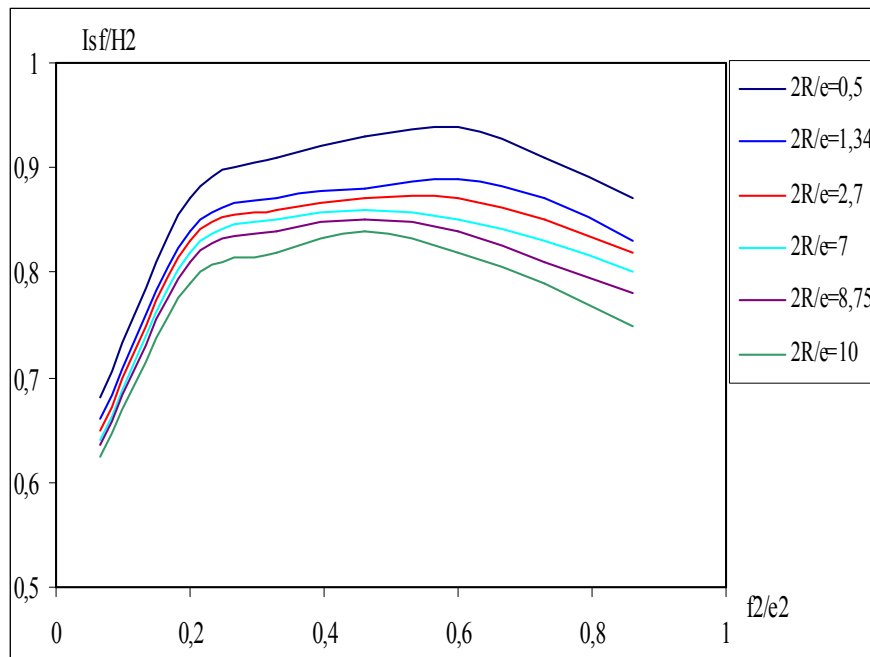


Figure V.18 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f_2/e_2 \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

- On remarque que les courbes de cet abaque sont presque confondues pour $0.067 < f_2/e_2 < 0.1$ et il apparaît qu'elles se rapprochent à une valeur comprise entre 0.6 et 0.65.

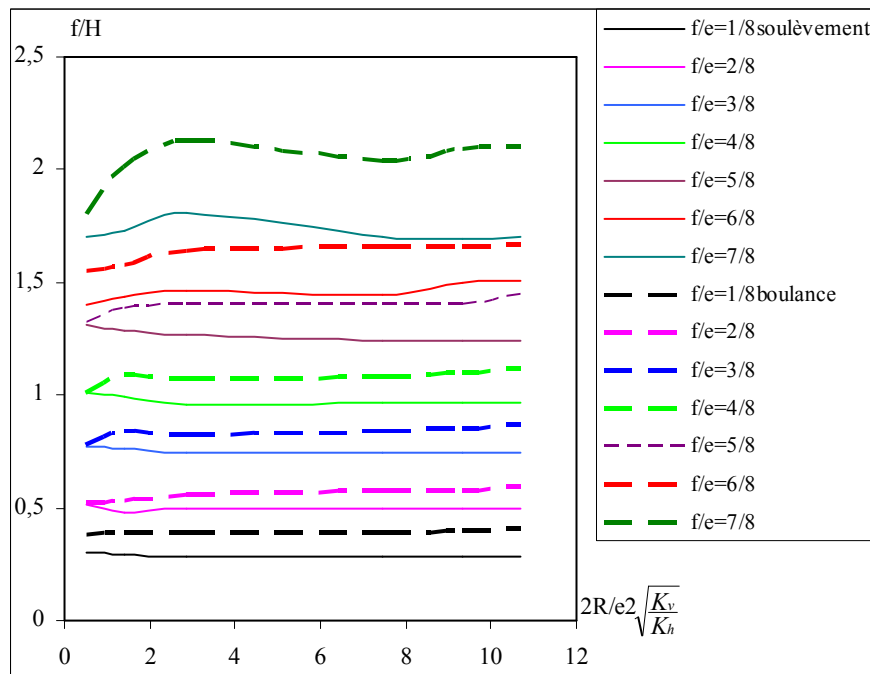


Figure V.19: Variation des coefficients de sécurité en fonction de $2R/e_2 \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

V.6.3 Cas des batardeaux axisymétriques circulaires

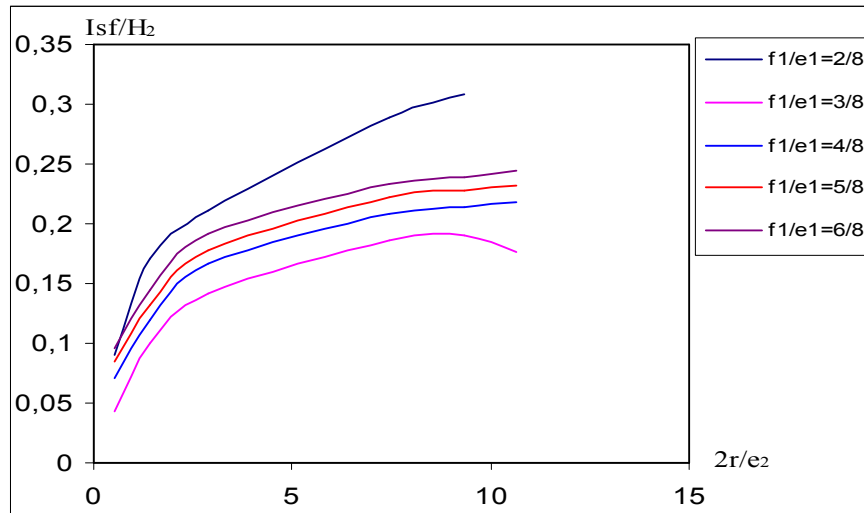


Figure V.20 : Variation du gradient de sortie en fonction de $2r/e_2 \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

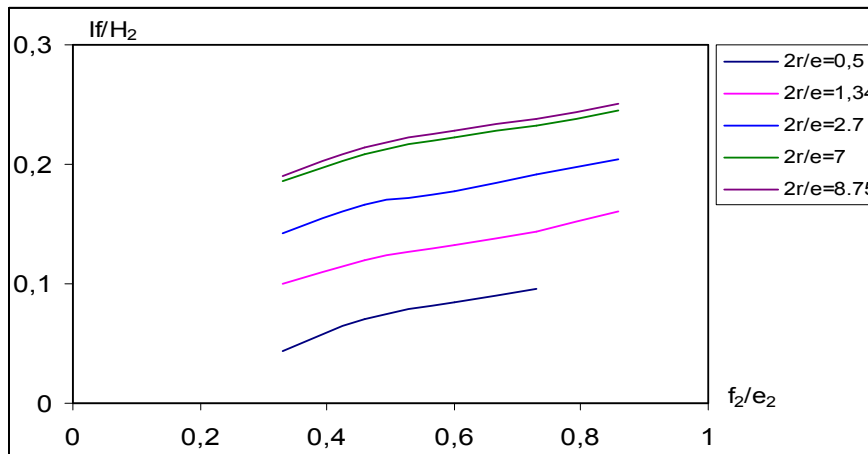


Figure V.21 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f_2/e_2 \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

