



## EFFET TRIDIMENSIONNEL DE L'ÉCOULEMENT SOUTERRAIN SUR LA STABILITÉ DES OUVRAGES EN SITES URBANISÉS APPLICATION AUX BATARDEAUX CARRÉS EN MILIEU SEMI-INFINI

Farid Bouchelghoum<sup>1</sup>, N. Benmebarek<sup>2</sup>, S. Benmebarek<sup>3</sup>, R. Kastner<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Doctorant, 'Sciences Hydrauliques', Université de Biskra - Algérie

Chercheur à l'Unité de Recherche en Hydraulique – LRGC B, Mail : fbou60@yahoo.fr

<sup>2,3</sup>Professeur, Université de Biskra – Algérie, Mail : benmebarek@yahoo.fr

Laboratoire de Recherche en Génie Civil de Biskra (LRGC B) BP 145, Biskra (07000) Algérie

<sup>4</sup>Professeur, Institut National des Sciences Appliquées INSA de Lyon France

Unité de Recherches en Géotechnique INSA

Reçu le : 24/05/2008

Accepté le : 19/09/2010

### Résumé

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. Cette présente étude s'intéresse donc à l'effet tridimensionnel des problèmes liés à la mise hors d'eau rencontrés lors de l'excavation de fouilles profondes de forme carrée en milieu semi infini avec alimentation verticale dans les sols perméables en site urbanisé, à proximité d'immeubles existants. Dans un premier temps 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) a permis de proposer une méthode simplifiée pour l'évaluation du débit contournant les écrans étanches.

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 :** Ecoulement tridimensionnel, Fouille carrée, Milieu semi-infini, Renard, Bouillonnement, Soulèvement.

### Abstract

A water presence in soil represents a factor of hindrance or interest according to the engineer's preoccupations. In some cases, a problem is about exploitation of resources by withdrawals of groundwater; and in others it can be about exhausting an excavation before underground works. This study is devoted therefore to three-dimensional effect of problems met with, dewatering on deep excavation of square shape excavation within semi-infinite media 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 forecasting and head loss. The numerical study in three-dimensional of these groundwater flows (realised with Flac3D code) has permitted to propose a set of simplified method for evaluation of flow out-skirting cut off walls. The second part is devoted to study a piping phenomenon that these groundwater flows can induce and that appears in shape of subsurface erosion or bulk heave.

**Keywords:** Three-dimensional groundwater flow, Square deep excavation, Semi-Infinite media, Piping, Boiling, Heaving.

### 1. Introduction

La circulation d'un fluide à travers un milieu poreux, ou plus particulièrement, l'eau dans le sol, peut avoir des répercussions majeures sur les études techniques et géotechnique de l'ouvrage en question [1]. 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.) [2]. 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** [3]. 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.



## Nomenclature

$e$	Epaisseur du sol [m]
$e_1; e_2$	Epaisseur du sol dans le coté amont et aval [m]
$f$	Fiche du batardeau [m]
$f_1; f_2$	Fiche du batardeau dans le coté amont et aval [m]
$b$	Largeur du batardeau [m]
$r$	Demi-largeur du batardeau ( $b/2$ ) [m]
$b/e$	Largeur relative du batardeau
$f/e$	Fiche relative du batardeau
$L$	Etendu du maillage [m]
$k$	Coefficient de perméabilité [m/s]
$k_v, k_h$	Coefficient de perméabilité verticale et horizontale [m/s]

$Q$	Débit total [m <sup>3</sup> /s]
$H$	Pertes de charge totales [m]
$H_1$	Pertes de charge dans le coté amont [m]
$H_2$	Pertes de charge dans le coté aval [m]
$h$	Niveau de l'eau [m]
$p$	Pertes de charge adimensionnelle
$\gamma$	Poids volumique [kN/m <sup>3</sup> ]
$l$	Gradient hydraulique
$l_c$	Gradient hydraulique critique
$l_m$	Gradient hydraulique moyen
$l_e$	Gradient hydraulique de sortie

En outre, ces calculs sont beaucoup plus lourds que les calculs en deux dimensions (en déformation *plane* ou en *axisymétrie*) [4], 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.

