

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 boullance

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**).

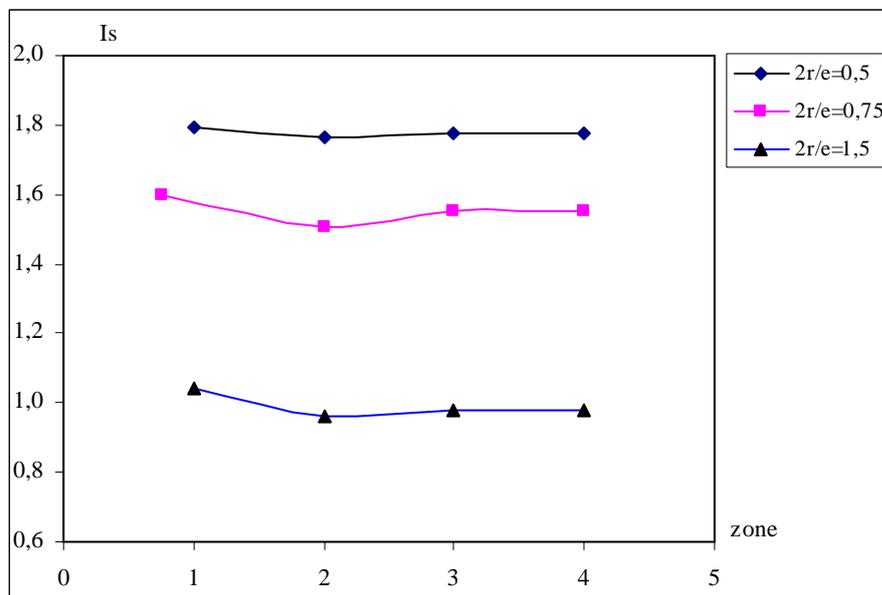


Figure V.1 : Variation du gradient de sortie en fonction de $2r/e \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

∅ 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 boullance F_b

Par définition, le coefficient de sécurité à la boullance 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).

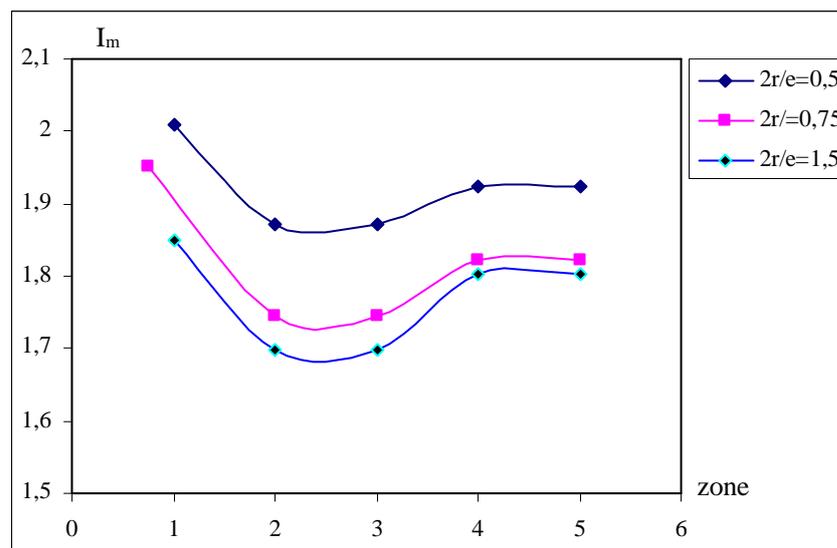


Figure V.2 : Variation du gradient moyen en fonction de $2r/e \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

Ø 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.

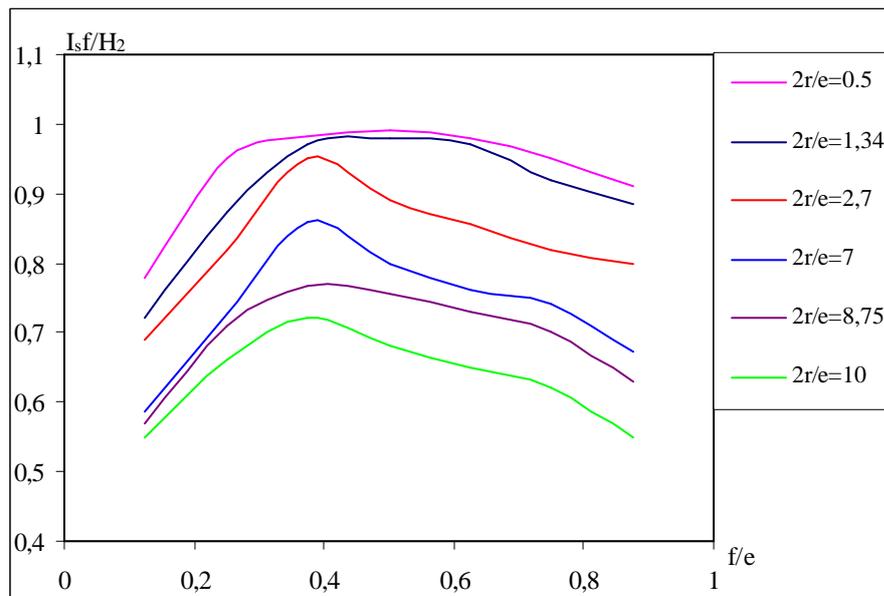


Figure V.3 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f/e \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