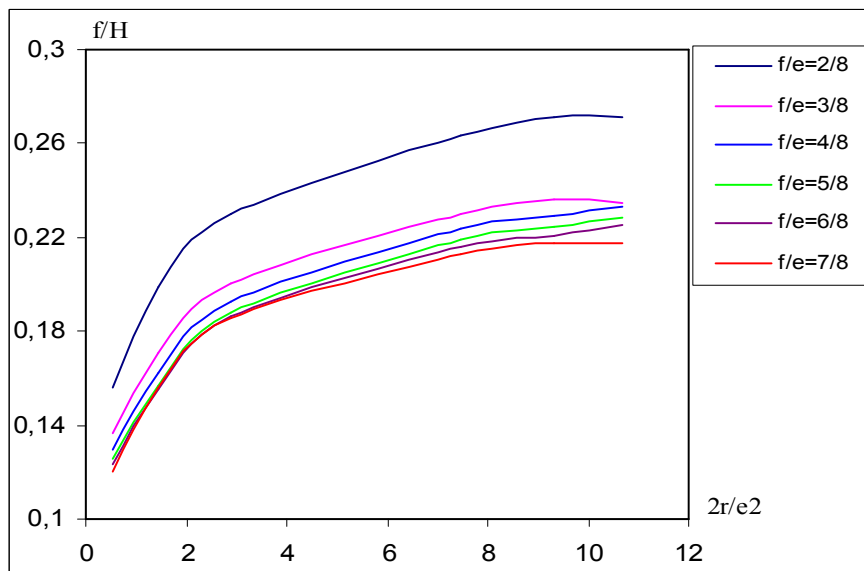


Figure V.22 : Variation des coefficients de sécurité en fonction de $2r/e_2 \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

En outre, le gradient de sortie diminue avec l'augmentation de la largeur et de la fiche relative du batardeau, ceci est expliqué par l'augmentation de la trajectoire de l'écoulement. Pour les fouilles larges, les valeurs du gradient de sortie restent constantes.

V.7 Gradient de sortie et coefficients de sécurité des batardeaux tridimensionnels avec fouille dans un milieu semi-infini

Les figures V.23, V.25 et V.27 illustrent les variations des valeurs du gradient de sortie obtenues par les codes Flac3D et Flac2D en fonction de la fiche relative dans un milieu semi-infini. Et les figures V.24, V.26 et V.28 présentent les variations des coefficients de sécurité en fonction de la largeur et de la fiche relative du batardeau.

V.7.1 Cas des batardeaux tridimensionnels carrés

On remarque que le gradient de sortie augmente avec l'augmentation de la fiche relative du batardeau.

En outre, lorsque $f/2r$ est élevé, le gradient moyen et le gradient de sortie tendent vers la même valeur. C'est ce dernier critère qu'il faut alors considérer.

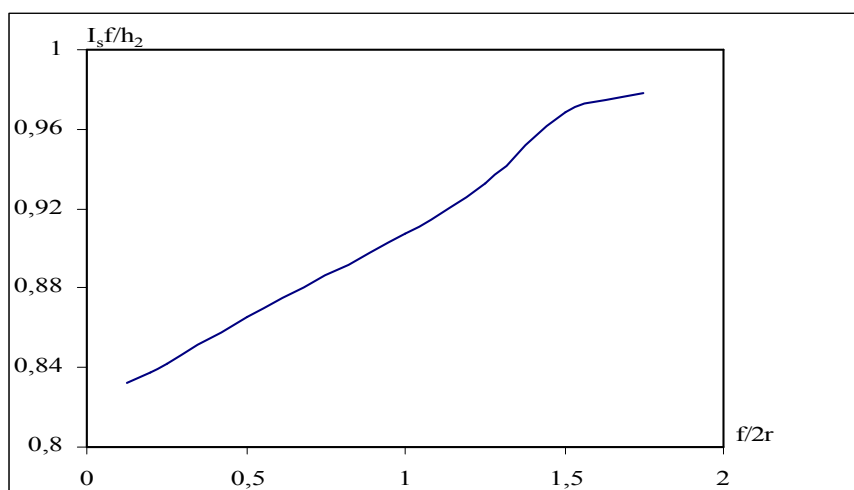


Figure V.23 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

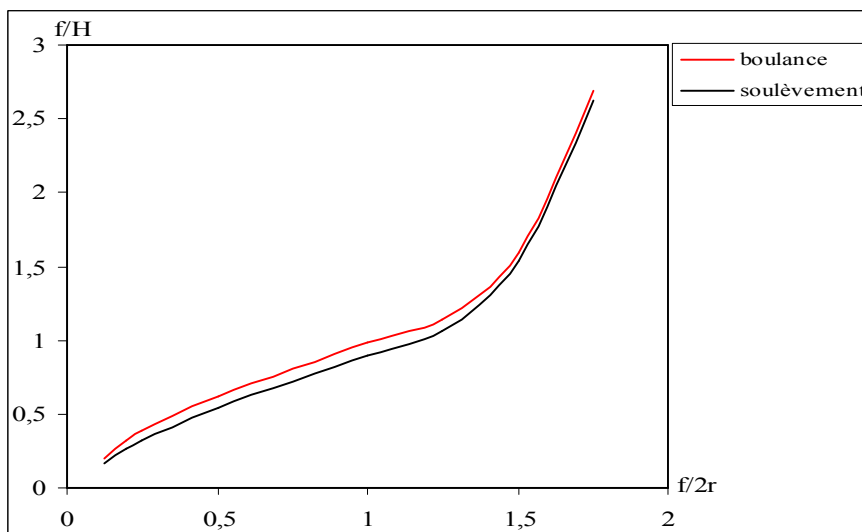


Figure V.24 : Variation des coefficients de sécurité en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