Fréquemment, les configurations réelles sont telles (enceintes ramassées) que le problème ne peut être considéré comme plan. L'écoulement vers la fouille n'est alors à filets parallèles mais à filets convergents, ce qui introduit une perte de charge supplémentaire. L'hypothèse de l'écran **carré** constitue une approche commode de ces écoulements **tridimensionnels**. L'étude et la comparaison des différents résultats de la bibliographie réalisés notamment en écoulement plan 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.

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 [5].

Cependant, par des simulations numériques bidimensionnelles avec le code Flac2D [6], Benmebarek et al, 2005 [7] ont montré que

l'angle de dilatation du sol a une influence significative sur la forme du mécanisme de rupture. Pour un matériau dilaté, le critère de rupture d'un prisme rectangulaire par soulèvement est obtenu. Afin de mettre au point un nouvel outil de calcul de ces grandeurs dans les écoulements tridimensionnels, des abaques à base de calcul numérique sont proposés.

## 2. Travaux antérieurs

- A partir des résultats théoriques concernant l'écoulement *plan* autour d'un écran unique fiché dans un milieu *semi-infini*, Schneebeli, 1966 [8] a proposé les deux relations suivantes :

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

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

- Pour les fouilles larges protégées par un écran fiché dans un milieu *semi-infini*, ( $f/e \approx 0, f/b$  faible), Brillant, 1975 [5] a proposé la relation :

$$\frac{Q}{H \sqrt{K_v K_h}} = \frac{1}{\pi} \ln \frac{2b}{f}$$

- En outre, Cardinal et De Casenove, 1971 [9] ont réalisé un abaque donnant la perte de charge,  $H \sqrt{k_v k_h} / Q$  en fonction de la fiche relative du batardeau  $f / B \sqrt{k_v / k_h}$  qui s'applique théoriquement aux fouilles étroites dans un milieu *semi-infini*.

$$H = H_1 + H_2$$

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



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

- Les résultats de simulations de Kastner, 1982 sont aussi résumés sous forme de la variation du débit en fonction de la fiche et de la largeur du batardeau.
- En raison de l'introduction d'un paramètre géométrique supplémentaire ( $e_2$ ) (Figure 2 et 5), la prise en compte de l'excavation ne conduit pas, en général, à des solutions simples. Cependant, l'abaque de Cardinal et De Cazenove, 1971 est applicable aussi à ce cas pour peu que la fouille soit étroite.

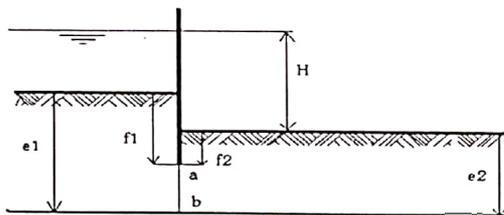


Fig 1. Batardeau de grande largeur.

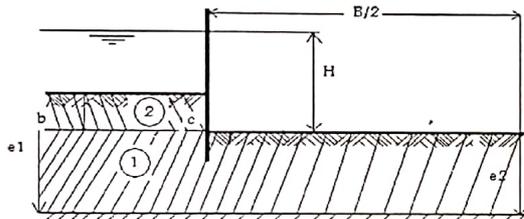


Fig 2. Batardeau à fiche relative faible.

Pour la configuration des batardeaux à fiche relative faible ( $f_1/e_1 < 0,125$ ) Kastner, 1982 propose un découpage différent suivant une ligne horizontale  $bc$  qui se développe du côté *semi-infini* (Figure 2). 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 :

$$\rho_2 = \frac{2(e_1 - e_2)}{3e_2} \sqrt{k_h \cdot k_v}$$

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.