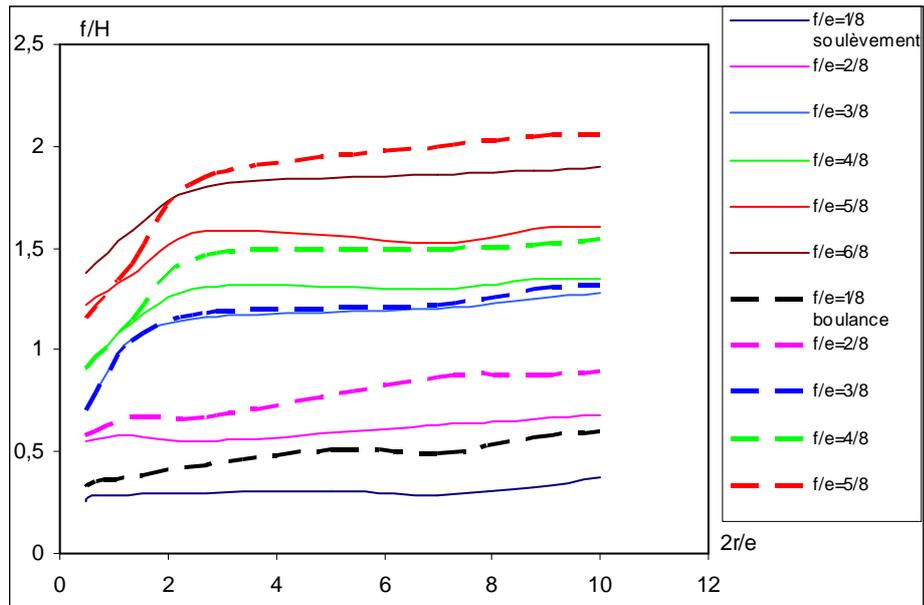


Figure V.4: Variation des coefficients de sécurité en fonction de $2r/e \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

V.4.2 Cas des batardeaux tridimensionnels rectangulaires

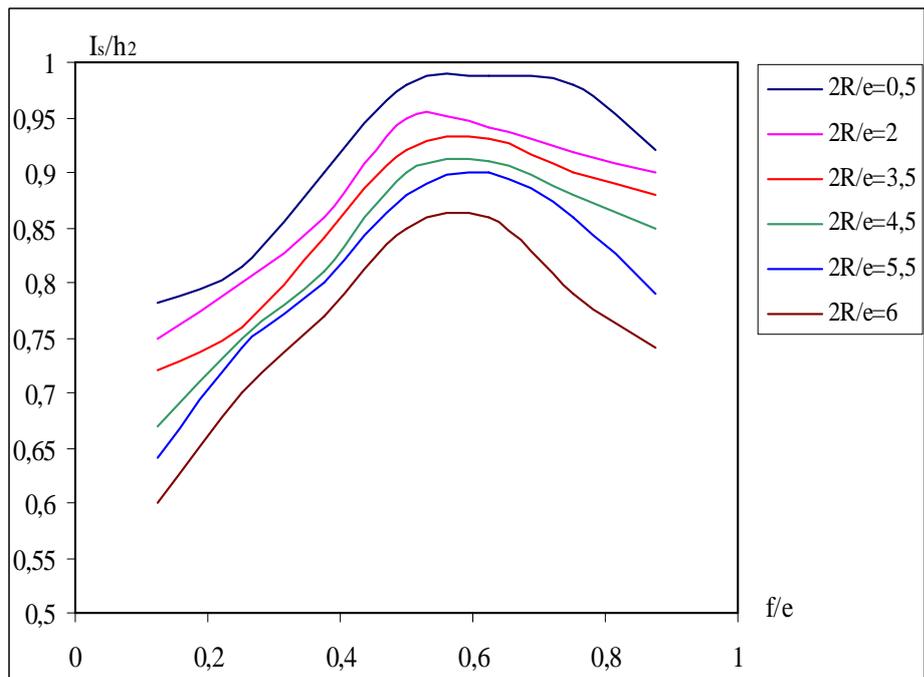


Figure V.5 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f/e \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

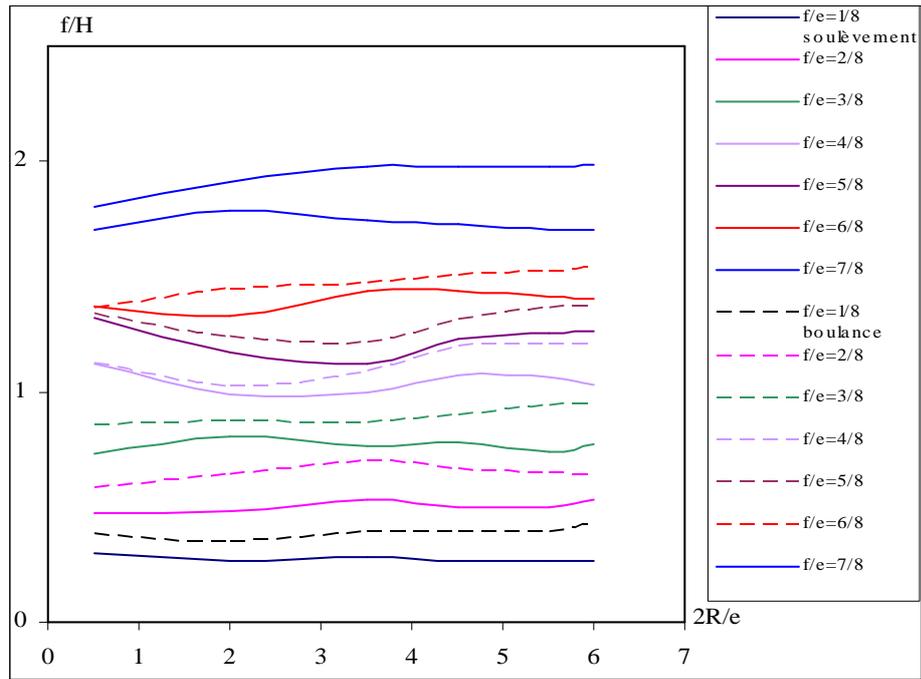


Figure V.6 : Variation des coefficients de sécurité en fonction de $2R/e \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

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.

