

## CHAPITRE IV

# Prévision numérique du phénomène de renard autour des écrans étanches

### IV.1 INTRODUCTION

L'écoulement souterrain entre l'amont et l'aval de l'écran, lié à la mise hors d'eau est susceptible de provoquer une instabilité du fond de fouille, c'est le phénomène généralement dénommé Renard. Il convient donc de considérer l'effet mécanique de l'écoulement induit par l'exhaure sur la stabilité du fond de fouille. Ce phénomène est souvent soit méconnu par les projeteurs, soit négligé, soit pris en compte de manière très approximative. Le phénomène de la réduction de pression passive (en écoulement plan et 3D) et du soulèvement en masse d'un prisme de sol devant la fiche sont en fait étroitement liés.

En pratique, on rencontre plusieurs types d'excavation utilisant un seul ou double écrans de soutènement, et plusieurs formes d'excavation, ex., des formes larges et étroites, rectangulaires, carrées ou circulaires dans une vue en plan. Ces dernières années, de grande échelle ou excavation profonde est aussi rencontrée. En excavant une grande fouille, la rupture du sol par infiltration d'eau devant un écran étanche est un problème en deux dimensions.

Lors de l'excavation de sol entre double écrans de soutènement, l'écoulement de l'eau se concentre dans le sol de l'extérieur bi-dimensionnellement. L'écoulement de l'eau bidimensionnel concentré diminue le facteur de sécurité contre la rupture de sol par infiltration d'eau (Bauer, 1984, Tanaka, 2002). Lorsque la longueur longitudinale des doubles écrans est petite, l'écoulement de l'eau se concentre tridimensionnellement dans le sol entouré par un écran rectangulaire. L'effet de l'écoulement tridimensionnel autour d'excavations augmente la pression de l'eau permettant l'apparition facile de la rupture. Donc, une analyse tridimensionnelle de la pression d'eau due à un écoulement autour d'excavations devrait être utilisée pour prédire la boullance ou soulèvement du sol lors de la conception des excavations si la longueur de celles-ci n'est pas assez grande pour considérer l'excavation comme étant un cas en déformation plane.

Un écoulement en conditions axisymétriques à travers un sol entouré par un écran cylindrique est souvent utilisé pour modéliser un tel écoulement tridimensionnel (Tanaka, 2006). La condition d'un écran de soutènement cylindrique provoque un écoulement axisymétrique concentré. Les conditions d'un écoulement axisymétrique concentré diminuent le facteur de sécurité contre la rupture du sol par infiltration d'eau (Tanaka *et al*, 2006 ; 2003, Miura *et al*, 2000).

Après avoir rappelé brièvement les principales méthodes de prévision existantes, et afin d'étudier l'influence de l'écoulement d'eau sur la stabilité du fond de fouille d'excavations *circulaires*, une procédure d'analyse numérique en différences finies par Flac en conditions *axisymétriques* a été utilisée pour une meilleure compréhension des phénomènes de rupture de sol causés par infiltration d'eau et permettant de prévoir le risque de renard et de visualiser les différents mécanismes de ruptures mal définis dans la littérature, suivie d'une interprétation et d'une discussion sur les résultats obtenus. Le but est en premier lieu, de clarifier l'influence des caractéristiques du sol ; l'anisotropie et l'hétérogénéité sur la forme du mécanisme de rupture et la perte de charge hydraulique critique, et puis, d'étudier l'influence des propriétés de l'écran étanche (rigidité et rayon relatif de l'écran) sur l'évaluation de la perte de charge hydraulique critique causant la rupture de sol. A partir des séries d'expérimentations numériques, il a été obtenu que la forme du mécanisme de rupture et la perte de charge hydraulique critique sont considérablement influencées par les caractéristiques du sol, l'anisotropie, l'hétérogénéité, interface de sol/écran et les propriétés de l'écran étanche. L'effet axisymétrique fait apparaître que la perte de charge hydraulique critique qui cause la rupture de sol par infiltration d'eau est inférieure que celle obtenue par les méthodes en déformations planes. C'est juste parmi les raisons de ce fait la rupture de sol a eu lieu dans les excavations qui ont été considérées sûres basées sur les méthodes de calcul en déformations plane.

## IV.2 INCIDENCE MECANIQUE DE L'ÉCOULEMENT

Le rabattement de la nappe à l'abri d'un écran étanche induit un écoulement sensiblement vertical ascendant devant la fiche. Les forces d'écoulement liées à ce flux ascendant diminuent le poids apparent du sol : il s'ensuit une réduction de la pression passive devant la fiche. A la limite, ces forces peuvent provoquer des désordres couramment désignés sous le terme de renard. En fait, ce terme peut recouvrir deux phénomènes distincts : la *boullance* et le *soulèvement* généralisé (Kastner, 1982).