V.7.2 Cas des batardeaux tridimensionnels rectangulaires

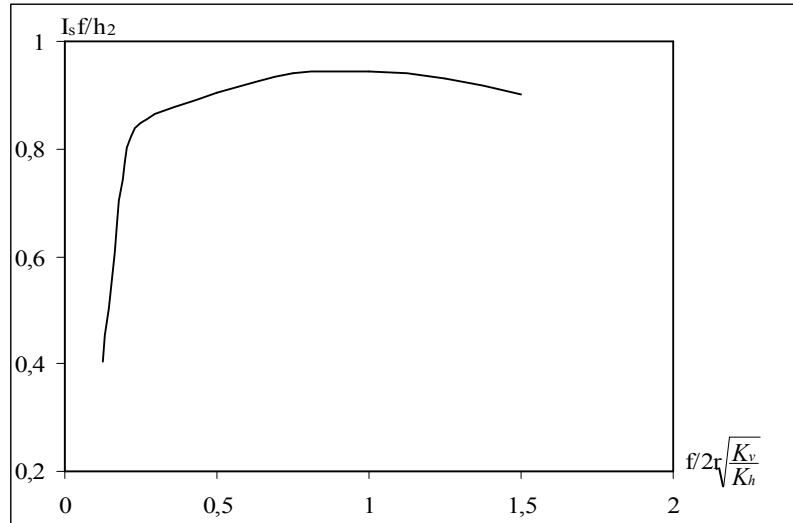


Figure V.25 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

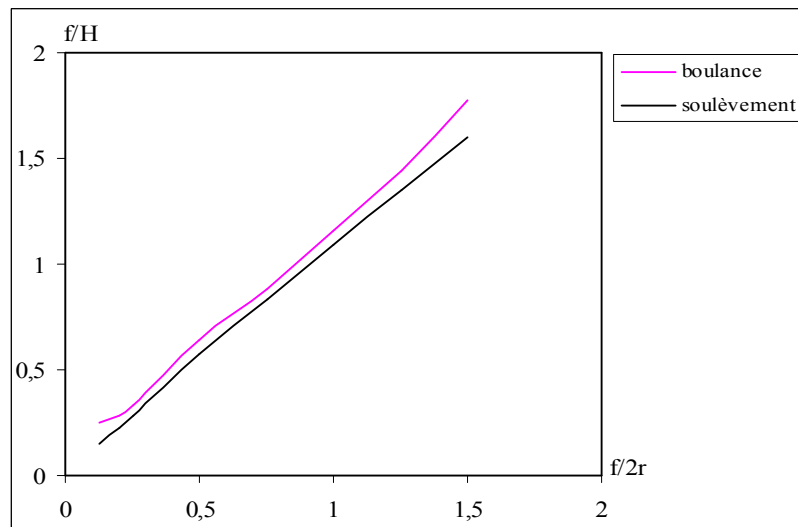


Figure V.26 : Variation des coefficients de sécurité en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

V.7.3 Cas des batardeaux axisymétriques circulaires

Il apparaît de la Figure V.27 que la courbe du gradient de sortie reste constante légèrement puis elle augmente à partir de la valeur $f/2r = 0.25$.

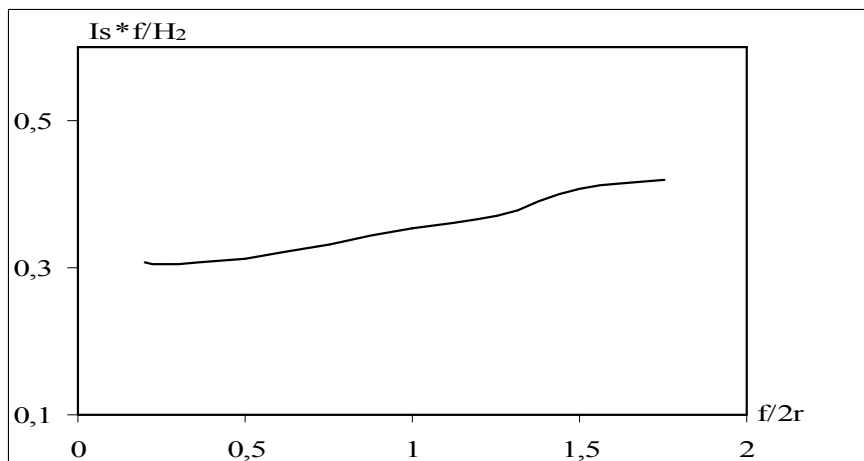


Figure V.27 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

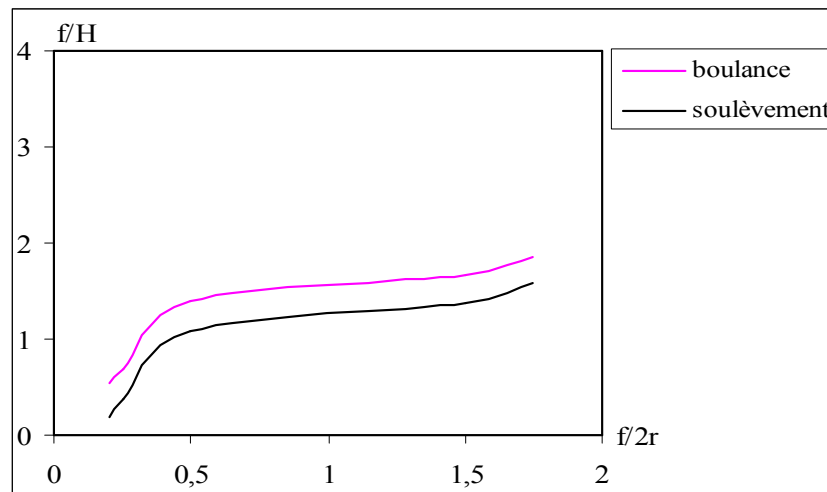


Figure V.28: Variation des coefficients de sécurité en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

Analyse de tous les résultats

1. Il apparaît en effet de ces diverses simulations pour le cas d'un milieu fini que le potentiel le long de la palplanche n'est pas affecté par l'alimentation du domaine si f/e et $f/2r$ sont simultanément faibles. Tout se passe alors, au voisinage de la palplanche, comme si elle était fichée dans un milieu semi-infini.

Lorsque $f/2r$ est élevé, on constate que le rapport adimensionnel $Is.f/h_2$ tend vers 1 pour les fouilles étroites, c'est-à-dire que le gradient de sortie tend vers le gradient moyen. L'écoulement entre les deux écrans devient sensiblement uniforme.

Nous avons vérifié la validité de cette hypothèse par comparaison avec les résultats de R. KASTNER [1982] (batardeau plan sans fouille dans un milieu fini). Ces tests, pour lesquels nous avons montré que le gradient adimensionnel $Is.f/h_2$ est très grand que celui du gradient plan, et ceci est dû aux pertes de charge supplémentaires dues à la convergence de l'écoulement vers le batardeau.

2. On peut voir à partir de toutes les figures qui donnent les variations des coefficients de sécurité contre la **boulance** et le **soulèvement** que ces courbes sont très proches, il est presque impossible de faire une différence entre elles dans le cas d'un milieu semi-infini. Par conséquent, les deux critères définissant la boulance et le soulèvement sont presque équivalents. En outre, l'augmentation de la largeur et de la fiche relative du batardeau induit une augmentation de la valeur du coefficient de sécurité et dès que $2r/e = 2.7$ cette valeur reste constante quelque soit la fiche relative. Il apparaît que pour n'importe quelle géométrie particulière, le facteur de sécurité contre le soulèvement est toujours un peu plus bas que celui contre la boulance qui signifie que le soulèvement doit être considéré comme le mode de rupture le plus critique. Ceci peut être expliqué théoriquement parce

qu'on voit que les deux phénomènes peuvent être représentés par le même facteur de sécurité, c'est-à-dire $F=I_c/I$ où I est le gradient de sortie d'un côté et le gradient moyen d'autre côté.

Il est raisonnable de penser que le gradient moyen du sol est plus grand que le gradient de sortie à cause des grands gradients existants au voisinage de l'écran étanche. Ces derniers peuvent être visualisés dans le réseau d'écoulement où les lignes équipotentielles sont habituellement serrées au voisinage de l'écran et donnent relativement de grands gradients. Par conséquent, le gradient moyen dans le bloc du sol est plus grand que le gradient de sortie, c'est pourquoi le facteur de sécurité contre la boulangerie est plus grand que celui du soulèvement.