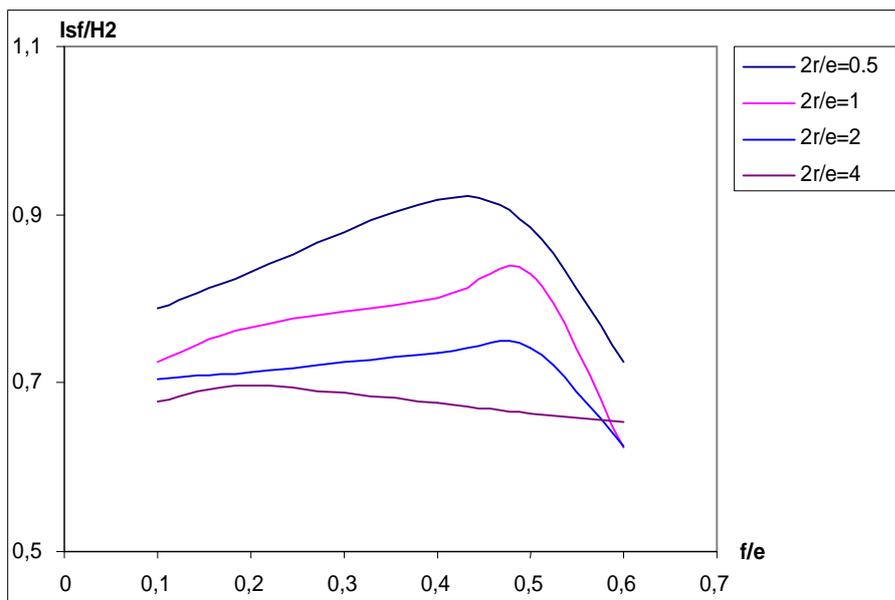


Figure V.7 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f/e \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

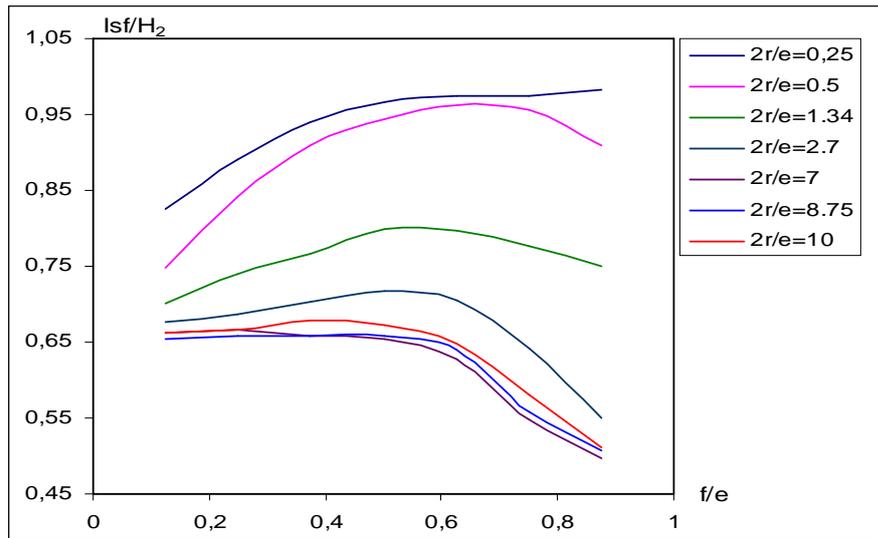


Figure V.8 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f/e \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

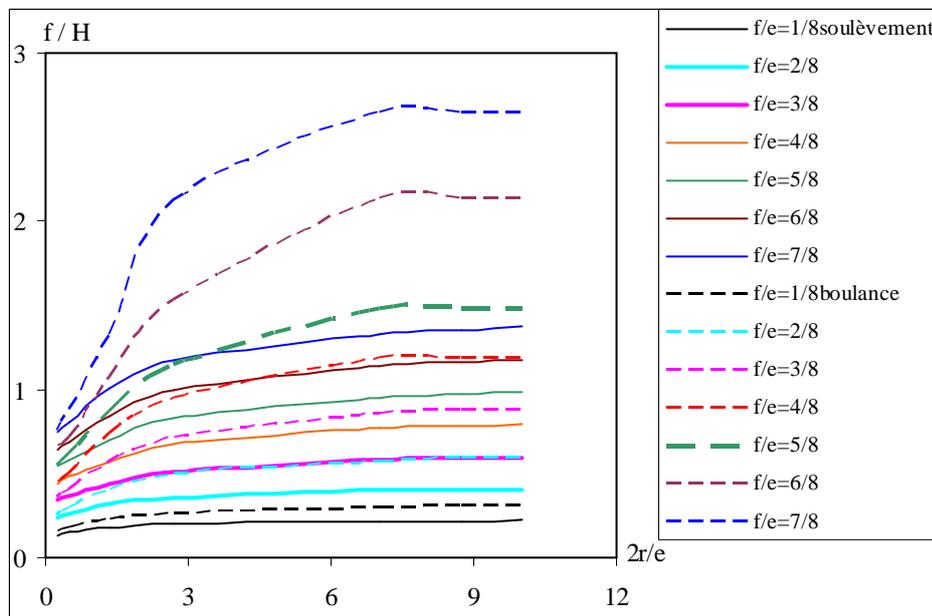


Figure V.9 : Variation des coefficients de sécurité en fonction de $2r/e \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

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.