- La *boullance* est un phénomène de surface qui survient lorsque le gradient hydraulique vertical y atteint sa valeur critique. Ce phénomène est souvent localisé en raison de l'hétérogénéité en perméabilité. Se développant progressivement, il peut être combattu par diminution du rabattement ou mise en place d'une surcharge filtrante.
- Le *soulèvement* généralisé est plus brutal : il concerne dans sa masse un prisme de sol devant la fiche susceptible de mettre en cause la stabilité de l'écran de soutènement.

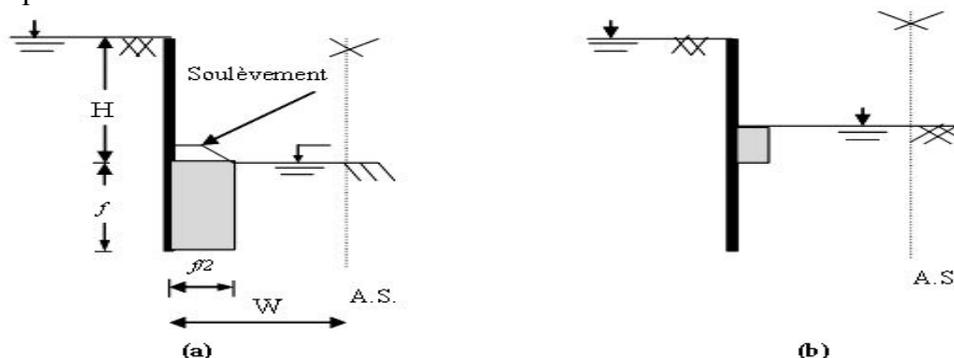


Figure IV.1. Instabilité du fond de fouille par infiltration.

La réduction de la butée et l'augmentation de la poussée sous l'effet de l'écoulement peut induire aussi une instabilité de l'ouvrage (Kastner, 1982).

## IV.3 TRAVAUX ANTERIEURS DE PREVISION DU RENARD

### IV.3.1 Cas des batardeaux plans

#### IV.3.1.1 Cas d'un milieu homogène isotrope

##### IV.3.1.1.1 Cas d'un seul écran fiché dans une seule couche en milieu semi-infini

❖ Terzaghi, 1922 a introduit la notion de gradient critique  $i_c = \gamma'/\gamma_w$  conduisant, pour un écoulement unidirectionnel vertical, au soulèvement du sol, le poids déjaugé des grains étant compensé par les forces dues à l'écoulement. L'application de cette notion au problème de l'écoulement autour d'un écran étanche est complexe. L'écoulement n'est plus uniforme. De plus, le frottement interne et la dilatance du sol s'opposent partiellement au soulèvement. En pratique, le problème est encore compliqué par l'hétérogénéité marquée du sol vis à vis de la perméabilité.

La stabilité du fond de fouille a été étudiée à l'origine par Terzaghi, 1943. A partir des essais sur le sable, ce dernier a constaté que la rupture est provoquée par le soulèvement d'un élément de sol de forme prismatique adjacent à la paroi (Figure IV.1) de largeur égale à  $f/2$  et de hauteur variable inférieure à  $f$ . L'approche de Terzaghi donne une valeur de perte de charge de  $H/f = 2,82$  à la rupture par soulèvement. Alors que la boullance, phénomène qui apparaît pour un gradient hydraulique critique, se produit à une valeur théorique de la perte de charge hydraulique égale à  $H/f = 3,14 = \pi$ . On note que Terzaghi n'a pas précisé le type de sable utilisé dans ses essais.

❖ En étudiant les différents modes de rupture du fond de fouille liés à l'infiltration d'eau, Mcnamee, 1949 distingue deux modes d'instabilité :

- Soulèvement qui entraîne un grand volume de sol adjacent au rideau ;
- Soulèvement qui affecte un petit volume de sol (*piping*) adjacent au rideau au fond de fouille.

Mcnamee affirme que le *piping* se produit lorsque le poids d'un petit prisme de sol à la surface d'excavation est insuffisant pour résister à la force d'écoulement ascendant.