### 3. Procédure de modélisation numérique tridimensionnelle par Flac3D

Pour exécuter une analyse par le code Flac3D [10], des étapes spécifiques doivent être considérées dans n'importe quelle modélisation, ces étapes sont les suivantes :

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

On considère tout d'abord le cas d'un batardeau tridimensionnel de forme carrée en milieu semi-infini avec alimentation verticale 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 les figures 3 et 4. En profitant, de la symétrie, on prend un quart du modèle. Dans un second temps, on adopte pour le cas avec fouille la même méthode que pour les batardeaux sans fouille, mais un nouveau paramètre géométrique  $e_2$  (épaisseur du sol dans le coté aval) est introduit dans ce cas. Le niveau de la surface phréatique (surface libre de l'eau) est constant et correspond au sommet de la surface du sol. L'excavation aura une coupe transversale de dimensions  $x, y$  et une profondeur  $z$  en 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. La Figure 5 illustre le modèle adopté en Flac3D et le maillage avec une excavation.

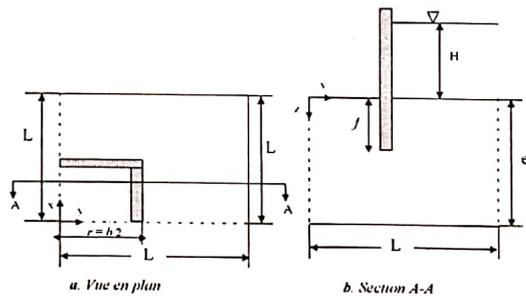


Fig 3. Vue en plan du Batardeau carré.

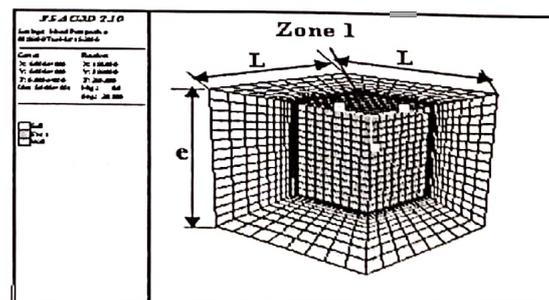


Fig 4. Le maillage adopté en Flac3D -

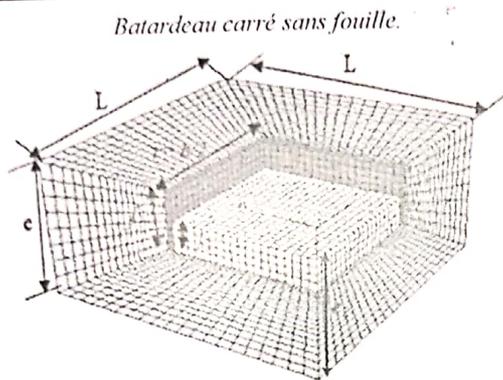


Fig 5. Le maillage adopté en Flac3D – Batardeau carré avec fouille.

#### 4. Résultats et discussions

##### 4.1 Calcul du débit

Dans ces 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. On fixe la valeur de demi-largeur (par exemple :  $r=2m$ ) et on varie la fiche du batardeau telle que :  $0,1 < f/2r < 1,75$  donc  $0,4 < f < 6$ . Afin d'observer plus en détails l'état de l'écoulement permanent des eaux souterraines pour chaque modèle, on présente sur les figures suivantes quelques visualisations des vecteurs d'écoulement autour de l'écran étanche, le champ de distribution des pressions interstitielles pour une largeur relative  $2r/e=2,7$  et  $f/e=1/2$  (cas sans fouille) et  $2r/e=1,34$  et  $f/e=1/8$  (cas avec fouille). Les figures 6a et 7a montrent 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. Les figures 6b et 7b 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.