V.8 Calcul pratique du gradient moyen I_m et gradient de sortie I_s

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

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

V.8.1 Calcul du gradient moyen

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

La méthode de calcul proposée est la suivante:

- On détermine le débit en fonction de la perte de charge totale H et de la perméabilité.
- On calcule ρ_1 ou $\frac{h_1\sqrt{k_v k_h}}{Q}$ et ρ_2 ou $\frac{h_2\sqrt{k_v k_h}}{Q}$ à partir des figures qui donnent les variations des pertes de charge en fonction de la largeur et de la fiche relative du batardeau.
- La perte de charge h_2 est calculée en fonction du débit déterminé dans l'étape précédente et de ρ_2 .
- Le gradient moyen est donné par la relation $I_m = h_2/f$.

V.8.2 Calcul du gradient de sortie

On propose, un calcul approché en reprenant l'hypothèse déjà adoptée pour le calcul de h_2 , on a examiné la variation de la quantité sans dimensions $I_s f/H_2$ en fonction de f/e et ce calcul a été réalisé pour les différents écoulements vers un batardeau quelconque.

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

- On calcule d'une part la valeur du gradient de sortie adimensionnel $I_s f/h_2$ à l'aide de des figures qui donnent les variations de ce rapport en fonction de la largeur et de la fiche relative du batardeau.
- On calcule ensuite h_2 suivant le processus décrit au paragraphe précédent d'où la valeur de I_s .

V.9 Tableau récapitulatif

BATARDEAUX TRIDIMENSIONNELS EN SOL HOMOGENE ANISOTROPE		
carré sans fouille – milieu fini	Abaque V.3, V.4	Page 142, 143
rectangulaire sans fouille – milieu fini	Abaque V.5, V.6	Page 143, 144
circulaire sans fouille – milieu fini	Abaque V.7, V.8, V.9	Page 144, 145
carré sans fouille – milieu semi infini	Abaque V.10, V.11	Page 146
rectangulaire sans fouille – milieu semi infini	Abaque V.12, V.13	Page 146, 147
circulaire sans fouille – milieu semi infini	Abaque V.14, V.15	Page 147
carré avec fouille – milieu fini	Abaque V.16, V.17	Page 148
rectangulaire avec fouille – milieu fini	Abaque V.18, V.19	Page 149
circulaire avec fouille – milieu fini	Abaque V.20, V.21, V.22	Page 150
carré avec fouille – milieu semi infini	Abaque V.23, V.24	Page 151
rectangulaire avec fouille – milieu semi infini	Abaque V.25, V.26	Page 152
circulaire avec fouille – milieu semi infini	Abaque V.27, V.28	Page 152, 153

Tableau V.1 : Résumé des diverses méthodes de calcul proposées.

V.10 Conclusion

Dans ce présent chapitre nous avons effectué une étude du phénomène de renard tout en calculant le gradient adimensionnel et les facteurs de sécurité contre la boullance et le soulèvement. On a fait alors évaluer le gradient critique qui cause ce phénomène. Ceci nous a conduit aux valeurs correspondantes du gradient moyen et de sortie et par conséquent les valeurs des coefficients de sécurité.

Nous avons montré à l'aide des tests réalisés en *trois dimensions* que les valeurs maximales du gradient moyen et de sortie sont obtenues dans les zones des singularités de très fortes pertes de charge qui sont les coins d'une fouille dans le cas d'un batardeau carré ou rectangulaire.

En effet, on note que les limites du modèle ont une petite influence sur les résultats numériques. Par contre le raffinement du maillage dans les zones les plus sollicitées conduit aux résultats de calcul des gradients hydrauliques et des coefficients de sécurité avec précision.

En dépit qu'il est encore difficile de compter complètement sur ces abaques par ce que leur construction est basée sur plusieurs hypothèses simplificatrices tel que le milieu homogène anisotrope et les conditions requises sont en écoulement permanent, ces abaques fournissent aux praticiens des approches numériques réalisés en *trois dimensions* proches à la réalité, car la plus part des abaques ou méthodes précédentes sont réalisées en deux dimensions et elles **sous-estiment** les valeurs des gradients moyen et de sortie d'un côté, et **surestiment** les valeurs des coefficients de sécurité contre la boullance et le soulèvement d'un autre côté.

Enfin, les résultats de ces calculs numériques nécessiteront bien entendu des confrontations avec les observations in-situ du phénomène de renard, ceci peut fournir de plus amples indications sur le mécanisme de rupture.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

Pour l'étude des écoulements en milieu saturé et en régime permanent, la méthode des différences finies explicite implantée dans le code de calcul numérique **Flac3D** s'avère précise, elle tient compte de l'effet tridimensionnel sur les différents résultats de calcul.

De nombreuses simulations numériques effectuées à l'aide du code Flac3D et Flac2D respectivement en *trois dimensions*, et en *axisymétrie* complétées par l'analyse des résultats existants, nous ont permis de proposer un outil de calcul simple des écoulements de contournement des écrans étanches. Il est constitué de méthodes de calcul approchées, à base d'abaques et de relations analytiques, et couvre de nombreux cas rencontrés en pratique : batardeaux *carrés*, *rectangulaires* et *circulaires*, avec ou sans fouille, milieu fini et semi-infini, alimentés verticalement, protégés par des parois minces ou épaisses. Chacune des méthodes approchées de la littérature est proposée avec un domaine d'application, et une marge d'incertitude, rarement supérieure à 5 %, pouvant entacher le débit calculé. En outre, les résultats concernant les configurations en trois dimensions permettront d'estimer l'influence de la troisième dimension sur les différents calculs.

Ce mémoire s'inscrit donc dans le cadre général de l'étude de l'écoulement tridimensionnel autour des écrans étanches de forme carrée, rectangulaire et circulaire. Plus particulièrement, l'objet du travail était de développer des techniques d'expérimentation numériques afin de caractériser le comportement tridimensionnel du problème étudié. Ces recherches présentent un intérêt certain pour toutes les applications en géotechnique, qu'il s'agisse de calculer le débit, les pertes de charge ou d'étudier le phénomène de renard. Mais ces travaux présentent un intérêt plus vaste, les modèles *tridimensionnel* et *axisymétrique* étant utilisés dans de nombreux contextes en géotechnique.

Le **premier chapitre** a été consacré à la définition des différents paramètres caractérisant le sol et à la présentation de méthodes qui peuvent être utilisées dans ce domaine de recherche.

Le **second chapitre** a été l'occasion de s'interroger sur les différentes méthodes expérimentales et analytiques disponibles dans la littérature, avec l'objectif de déterminer les plus adaptées au cas de batardeaux tridimensionnels. La méthode de DAVIDENKOFF et FRANKE pour le cas de batardeau carré et celle d'analogie électrique utilisée par KASTNER [1982] pour le cas d'un batardeau circulaire ont été sélectionnées. Les conditions d'une utilisation optimale de chacune des méthodes ont ensuite été définies. Ainsi, l'emploi des méthodes analytiques de solution des problèmes plans ont des limites de validations et nécessitent des conditions d'application. Ce travail a permis de montrer qu'il était préférable de limiter l'usage des méthodes analytiques au domaine des batardeaux larges à partir de la largeur relative $2r/e = 2.7$.