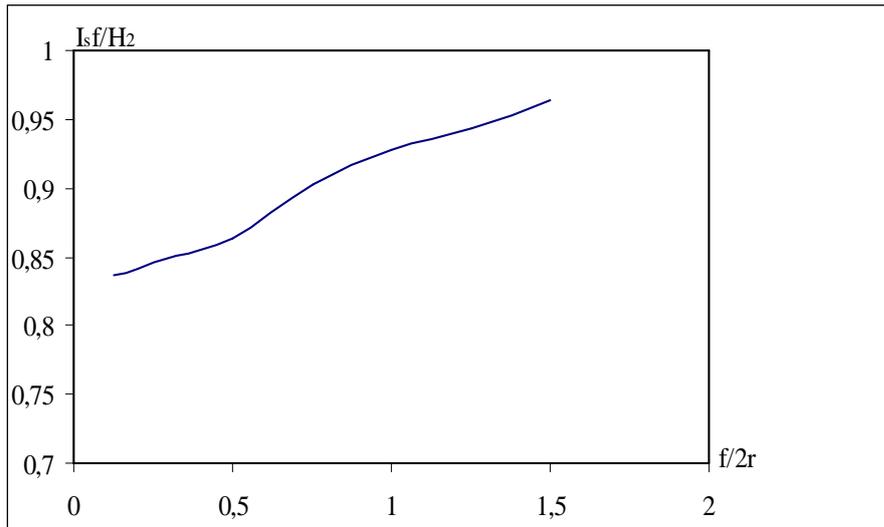


Figure V.10 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

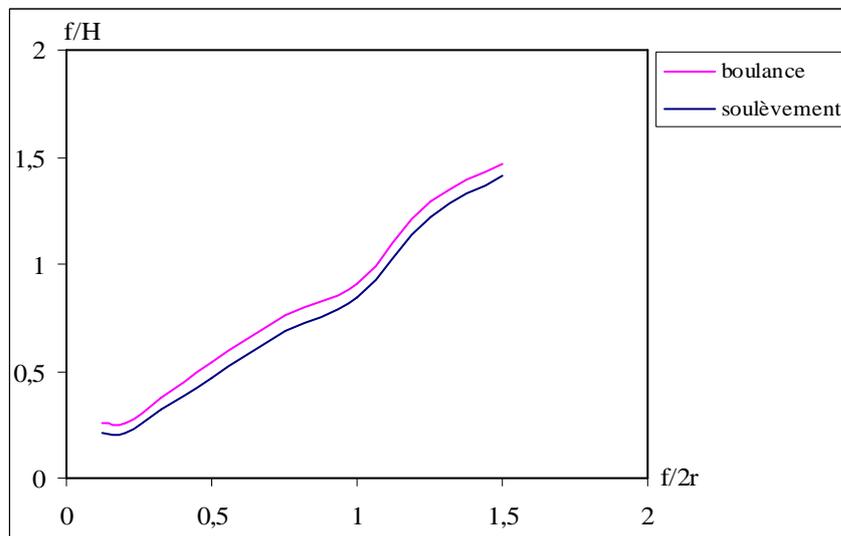


Figure V.11 : Variation des coefficients de sécurité en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

V.5.2 Cas des batardeaux tridimensionnels rectangulaires

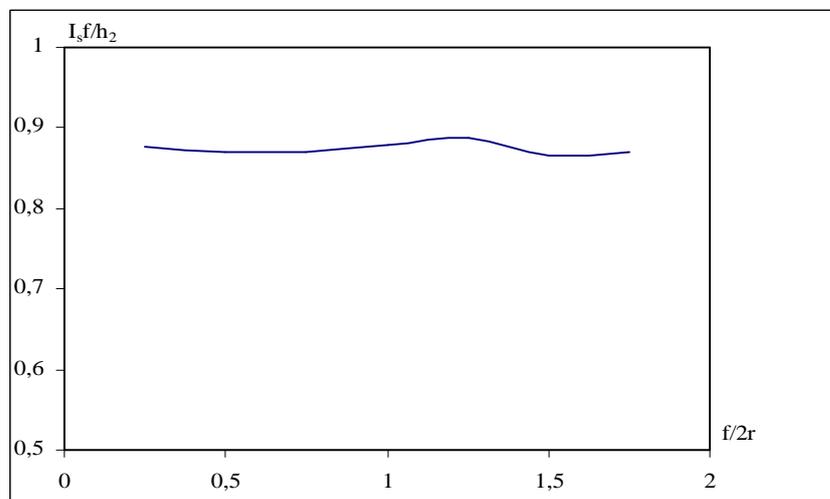


Figure V.12 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

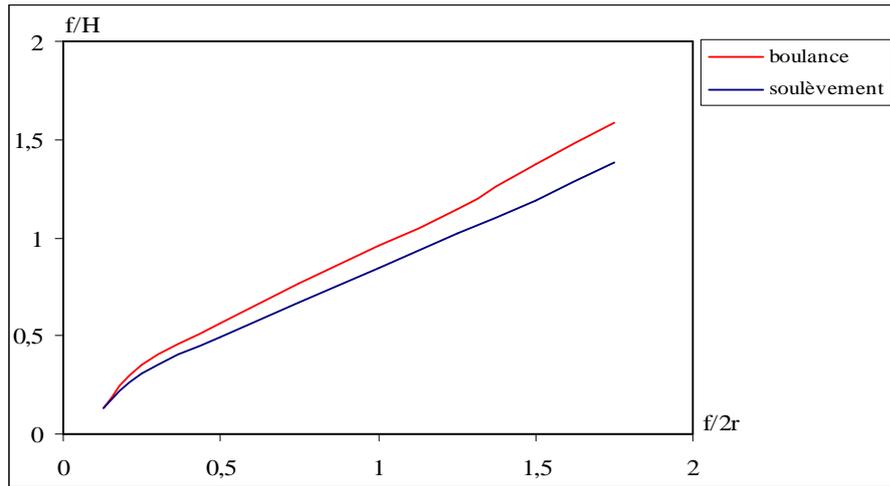


Figure V.13: Variation des coefficients de sécurité en fonction de $f/2r$.

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.

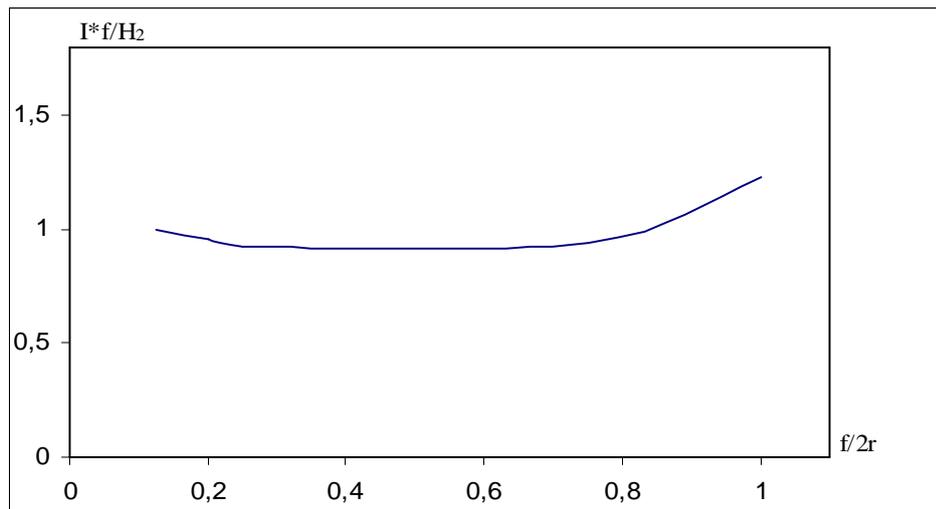


Figure V.14 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f/2r$.