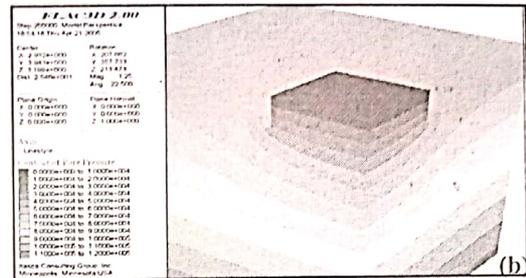
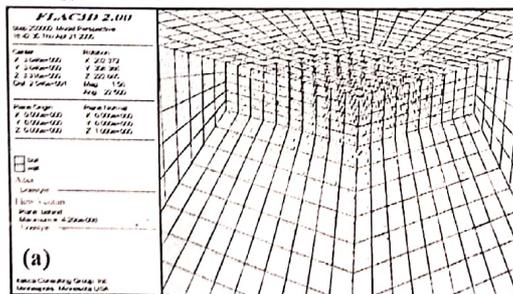


Fig 6. Modèle Flac3D:  $2r/e=2,7$ ;  $f/e=1/2$ , (a) Vecteurs d'écoulement, (b) Champ de distribution des pressions interstitielles en état d'écoulement permanent. Cas carré sans fouille.

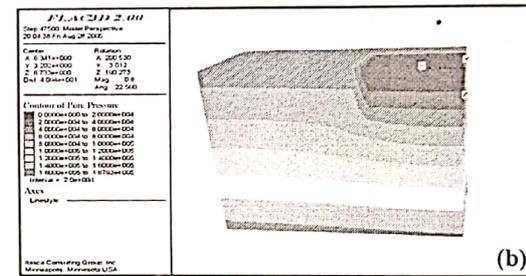
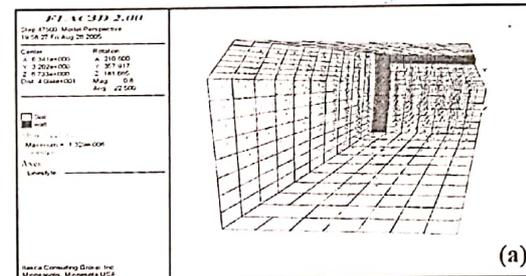


Fig 7. Modèle Flac3D:  $2r/e=1,34$ ;  $f/e=1/8$ , (a) Vecteurs d'écoulement; (b) Champ de distribution des pressions interstitielles en état d'écoulement permanent. Cas carré avec fouille.

##### 4.1.1 Batardeaux carrés sans fouille

La variation du débit en fonction de la fiche relative obtenue par le code de calcul numérique aux différences finies Flac3D est illustrée sur la Figure 8.

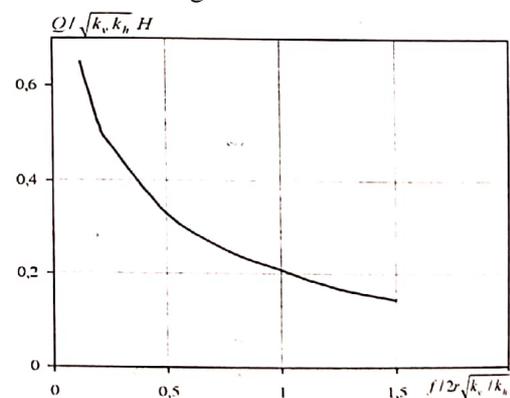


Fig 8. Variation du débit total en fonction de  $f/2r$ .



L'analyse de ces résultats montre que le débit d'exhaure diminue avec l'augmentation du rapport  $f/2r$ , et il ne dépend pratiquement plus de l'épaisseur de la couche perméable mais il dépend à la fois du rapport adimensionnel  $f/2r$  et de la perméabilité verticale surtout. Par contre, les pertes de charge augmentent au fur et en mesure que le rapport  $f/2r$  augmente. D'une 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.

La confrontation de présents résultats numériques *tridimensionnels* avec ceux de l'écoulement plan donnés par des relations théoriques de Schneebeli, 1966; l'abaque de Kastner, 1982 et la réduction du débit donné par Davidenkoff et Franke, 1965 [11] est illustrée par les tableaux suivants :

Tableau 1. Comparaison du débit avec les formules théoriques de Schneebeli, 1966.