Le **troisième chapitre** avait pour objectif de présenter le code numérique aux différences finies explicites Flac (3D et 2D) utilisé dans notre travail.

Tous ces travaux ont permis la réalisation de l'étude de l'écoulement de l'eau autour des écrans étanches et l'expérimentation numérique qui a fait l'objet du quatrième et cinquième chapitre, et dont le **quatrième chapitre** a consisté à calculer le débit d'exhaure et les pertes de charge dans différents types du milieu considéré. On s'est intéressé au régime hydraulique stationnaire (régime permanent) à long terme avant et après le creusement (excavation) dans un milieu homogène anisotrope, et le calcul est en comportement élastique du sol.

Les conditions imposées sont symétriques autour de l'axe de la fouille. En conséquence, les résultats obtenus tels que débits d'exhaure, pressions interstitielles et pertes de charge dépendent de la largeur et de la fiche relative du batardeau ainsi de l'épaisseur du sol pour un milieu fini, mais ces caractéristiques dépendent uniquement de la largeur et de la fiche relative du batardeau ainsi de la perméabilité du sol dans le cas d'un milieu semi-infini.

Les résultats de calculs obtenus montrent que :

Pour le cas des batardeaux *sans fouille* dans un *milieu fini* :

- Les relations établies par MANDEL en écoulement plan sont valables dès que $2r/e = 2.7$ pour le cas des batardeaux *carrés* et *circulaires*. De plus, les résultats de DAVIDONKOFF et FRANKE en 3D sont seulement valables pour les batardeaux étroits et l'erreur peut dépasser 15 % 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 avons pu vérifié l'hypothèse d'un batardeau de rayon infini pouvant être assimilé à un batardeau plan, et on a montré que le coefficient minérateur qu'ils ont défini tend vers l'unité.
- A partir de la valeur $2R/e = 2.5$ 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 pour le cas d'un batardeau *rectangulaire*. En outre, 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 $B = 0.85$.

Pour le cas des batardeaux *sans fouille* dans un *milieu semi-infini* :

On a montré que le débit dans ce cas ne dépend pas de l'épaisseur du sol, mais il dépend à la fois du rapport $f/2r$ et de la perméabilité de la couche perméable et il diminue avec l'augmentation du rapport $f/2r$.

Pour le cas des batardeaux *avec fouille* dans un *milieu fini* :

- On a remarqué que dans le cas des batardeaux **carrés** le rapport entre les pertes de charges en aval *tridimensionnelles* et celles en *plan* est très petit pour les fouilles étroites et dès que $2r/e_I=2.7$, ce rapport augmente et tend presque vers 1 pour de très fortes largeurs du batardeau. Et on a pu noter aussi que les pertes de charge dans le batardeau carré sont supérieures que celles du batardeau circulaire. Tandis que, ce rapport est très petit pour les fouilles étroites et n'a jamais dépassé la valeur 0.73 pour de très fortes largeurs du batardeau dans le cas des batardeaux **rectangulaires**. Ces écarts se compensant dans l'écoulement global, les relations de MANDEL devient utilisables dès que $2R/e=2.5$ où $2R/2r=5$ donc $R=5r$ avec une erreur aussi inférieure à 5 %.
- Pour le cas d'un batardeau **circulaire**, l'écart entre les pertes de charge partielles est important, ainsi l'erreur peut atteindre 23.28 % dans le cas des grandes fouilles.

L'utilisation du modèle *axisymétrique* apparaît intéressante en raison de la concordance des résultats obtenus par ce modèle avec les résultats de KASTNER [1982] réalisés par analogie électrique en trois dimensions. Ce modèle permet donc d'obtenir des résultats en un petit laps de temps de calculs, contrairement pour un modèle *tridimensionnel* où les calculs sont trop lourds.

Enfin, on peut noter pour tous ces cas 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 compensant dans l'écoulement global, les relations de MANDEL devient utilisables dès que $2r/e$ est égal à 2.7 avec une erreur inférieure à 5 %.

En effet, ces écoulements sont susceptibles de provoquer en pied de l'écran un renard qui peut prendre deux formes distinctes :

- la boullance intervenant dès que le gradient en fond de fouille est critique ;
- le soulèvement généralisé qui dépend des champs d'écoulement devant la fiche, mais aussi des caractéristiques du sol et de la butée mobilisée par le rideau.

Les observations sur modèle comme les schémas théoriques mettent en évidence deux critères hydrauliques vis-à-vis du renard :

- le gradient de sortie qui détermine le déclenchement de la boullance ;
- le gradient moyen qui permet d'estimer la butée disponible.

Nous avons proposé une méthode de détermination simple de ces deux grandeurs à partir des résultats de nos simulations, et s'appuyant en partie sur les méthodes de calcul du débit.

Le **chapitre V** a été consacré à l'étude du phénomène de renard en réalisant des abaques simples pour le calcul du gradient adimensionnel et les coefficients de sécurité. Les premiers résultats ont permis de montrer que :

- Le gradient de sortie maximal en 3D est obtenu dans la zone du coin de batardeau (l'angle) où les pressions interstitielles sont les plus grandes et par conséquent les pertes de charge sont prépondérantes.
- De même, le gradient moyen maximal en 3D est obtenu dans la zone au-dessous immédiat de l'écran étanche du coin du batardeau (l'angle) où les pressions interstitielles sont les plus grandes et ainsi les pertes de charge sont prépondérantes.
- Quant aux coefficients de sécurité, on a pu voir que les courbes des coefficients de sécurité contre la boullance et le soulèvement sont très proches, il est presque impossible de faire une différence entre elles dans le cas d'un milieu semi-infini. Par conséquent, les deux critères définissant la boullance et le soulèvement sont presque équivalents. En outre, l'augmentation de la largeur et de la fiche relative du batardeau conduit à une augmentation de la valeur du coefficient de sécurité et dès que $2r/e = 2.5$ cette valeur reste constante quelque soit la fiche relative. Par conséquent, les deux critères définissant la boullance et le soulèvement sont presque équivalents.

Tous les sols réels sont caractérisés par une hétérogénéité naturelle élevée vis-à-vis de la perméabilité. Les calculs déterministes des écoulements que nous avons proposés supposent le sol homogène, anisotrope. La marge d'incertitude due à cette simplification pourrait être estimée à l'aide d'études probabilistes en considérant en particulier des distributions de strates plus ou moins perméables reproduisant en moyenne les caractéristiques du même sol homogène équivalent.

Parmi les autres perspectives qu'il serait possible de donner à ce travail, la poursuite de la modélisation de l'effet mécanique sur l'ensemble des résultats obtenus dans le cadre du modèle numérique tridimensionnel et axisymétrique. Il serait profitable d'étudier la stabilité du fond de fouille et la stabilité de l'écran étanche par un modèle tridimensionnel.

Ces résultats militent en faveur du développement de ce type d'expérimentations et de confrontations calcul-mesure. En particulier, pour faire progresser la connaissance des limites des diverses méthodes de calcul, il serait souhaitable d'étendre ces expérimentations numériques à d'autres configurations et plus spécialement aux écrans étanches avec alimentation latérale.