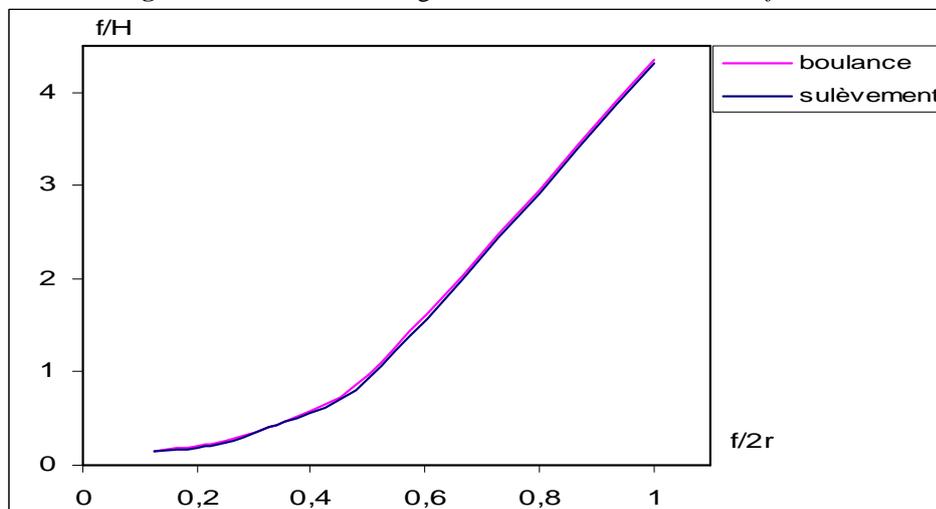


Figure V.15 : Variation des coefficients de sécurité en fonction de $f/2r$.

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

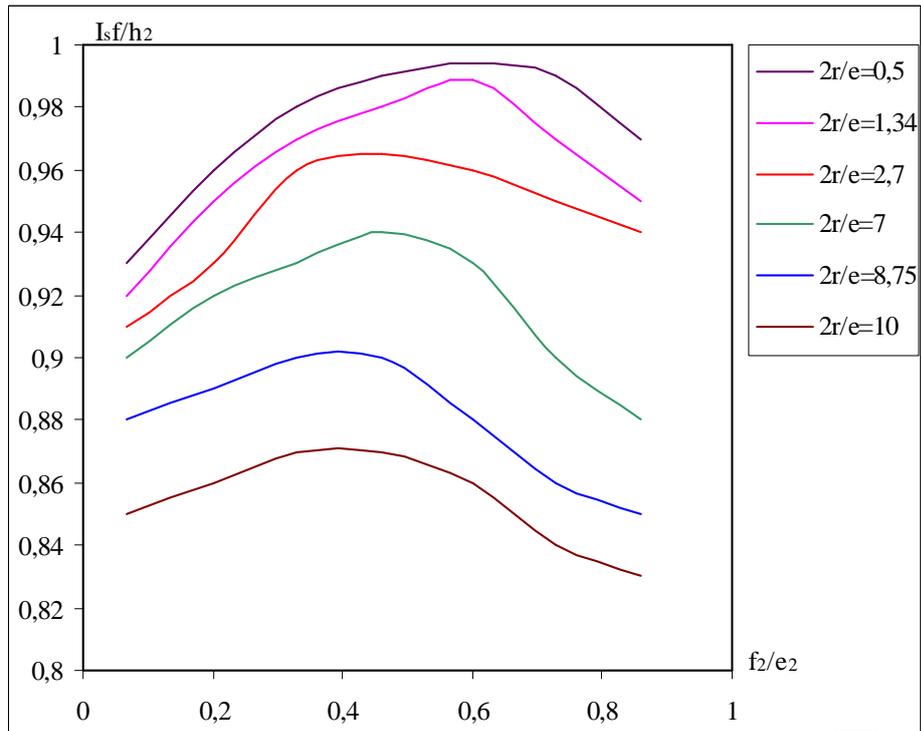


Figure V.16 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f_2/e_2 \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

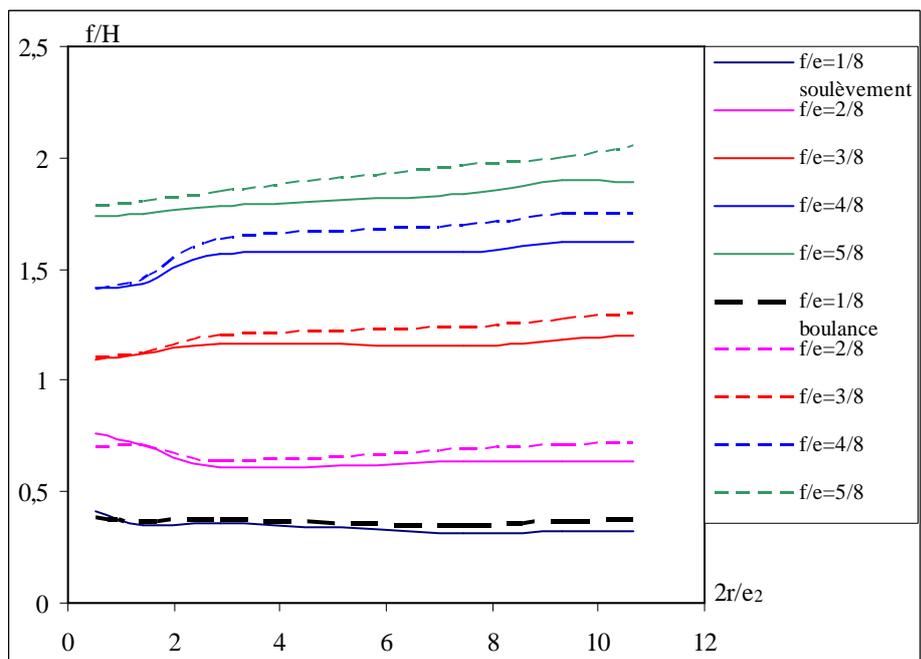


Figure V.17 : Variation des coefficients de sécurité en fonction de $2r/e_2 \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