$f/2r$	Flac3D $Q_{3D}$	Schneebeli $Q_{2D}$	Davidenkoff et Franke $Q_{2D} * 0,75$	Ecart %
0,125	0,66	0,8842	0,6631	0,0093
0,2	0,54	0,7364	0,5523	0,0223
0,325	0,45	0,5867	0,4400	0,0242
0,5	0,35	0,4597	0,3448	0,0148
0,75	0,26	0,3498	0,2624	0,0092
1	0,21	0,2806	0,2105	0,0025
1,25	0,17	0,2333	0,1750	0,0286
1,5	0,15	0,1990	0,1493	0,0289

Tableau 2. Comparaison du débit avec l'abaque de Kastner, 1982.

$f/2r$	Flac3D $Q_{3D}$	Kastner $Q_{2D}$	Davidenkoff et Franke $Q_{2D} * 0,75$	Ecart %	Brillant $Q_{2D} (large)$
0,125	0,66	0,88	0,66	0,00455	0,881
0,2	0,54	0,73	0,5475	0,01370	0,732
0,325	0,45	0,58	0,435	0,03548	0,577
0,5	0,35	0,46	0,345	0,01429	0,440
0,75	0,26	0,35	0,2625	0,00952	0,311
1	0,21	0,30	0,225	0,06667	0,220
1,25	0,17	0,24	0,18	0,05556	0,150
1,5	0,15	0,21	0,1575	0,07937	0,091

Flac3D : Résultats avec Flac3D. Schneebeli : débit plan d'après Schneebeli, 1966. Davidenkoff et Franke : débit d'après Davidenkoff et Franke 1965. Kastner : débit plan d'après Kastner, 1982. Brillant : débit plan d'après Brillant, 1975 (fouilles larges).

Le Tableau 1 montre que la majorité du débit est réduit d'environ 25 %, ce qui permet de dire que le facteur réducteur du débit (0,75) proposé par Davidenkoff et al, 1965 est valable dans ce cas avec un écart inférieur à 2,89 %. Du même, la comparaison de présents résultats aux résultats de Kastner, 1982 (Tableau 2) montre que le débit est réduit aussi d'environ 25 %, et par conséquent, le facteur réducteur du débit proposé par Davidenkoff et Franke (0,75) est valable dans ce cas avec un écart inférieur 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). Ainsi, les méthodes en plan ont des limites de validations et nécessitent des conditions d'application.

#### 4.1.2 Batardeaux carrés avec fouille

Pour ce cas, la variation du débit et pertes de charge dans le coté aval en fonction de la fiche relative du batardeau  $f_i/2r$  obtenue par nos diverses simulations numériques sont illustrées dans les figures 9 et 10.

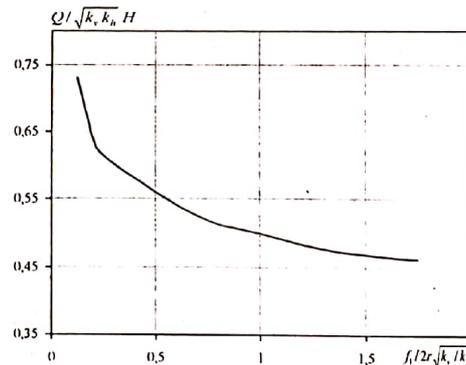


Fig 9. Variation du débit total en fonction de  $f_i/2r$ .

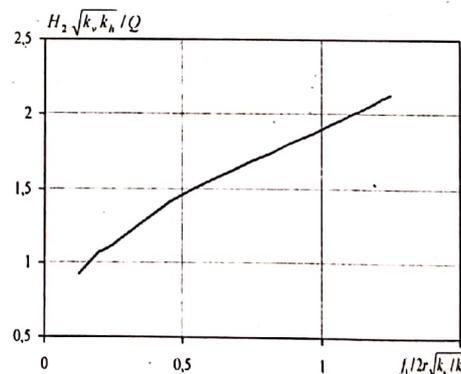


Fig 10. Variation des pertes de charge en fonction de  $f_i/2r$  dans le coté aval.



La Figure 10 montre 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.

Pour pouvoir faire des confrontations aux résultats existants, on représente sur la Figure 11 et Tableau 3 respectivement la variation du débit et pertes de charge en fonction de la fiche relative du batardeau.