Enfin, ces quelques propositions ne représentent cependant qu'un nombre restreint de ce qu'il faudrait accomplir pour atteindre une résolution meilleure du problème de l'écoulement à travers un milieu poreux et plus particulièrement l'écoulement contournant des écrans étanches.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLIA Z.** *Prévision numérique du débit d'exhaure des fouilles protégées par un écran étanche et risque de renard.* Mémoire de Magister Hydraulique, Université de Biskra, Algérie, 2004.
- ANGOT A.** *Complément de mathématiques à l'usage des Ingénieurs de l'électrotechnique et des télécommunications.* Editions de la Revue d'Optique, 1952.
- BAZANT Z.** *Measuring soil deformation caused by the pressure of seepage.* 17th International Navigation Congress, Sect.1, 1949, pp. 195-198.
- BOUMAHRAT M & GOURDIN A.** *Méthodes numériques appliquées.* Office des Publications Universitaires. Alger, 1993. pp 422, 424.
- CAMBEFORT H.** *Géotechnique de l'ingénieur – Reconnaissance des sols*”. 5^{ème} Edition., Eyrolles, 1993. pp 295.
- CAQUOT A., & KERISEL J.** *Traité de mécanique de sol.* Gautier-Villars, Paris 1966.
- CARDINAL J., & DECAZENOV E.** *Ouvrages profonds à radier perméables, stations de pompage automatiques, écran d'étanchéité, reconnaissance et calcul des débits.* Travaux N° 439, octobre 1971.
- CARLIER M.** *Hydraulique Générale et Appliquée.* Edition Luis Jean, 1980.
- CASSAN M.** *Aide-Mémoire d'Hydraulique Souterraine.* Presses des Ponts et Chaussées, 1993, pp 17, 20.
- CASTANY G.** *Principes et méthode de l'hydrogéologie.* Dunod, paris, 1982, pp 68, 80.
- COSTET J., & SANGLERAT G.** *Cours pratique de mécanique des sols. Tome 2 : Calcul des ouvrages.* 3^{ème} Edition, Dunod, Paris 1983, pp 84, 99.
- DAVIDENKOFF R.N.** *Zur Berechnung des hydraulischen Grundbruches.* Wasserrwirtschaft N° 46, 1954, pp 298-307.
- DAVIDENKOFF R.N., & FRANKE O.L.** *Untersuchung der räumlichen Sickerstromung in eine umspundete Baugrube in offenen Gewässern.* Die Bautechnik, 9, 1965, pp 298-307.
- Encyclopédie Universelle.** Edition 1996.
- ERIC GERVEAU.** *Géotechnique et calcul des ouvrages.* Paris, Gaétan Morin Editeur, Europe ; 2000.
- EUVRAR.** *Résolution numérique des équations aux dérivées partielles de la physique, de la mécanique et des sciences de l'ingénieur. Différences finies, éléments finis et méthode des singularités.* 2^{ème} Edition, Masson, Paris ; 1990.
- FERY F. & JIROUSEK J.** *Analyse des structures et milieux continus. Méthode des éléments finis.* 1^{ère} Edition, presses polytechniques et universitaires Romandes, Lausanne, Vol, 6 ; 2001.

- GOOUGNOT R.** *Aérodynamique*. Ed. Masson, Paris. Edition 2002.
- GRAY H., & NAIR K.** *A note on the stability of seepage forces adjacent to a sheet pile*. The Institution of Civil Engineers, London, N° 17, 1967, pp 136-144.
- HABIB P.,** *Génie Géotechnique. Application de la mécanique des sols et des roches*. Edition MARKETING / ELLIPSES, 1997, pp 15, 26.
- HARR M.E.** *Groundwater and Seepage*. Mc GRAW – HILL BOOK COMPANY, New York, pp 14-15. 1962.
- HARR M.E.** *Groundwater and Seepage*. Dover, 1991.
- INGEL, RYHMING.** *Dynamique des fluides*. Presses polytechniques, Romandes. 1984.
- IRC (Institut de Recherche en Construction),** Digeste de la construction au canada, CBD-82-F. Les eaux de fond, Publié à l'origine en novembre 1967. Date de publication: 01-11-1967.
- ITASCA CONSULTING GROUP, Inc.** *FLAC^{3D} Manual version 2.1*. Minneapolis, Minnesota, 2002.
- ITASCA CONSULTING GROUP, Inc.** *FLAC^{2D} Manual version 4.00*. Minneapolis, Minnesota, 2002.
- JEAN-LOUP ROBERT** GCI-20552 – *Hydraulique Urbaine*, pp 33 – 35.
- JEAN PIERRE MAGNAN.** *La pratique des calculs tridimensionnels en géotechnique*, Journée d'étude – Paris 24 et 25 novembre 1998. pp 7.
- KALIN M.** *Hydraulic piping – Theoretical and experimental findings*. Revue canadienne de Géotechnique, The Institution of Civil Engineers, London, Vol 14, N° 1977, pp 107-124.
- KASTNER R.** *Excavations profondes en site urbain : problèmes liés à la mise hors d'eau. Dimensionnement des soutènements butonnés*. Thesis of docteur Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Laboratoire Géotechnique, 1982.
- KHENNANE A.** *Méthode des éléments finis*. Office des publications universitaires ; Alger, pp 1-2.
- KRISEK R.J., & ANAND V.B.** *Flow around a vertical sheet pile embedded in a inclined stratified medium*. Water Resources Research, Vol 4, N°1, 1968, pp 113-123.
- LAREAL P.** *Mécanique de sol- L'eau dans le sol*. Département de Génie Civil et Urbanisme, I.N.S.A, Service Géotechnique, Lyon 1975.
- MANDEL J.** *Écoulement de l'eau sous une ligne de palplanche – Abaque pour la condition de renard*. Travaux N° 197, Mars 1951, pp 223-241.
- MARSLAND A.** *Model experimentents to study the influence of seepage on the stability of a sheeted excavation in sand*. Geotechnique 3, The Institution of Civil Engineers, London, Vol 7, N° 4, 1953, pp 223-241.
- MARTIN C.S.** *Behaviour of porous bed near a flow singularity*. Proc, ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, NSM2, Feb 1971, pp 393-415.