V.6.2 Cas des batardeaux tridimensionnels rectangulaires

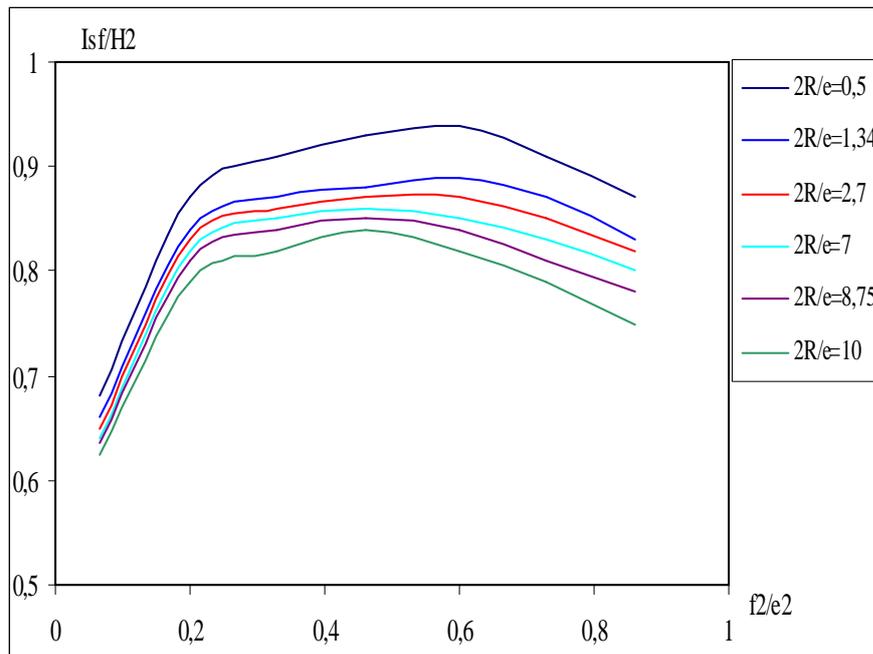


Figure V.18 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f_2/e_2 \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

- 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.

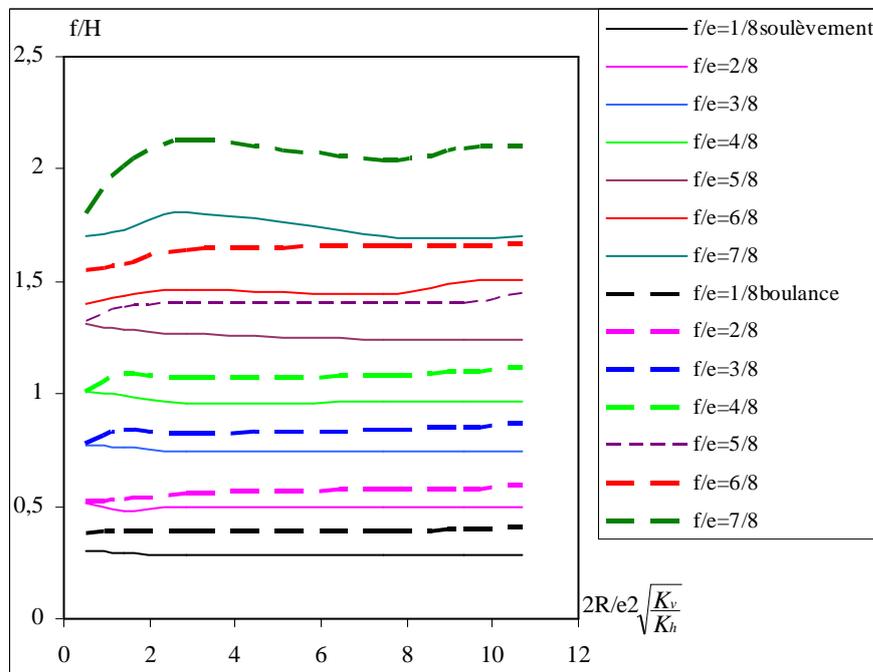


Figure V.19: Variation des coefficients de sécurité en fonction de $2R/e_2 \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

V.6.3 Cas des batardeaux axisymétriques circulaires

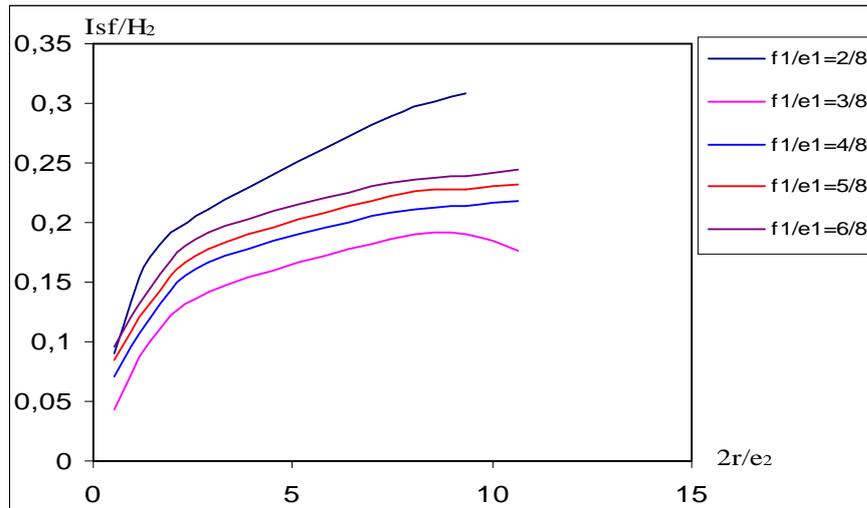


Figure V.20 : Variation du gradient de sortie en fonction de $2r/e_2 \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