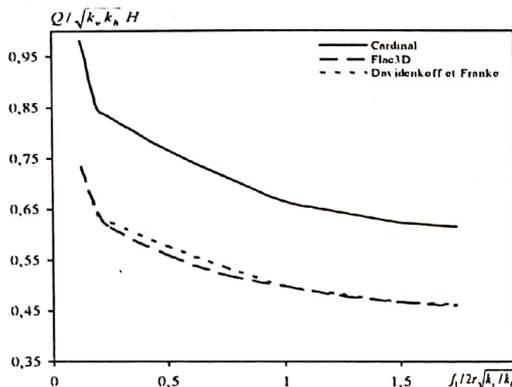


Fig 11. Comparaison du débit total.

Tableau 3. Comparaison des pertes de charge totales 3D avec l'écoulement plan.

$f/2r$	Fouille carrée - Flac3D $H_{3D}$	Pertes de charge totales		Ecart %
		Plan d'après Cardinal et Casenov $H_{2D}$	Pertes de charge totales d'après Davidenkoff et Franke $H_{2D} * 1,3$	
0,125	1,3698	1,02	1,326	0,032
0,2	1,5748	1,18	1,534	0,026
0,25	1,6064	1,2	1,560	0,029
0,5	1,7543	1,3	1,690	0,037
0,75	1,8867	1,4	1,820	0,035
1	2	1,5	1,950	0,025
1,5	2,1344	1,6	2,080	0,026
1,75	2,1645	1,62	2,106	0,027

La Figure 11, montre que les points numériques sont dans la globalité sur la courbe théorique donnée par Davidenkoff et Franke 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 3,7 %.

Enfin, il est clair de la Figure 11 que la courbe théorique de Cardinal, 1971 en écoulement plan est très éloignée par rapport aux deux autres courbes, ce qui montre que le débit en 3D est réduit dans ce cas. En outre, le Tableau 3 montre que la perte de charge totale augmente avec un facteur de 1,3 à un écart qui ne dépasse pas 3,7 %.

#### 4.2 Calcul du phénomène de renard

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 boulangerie.
- 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, 1965 étant trop imprécises. La rupture se passe parfois dans les excavations profondes et devant les écrans étanches conçus par ces méthodes. (Tanaka, 2002) [12]. Généralement, le gradient hydraulique de sortie le plus maximum est obtenu aux points de sortie au contact de l'écran étanche ou autour des coins [13]. 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) et 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 les figures 12 et 13.

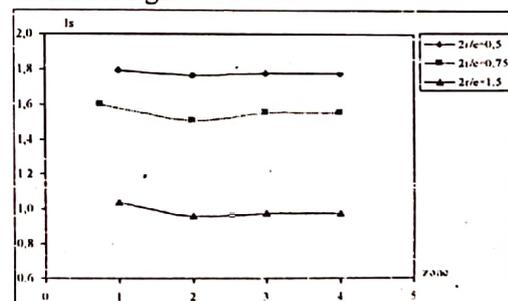


Fig 12. Variation du gradient de sortie en fonction de  $2r/e$ .

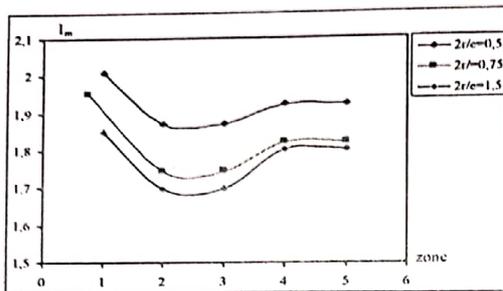


Fig 13. Variation du gradient moyen en fonction de  $2r/e$ .

Où :  $F_b$  : coefficient de sécurité à la boullance.  
 $I_s$  : gradient de sortie.  $F_s$  : coefficient de sécurité au soulèvement.  $I_m$  : gradient moyen.

Du moment que le gradient de sortie est inférieur au gradient moyen, le phénomène de la boullance se passe après le soulèvement. On présente sur les figures 14 et 15 la variation des valeurs du gradient de sortie obtenues par le code Flac3D en fonction de la fiche relative dans un milieu semi-infini. Les figures 16 et 17 quant à elles donnent la variation des coefficients de sécurité en fonction de la largeur et de la fiche relative du batardeau.