- MAURICE CASSAN.** *Aide mémoire d'Hydraulique Souterraine.* 2^{ème} Edition, 1993, presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Mc NAMEE J.** *Seepage into a sheeted excavation.* Géotechnique, The Institution of Civil Engineers, London, Vol 1, N°4, 1949, pp 229-241.
- METREVELI V.** *Hydrogéologie et phénomène de transport.* Office des publications universitaires ; Alger, pp1-3.
- MONNET A.** *Boulance, érosion interne, renard, les instabilités sous écoulement.* Revue Française de géotechnique, N° 82, 1998, pp 3-10.
- MUNI BUDHU.** *Soil Mechanics and foundations.* John Wiley & SONS.INC. NewYork. Editions 2000.
- PHILOPPONNAT G.** *Fondations et ouvrages en terre.* Edition Eyrolle, Paris, 1987, pp 149-249.
- POLUBARINOVA-KOCHINA, P. Y.** *Theory of Groundwater Movement.* Princeton: Princeton University Press, 1962.
- PRAT M., & MESTAT P.** *Ouvrages en interaction.* HERMES Science Publications, Paris, 1999.
- PRAT M., & MESTAT P.** *La modélisation des ouvrages.* HERMES Science Publications, Paris, 1999, pp 463-485.
- REDDY A, S, MISHRA E.C., & SEETHARAMIAN K.** *Flow around inclined sheet pile.* ASCE Journal of the Hydraulics Division, July 1971, pp 1101-1115.
- SCHMIDBAUER.** *Die schwimmsander beim senkrecht aufsteigenden Grundwasserstrom.* Diss, Tech, Hochsch, Hannover 1950, 55 p.
- SCHNEEBELI G.** *Hydraulique souterraine.* Ayrolle, Paris, 1966.
- SCHNEEBELI G.** *Hydraulique souterraine.* 12^{ème} Edition Ayrolle, Paris, 1987.
- SHULER U.** *How to deal with the problem of suffusion, Research and developpement in the field of dams.* CIGB – ICOLD Crand MONTANA Switzerland, September 7-9-1995.
- SKEMPTON A.W., & BROGAN J.M.** *Experiments on piping in sandy gravels.* The Geotech, N°3, 1994, pp 440-460.
- TERZAGHI K.** *Der grundbruch an stanwerken und seine verhutung.* Wasserkraft 17, 1922, pp 445-449 in 'From theory to practice in soils mechanics', Wiley New-York 1922, pp 114-118.
- TERZAGHI K.** *Theoretical soil mechanics.* John Wiley and Sons, New-York 1943.
- VARLET H.** *Barrages & Réservoir.* Tome III. Edition Eyrolles – 1966.

RÉSUMÉ

Cette étude s'intéresse à l'effet tridimensionnel des problèmes liés à la mise hors d'eau rencontrés lors de l'excavation de fouilles profondes dans les sols perméables en site urbanisé, à proximité d'immeubles existants.

Dans la première partie sont abordés les problèmes posés par la mise hors d'eau de ces fouilles à l'abri d'écrans étanches : prévision du débit d'exhaure et pertes de charge. L'étude numérique tridimensionnelle de ces écoulements (réalisée à l'aide du code **Flac3D** et **Flac2D**) a permis de proposer un ensemble de méthodes simplifiées pour l'évaluation du débit contournant les écrans étanches. A chaque méthode de la littérature est associé un domaine d'application et l'incertitude correspondante.

La deuxième partie est consacrée à l'étude des 'renards' que ces écoulements peuvent provoquer et qui apparaissent sous forme de bouillonnement ou de soulèvement en masse.

Mots clés : Modélisation numérique tridimensionnelle, fouille, Renard, écoulement, écran.

ABSTRACT

This study is devoted to the three dimensional effect of problems met with, the dewatering on deep excavation in permeable soils and urbanised sites in the vicinity of existing buildings.

In the first part, we deal with problems of dewatering excavations protected by cut-off walls: pumping flow prevision and head loss. The numerical study in three dimensional of these groundwater flows (realised with **Flac3D** and **Flac2D** codes) has permitted to propose a set of simplified methods for the evaluation of the flow out-skirting the cut off walls. For each method in literature is associated to the corresponding application field and uncertainty factor.

The second part is devoted to study the piping that these groundwater flows can induce and that appears in the shape of subsurface erosion or bulk heave.

Key Words: Three numerical modelling, deep excavation, piping, groundwater, walls.

ملخص

كرست هذه المذكرة لدراسة المشاكل ذات ثلاثة أبعاد التي قد يتعرض لها المهندس خلال الأشغال الجوفية و الحفر العميقة في المناطق الحضرية بوجود أبنية بجوارها.

تطرق الجزء الأول من هذا البحث إلى استعراض المشاكل التي يمكن أن يسببها تفريغ هذه الحفر : حساب التدفق و الضياع في الطاقة. الدراسة العددية الثلاثية الأبعاد لهذه المياه الجوفية المنجزة باستعمال برنامج الحساب العددي (**Flac3D** و **Flac2D**) سمحت لنا باقتراح مجموعة من الطرق المبسطة لتقييم التدفق في الحفر المحمية بأحجبة واقية كتيمة. كما أسند لكل طريقة مجال تطبيقها و نسبة الخطأ المرفوقة بها.

الجزء الثاني كرس لدراسة " ظاهرة الثعلب" التي يمكن أن تحدثها هذه المجاري المائية و التي يمكن أن تظهر على شكل ماء محمل بالتربة أو صعود جزء من هذه التربة.

الكلمات المفتاحية : نمذجة رقمية ثلاثية الأبعاد، الحفر، ظاهرة الثعلب، الجريان، الحاجز.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	01
CHAPITRE I	
ÉCOULEMENT DE L'EAU À TRAVERS UN MILIEU POREUX	04
I.1 Introduction.....	04
I.2 Généralités sur les milieux poreux	04
I.2.1 Définition et Morphologie des pores et milieux poreux.....	05
I.2.2 Interconnexions des pores et milieu continu.....	05
I.2.3 Etude granulométrique du milieu poreux.....	06
I.2.4 Caractéristiques physiques du milieu poreux.....	06
I.2.5 Définition et différents types de porosité.....	07
I.2.5.1 La porosité efficace - coefficient de porosité.....	07
I.2.5.2 La porosité effective.....	07
I.2.5.3 La porosité cinématique.....	07
I.2.5.4 Indice des vides.....	08
I.2.5.5 Densité – Poids spécifique.....	08
I.2.6 La conductivité hydraulique ou perméabilité.....	08
I.2.6.1 Définition.....	08
I.2.6.2 Le coefficient de perméabilité.....	09
I.3 Etude mécanique de l'écoulement de l'eau à travers un milieu poreux.....	10
I.3.1 Loi fondamentale de l'écoulement.....	10
I.3.2 Dispositif expérimental de DARCY.....	10
I.3.3 Conditions de validité de la loi de Darcy	11
I.3.4 Généralisation de la loi de DARCY aux écoulements tridimensionnels	11
I.3.5 Application aux écoulements souterrains de la théorie des écoulements à potentiel de vitesse.....	12
I.3.5.1 Existence d'un potentiel des vitesses.....	12
I.3.5.2 Les surfaces équipotentiels.....	13
I.3.6 Equations des écoulements en régime permanent.....	14
I.3.6.1 L'équation de la continuité.....	14
I.3.6.2 L'équation de Laplace.....	14
I.4 Etude cinématique des écoulements à potentielles des vitesses.....	16
I.4.1 Système de référence	16
I.4.1.1 Méthode de Lagrange	16
I.4.1.2 Méthode d'Euler	17
I.4.2 Ligne de courant, surface et tube de courant.....	17
I.4.3 Lignes équipotentiels	17
I.4.4 Fonction de courant.....	18
I.4.5 Conditions aux limites.....	20
I.5 Méthodes de résolution de ces équations	21
I.5.1 Méthode analytique.....	21
I.5.2 Méthode graphique	22
I.5.3 Méthodes analogiques	22
I.5.4 Méthodes numériques	23
I.6 Conclusion.....	23