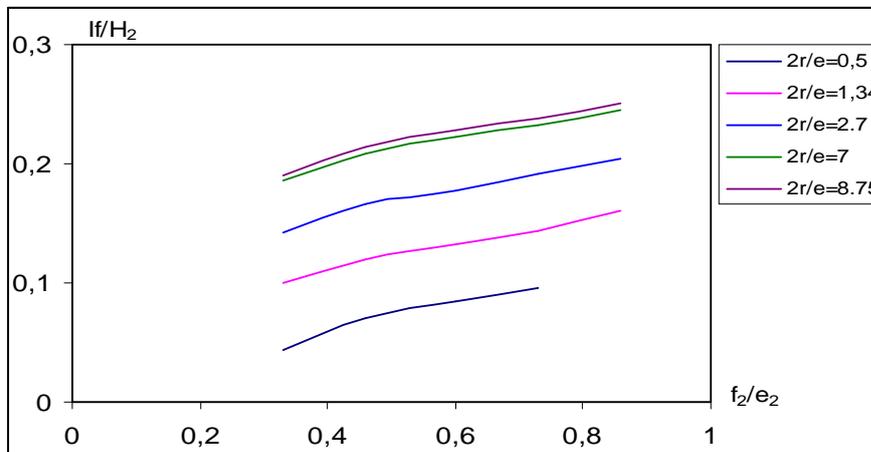


Figure V.21 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f_2/e_2 \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

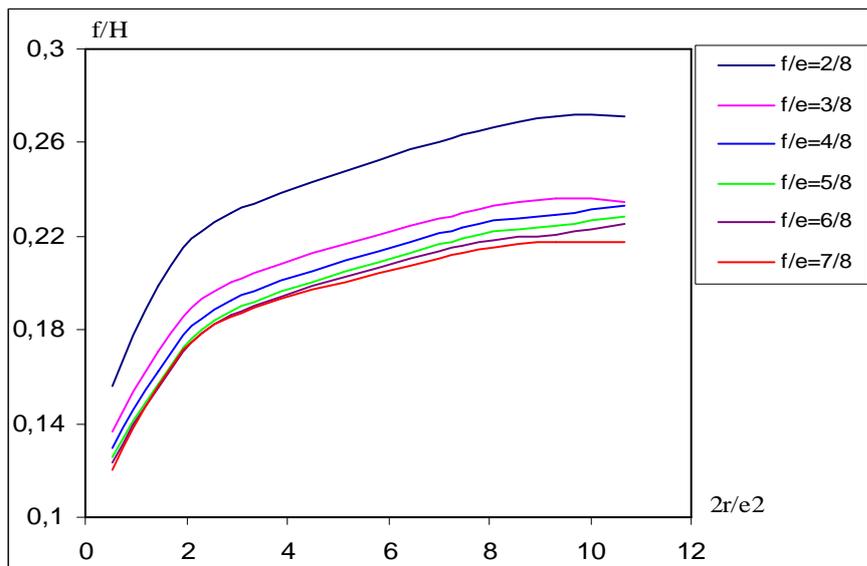


Figure V.22 : Variation des coefficients de sécurité en fonction de $2r/e_2 \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

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.

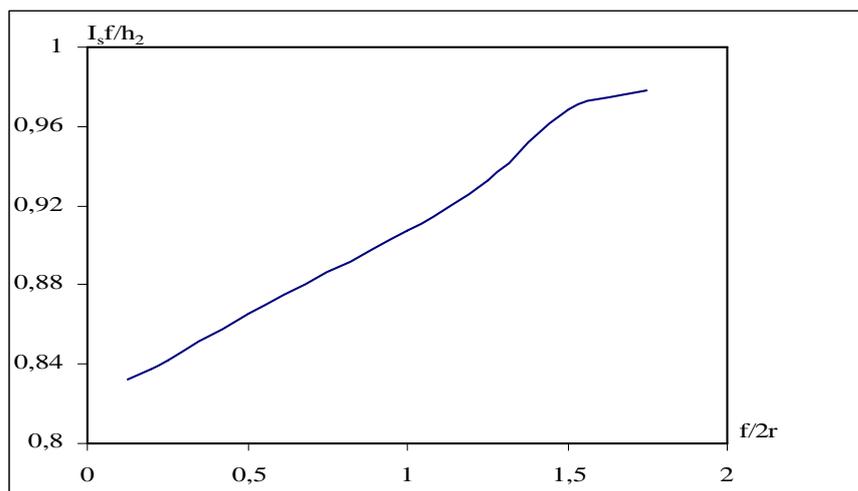


Figure V.23 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

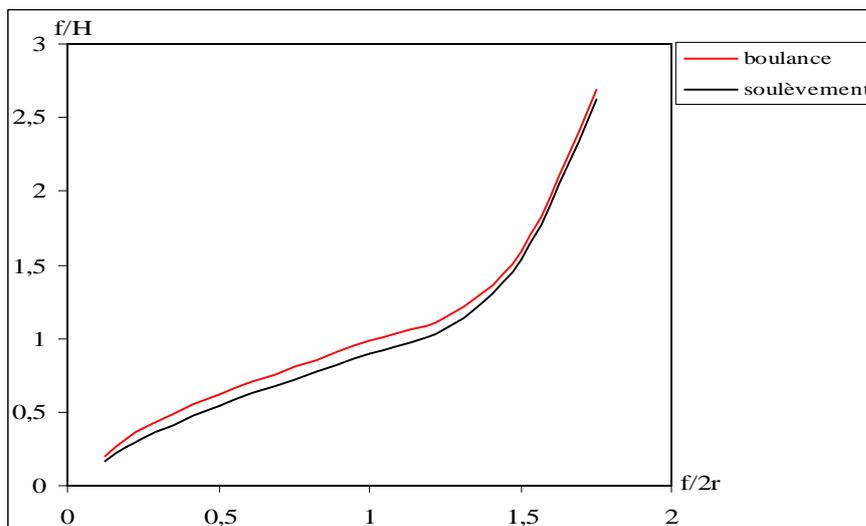


Figure V.24 : Variation des coefficients de sécurité en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