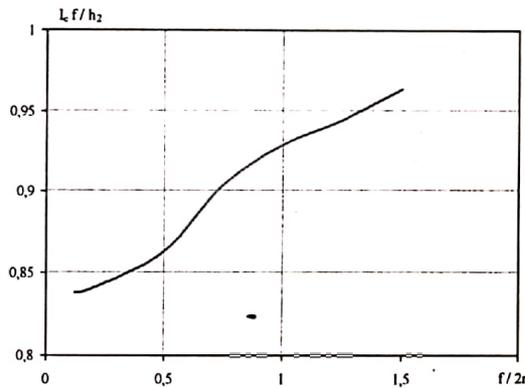


Fig 14. Variation du gradient de sortie en fonction de  $f/2r$ . Cas carré sans fouille.

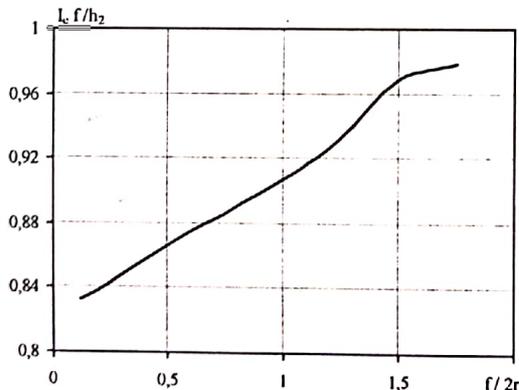


Fig 15. Variation du gradient de sortie en fonction de  $f/2r$ . Cas carré avec fouille.

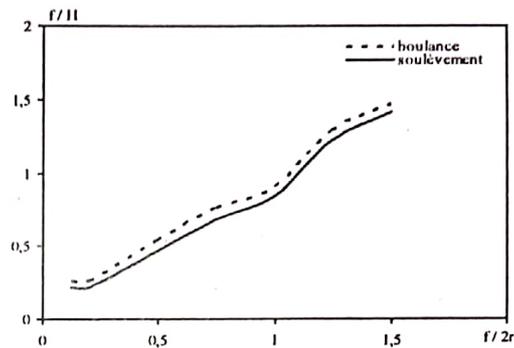


Fig 16. Variation des coefficients de sécurité en fonction de  $f/2r$ . Cas carré sans fouille.

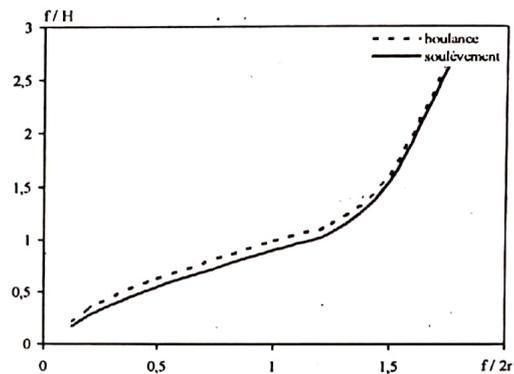


Fig 17. Variation des coefficients de sécurité en fonction de  $f/2r$ . Cas carré avec fouille.

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. 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. On peut voir à partir des figures 16 et 17 que les courbes sont très proches. 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 induit une augmentation de la valeur du coefficient de sécurité. En revanche, pour les excavations très étroites, il est difficile d'extrapoler les courbes au delà de  $f/2r = 0,3$  où leur comportement est difficile de prévoir.

### 5 Conclusion

Face au problème de la mise hors d'eau d'une fouille, l'ingénieur se trouve confronté au problème d'estimer l'incertitude dont est entaché le résultat. Ce 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  $m^3/h$ . L'analyse et la confrontation des résultats de simulations permettent les conclusions suivantes :

(1) 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 est préférable de limiter l'usage des méthodes analytiques au domaine des batardeaux **plans** car elles surestiment le débit et sous-estiment les pertes de charge.