CHAPITRE II

ETAT DE CONNAISSANCE SUR LES ECOULEMENTS BI ET TRIDIMENSIONNELS ATOURS DES ÉCRANS ÉTANCHES	24
II.1 Introduction	24
II.2 Définition	24
II.3 Etude de l'écoulement autour des écrans étanches	25
II.3.1 Notion de débit et perte de charge adimensionnelle	26
II.3.2 Débit d'exhaure des batardeaux plans sans fouille.....	26
II.3.2.1 Débit d'exhaure des batardeaux plans sans fouille dans un milieu fini.....	26
II.3.2.2 Débit d'exhaure des batardeaux plans sans fouille dans un milieu semi-infini	28
II.3.3 Débit d'exhaure des batardeaux plans avec fouille.....	29
II.3.4 Ecoulement sous un écran circulaire	33
II.3.4.1 Batardeaux circulaires sans fouille.....	33
II.3.4.2 Batardeaux circulaires avec fouille.....	35
II.3.4.3 Extension aux batardeaux carrés.....	37
II.3.5 Prise en compte de l'épaisseur de l'écran.....	37
II.4 Prévision du renard dans les écoulements de contournement des écrans étanches.....	38
II.4.1 Introduction.....	38
II.4.2 L'approche expérimentale du phénomène de renard.....	39
II.4.3 Etude expérimentale du renard sur modèle réduit	41
II.4.4 Les méthodes de calcul	43
II.4.4.1 Méthodes de calcul négligeant le frottement.....	43
II.4.4.2 Méthodes de calcul considérant le frottement	45
II.4.5 Comparaison des essais et des différentes méthodes de calcul	45
II.5 Conclusion.....	46

CHAPITRE III

PRESENTATION DE L'OUTIL NUMERIQUE UTILISÉ	48
III.1 Introduction.....	48
III.2 Généralités.....	48
III.3 Méthode des différences finies (FDM).....	49
III.4 Schéma de résolution explicite	50
III.5 Forces non équilibrées (UNBALANCED FORCE).....	53
III.6 Présentation du code bidimensionnel (Flac2D).....	54
III.7 Présentation du code tridimensionnel (Flac3D).....	54
III.7.1 Formulation du modèle 3D en différences finies explicite.....	55
III.7.2 Description du modèle mathématique.....	55
III.7.3 Formulation numérique.....	55
III.7.4 Nomenclature.....	56
III.7.5 La solution statique	58
III.7.6 La solution dynamique.....	58
III.7.7 Le maillage en différences finies	58
III.7.8 Création de fichiers de données en Flac3D.....	59
III.7.9 Méthodologie de simulation avec Flac3D.....	60
III.7.10 Génération de maillage.....	61
III.8 Modélisation de l'écoulement.....	62
III.8.1 Modélisation de l'écoulement en Flac.....	62
III.8.2 Modélisation de l'écoulement en Flac3D.....	63
III.8.3 Modélisation de l'écoulement de l'eau avec le calcul de la surface phréatique....	64
III.9 Modèles de comportement.....	65
III.10 Conclusion.....	68

CHAPITRE IV

SIMULATION NUMERIQUE TRIDIMENSIONNELLE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

	70
IV.1 Introduction.....	72
IV.2 Simulation numérique.....	72
IV.2.1 Procédure de simulation en Flac3D.....	72
IV.2.2 Maillage et conditions aux limites.....	72
IV.3 Débit d'exhaure des batardeaux tridimensionnels sans fouille en milieu fini - Avec alimentation verticale.....	73
IV.3.1 Cas de batardeaux tridimensionnels carrés.....	73
IV.3.2 Cas de batardeaux tridimensionnels rectangulaires.....	79
IV.3.3 Cas de batardeaux axisymétriques circulaires	84
IV.4 Confrontation aux résultats existants.....	92
IV.5 Débit d'exhaure des batardeaux tridimensionnels sans fouille en milieu semi-infini.....	101
IV.5.1 Cas de batardeaux tridimensionnels carrés.....	101
IV.5.2 Cas de batardeaux tridimensionnels rectangulaires.....	101
IV.5.3 Cas de batardeaux axisymétriques circulaires	102
IV.6 Confrontation aux résultats existants.....	104
IV.7 Propositions pour le calcul du débit dans les batardeaux carrés sans fouille.....	106
IV.8 Propositions pour le calcul du débit dans les batardeaux rectangulaires sans fouille.....	107
IV.9 Débit d'exhaure des batardeaux tridimensionnels avec fouille en milieu fini - Avec alimentation verticale.....	107
IV.9.1 Cas de batardeaux tridimensionnels carrés.....	107
IV.9.2 Cas de batardeaux tridimensionnels rectangulaires.....	113
IV.9.3 Cas de batardeaux axisymétriques circulaires	118
IV.10 Confrontation aux résultats existants.....	123
IV.11 Débit d'exhaure des batardeaux tridimensionnels avec fouille en milieu semi-infini	128
IV.11.1 Cas de batardeaux tridimensionnels carrés.....	128
IV.11.2 Cas de batardeaux tridimensionnels rectangulaires.....	129
IV.11.3 Cas de batardeaux axisymétriques circulaires	130
IV.12 Confrontation aux résultats existants.....	132
IV.13 Conclusion.....	137

CHAPITRE V

PREVISION NUMERIQUE TRIDIMENSIONNELLE DU RENARD DANS LES ECOULEMENTS DE CONTOURNEMENT DES ECRANS ETANCHES

	139
V.1 Introduction.....	139
V.2 Gradient de sortie des batardeaux tridimensionnels et coefficient de sécurité à la boullance.....	140
V.3 Gradient moyen des batardeaux tridimensionnels et coefficient de sécurité au soulèvement.....	141
V.4 Gradient de sortie et coefficients de sécurité des batardeaux tridimensionnels sans fouille dans un milieu fini.....	142
V.4.1 Cas de batardeaux tridimensionnels carrés	142
V.4.2 Cas de batardeaux tridimensionnels rectangulaires.....	143
V.4.3 Cas de batardeaux axisymétriques circulaires	144
V.5 Gradient de sortie et coefficients de sécurité des batardeaux tridimensionnels sans fouille dans un milieu semi-infini.....	145

V.5.1 Cas de batardeaux tridimensionnels carrés	145
V.5.2 Cas de batardeaux tridimensionnels rectangulaires	146
V.5.3 Cas de batardeaux axisymétriques circulaires	147
V.6 Gradient de sortie et coefficients de sécurité des batardeaux tridimensionnels avec fouille dans un milieu fini.....	148
V.6.1 Cas de batardeaux tridimensionnels carrés	148
V.6.2 Cas de batardeaux tridimensionnels rectangulaires	149
V.6.3 Cas de batardeaux axisymétriques circulaires	150
V.7 Gradient de sortie et coefficients de sécurité des batardeaux tridimensionnels avec fouille dans un milieu semi-infini.....	151
V.7.1 Cas de batardeaux tridimensionnels carrés	151
V.7.2 Cas de batardeaux tridimensionnels rectangulaires	152
V.7.3 Cas de batardeaux axisymétriques circulaires	152
V.8 Calcul pratique des gradients moyen et de sortie.....	154
V.8.1 Calcul du gradient moyen	154
V.8.2 Calcul du gradient de sortie	154
V.9 Tableau récapitulatif.....	155
V.10 Conclusion	155
 CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS	156
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	