V.7.2 Cas des batardeaux tridimensionnels rectangulaires

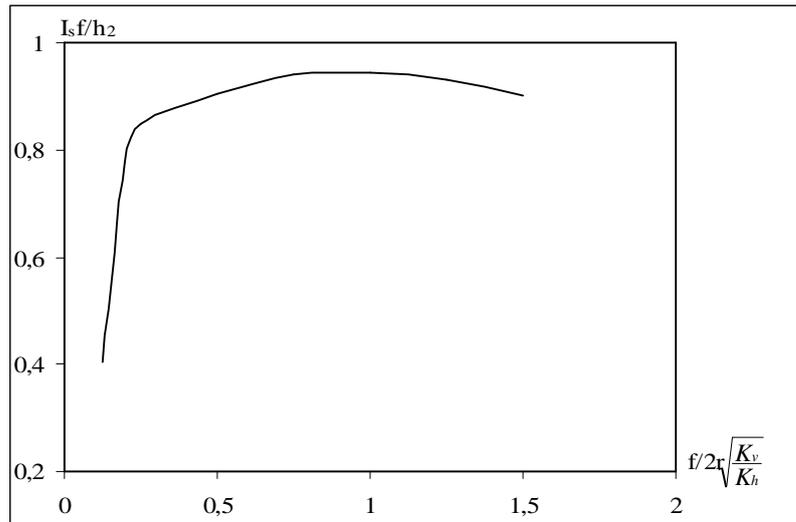


Figure V.25 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

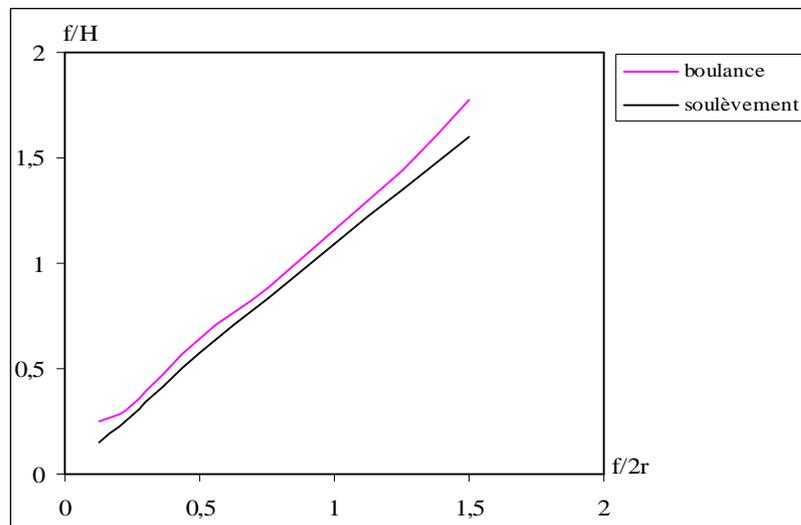


Figure V.26 : Variation des coefficients de sécurité en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

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 $f/2r = 0.25$.

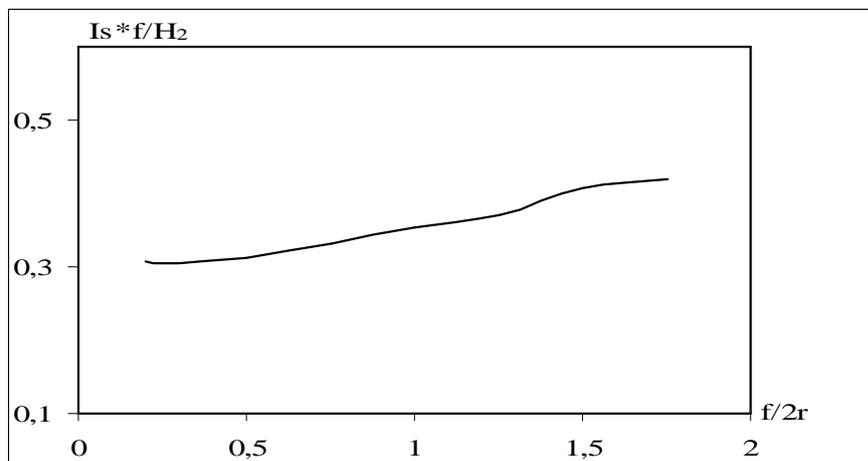


Figure V.27 : Variation du gradient de sortie en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

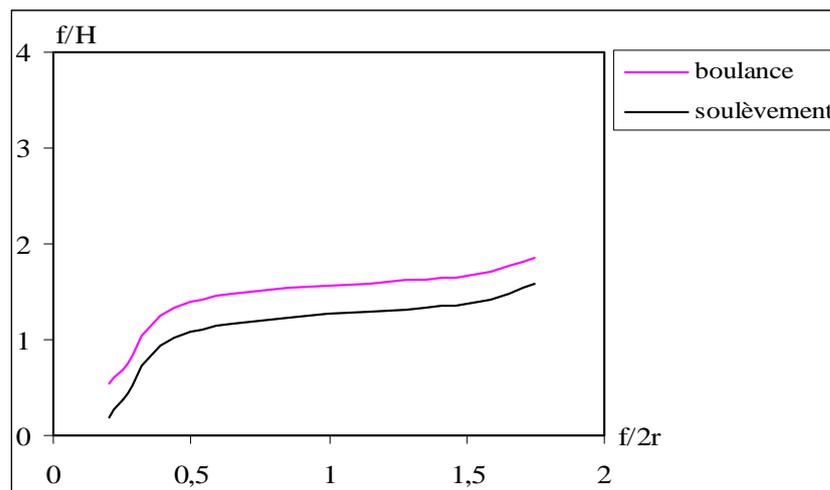


Figure V.28: Variation des coefficients de sécurité en fonction de $f/2r \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$.

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 coté et le gradient moyen d'autre coté.

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 conséquence, 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.