(2) Il est recommandé de multiplier les résultats du débit plan par un facteur réducteur de débit pour les fouilles tridimensionnelles  $F = Q_{3D}/Q_{2D}$ .

(3) Pour les batardeaux étroits, l'écoulement est quasi uniforme en fond de fouille. Dans ce cas, les pertes de charge dues à l'écoulement vertical à filets convergents entre les écrans sont prépondérantes et le débit dépend plus de la perméabilité verticale que de la perméabilité horizontale.

(4) La réduction de débit due à la convergence de l'écoulement engendrant de fortes pertes de charge au niveau des singularités (coins) varie avec la fiche relative de l'écran étanche et décroît avec lui.

(5) Les pertes de charge dans le coté aval en 3D restent toujours supérieures aux pertes de charge en écoulement plan même pour les batardeaux larges.

(6) Les valeurs maximales 3D 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.

Enfin, les résultats obtenus et les vérifications effectuées démontrent l'intérêt des modèles et les abaques ainsi 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 les pertes de charge et estimer les coefficients de sécurité contre la boullance et le soulèvement, ce dernier doit être considéré comme le mode de rupture le plus **critique**. Ainsi, ces abaques fournissent aux praticiens des approches numériques réalisés en 3D 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

coté, et **surestiment** les valeurs des coefficients de sécurité contre la boullance et le soulèvement d'un autre coté.

### Références

- [1] F. Bouchelghoum, M. Kadri, M. Hamidou, Modélisation numérique bidimensionnelle des infiltrations à travers un barrage en terre, 2<sup>ème</sup> Colloque International sur l'eau et l'environnement. ENSH de Blida, Alger, 2007, 30p.
- [2] F. Bouchelghoum, N. Benmebarek, S. Benmebarek, R. Kastner, Préviation numérique tridimensionnelle du phénomène de renard et débit d'exhaure des batardeaux rectangulaires, 4<sup>ème</sup> conférence internationale sur les « Ressources en eau dans le bassin méditerranéen » (ENPA)lger), WATMED4 les 22-24 Mars 2008a.
- [3] J.-P. Magnan, La pratique des calculs tridimensionnels en géotechnique, Journée d'étude, Paris 24 et 25 novembre 1998, pp 7.
- [4] F. Bouchelghoum, N. Benmebarek, S. Benmebarek, R. Kastner, Modélisation numérique 3D des écoulements autour des batardeaux axisymétriques circulaires sans fouille. 4<sup>ème</sup> conférence internationale sur les « Ressources en eau dans le bassin méditerranéen » (ENPA)lger), WATMED4 les 22-24 Mars 2008b.
- [5] R. Kastner, 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, Lab Géotechnique, 1982.
- [6] Itasca Consulting Group, Inc. Flac2D Manual version 4.0. Minneapolis, Minnesota, 2002.
- [7] N. Benmebarek, S. Benmebarek, R. Kastner, Numerical studies of seepage failure of sand within a cofferdam, Computers and Geotechnics, 2005, Vol 32, N° 4, pp. 264-273
- [8] G. Schneebeli. Hydraulique souterraine. Eyrolle, Paris, 1966.
- [9] J. Cardinal, E. Decazenov, Ouvrages profonds à radier perméables, stations de pompage automatiques, écran d'étanchéité, reconnaissance et calcul des débits, Travaux N° 439, Octobre 1971.
- [10] Itasca Consulting Group, Inc. Flac3D Manual version 2.1. Minneapolis, Minnesota, 2002.
- [11] R.N. Davidenkoff., O.L. Franke, Untersuchung der räumlichen Sickerstromung in eine umspundete Baugrube in offenen Gewässern, Die Bautechnik, 9, 1965, pp. 298-307.
- [12] T. Tanaka, Boiling occurred within a braced cofferdam due to two-dimensionally concentrated seepage flow, In: 3rd International Symposium, Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, 23-25 October, Toulouse, France, 33-38, 2002.
- [13] B. Muni, Soil Mechanics and foundations. John Wiley & Sons. INC. New York, Ed 2000.