- ❖ Marsland, 1953 précise que le phénomène de soulèvement apparaît uniquement pour le sable lâche, alors que la boullance n'apparaît que pour le sable dense où le gradient de sortie au fond de fouille dépasse le gradient critique.
- ❖ Bazant, 1963 prend en compte le frottement en considérant un prisme de rupture *circulaire* se développant à partir du pied de l'écran sous l'effet des forces d'écoulement.
- ❖ La comparaison entre les facteurs de sécurité dérivés de ces diverses approches dans le cas d'un écran étanche fiché dans un milieu homogène isotrope semi-infini, révèle des variations considérables qui atteignent jusqu'à 75 % (Kastner, 1982).
- ❖ En utilisant la théorie de l'analyse limite, Soubra *et al*, 1999 trouvent que la réduction du coefficient de butée pour des valeurs de perte de charge  $H/f \leq 2,5$  est quasi linéaire. Ils obtiennent une butée nulle pour une perte de charge de  $H/f = 2,78$  pour les différentes valeurs de l'angle de l'interface  $\delta$  et de l'angle de frottement  $\varphi$ . Dans leur interprétations, l'angle de l'interface  $\delta$  n'a pas d'influence sur la perte de charge hydraulique  $H/f$  qui induit la rupture par soulèvement en expliquant que lorsque la force passive s'annule, il n'y a pas d'interaction à l'interface sol-structure et le phénomène de soulèvement traditionnel apparaît.

Soubra *et al*, 1999 ont présenté une approche variationnelle appliquée à la méthode du prisme de rupture permettant le calcul de la pression passive effective des terres en présence d'écoulement dans le cas d'un sol purement pulvérulent. Ils ont montré que dans le cas général d'un sol aux propriétés hydrauliques **non homogènes** et **non isotropes**, la forme de la surface de rupture qui vérifie les trois équations d'équilibre est une *spirale logarithmique*. Ils ont montré aussi que le calcul de la pression passive ne dépend pas de la distribution des contraintes normales agissant le long de cette surface. La méthode du prisme de rupture variationnelle est équivalente à la méthode de la borne supérieure en analyse limite pour un mécanisme rotationnel en spirale logarithmique. Ils ont présenté des valeurs numériques du coefficient de butée en présence d'écoulement.

Pour ce cas, Soubra & Kastner, 1992 ont publié les résultats des coefficients de butée en présence d'écoulement où la perte de charge hydraulique peut être calculée analytiquement. Les mêmes résultats ont été obtenus par Soubra *et al*, 1999.

- ❖ Par des simulations numériques par Flac, Benmebarek *et al*, 2005 ; 2006 ont déterminé la charge hydraulique critique provoquant le renard.
- ❖ Houlsby, 1975 a étudié le même problème de coefficients de pression des terres passives en présence des gradients hydrauliques utilisant la méthode des caractéristiques. Il y a un accord très satisfaisant entre les solutions obtenues par Houlsby, (1975 ; 2006) ; les figures présentées par Benmebarek *et al*, 2006, et les résultats de calculs par la méthode d'équilibre limite obtenus par Soubra *et al*, 1999.

#### IV.3.1.1.2 Cas de deux écrans fichés dans une seule couche en milieu fini

- ❖ Les résultats numériques obtenus par Soubra *et al*, 1999, montrent que le coefficient de butée  $k_p$  augmente avec la diminution de  $D/f$ , où  $D$  : épaisseur du sol,  $f$  : la fiche de l'écran. La profondeur relative minimum  $D/f$  nécessaire pour obtenir les résultats du cas semi-infini doit être supérieure ou égale à 6. Ils ont présenté des résultats qui donnent la variation du coefficient  $K_p$  en fonction de la perte de charge hydraulique  $H/f$  pour  $\varphi$  ( $\varphi = 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ ) et  $\delta/\varphi$  ( $\delta/\varphi = 0, 1/3, 2/3$ ) et pour  $D/f = 2$ .
- ❖ Khan *et al*, 2001, utilisant une centrifugeuse pour étudier le comportement de deux batardeaux dans un sable, ont montré que : les déformations de cisaillement du sol domine le mécanisme de rupture des batardeaux ; l'augmentation de la largeur des batardeaux (fouille) implique l'augmentation de la perte de charge provoquant la rupture ; à une certaine profondeur, la fiche n'augmente pas considérablement la résistance contre une grande charge d'eau. Par ailleurs, la stabilité à la rupture en cisaillement augmente proportionnellement avec l'augmentation de la largeur des batardeaux ; la *densité relative* du sol (sable) et le *frottement* entre les écrans étanches

(batardeaux) et le sol contribuent à la résistance des batardeaux contre la déformation en cisaillement (rupture) du sol due à la grande perte de charge d'eau ; l'écran en aval est sollicité aux grandes contraintes que l'écran en amont et ; la double couche de tirant augmente significativement la résistance latérale des batardeaux contre une grande charge d'eau.

❖ Hirose *et al*, 2007, ont fait une étude de mouvement de particules du sol avec les augmentations de la charge hydraulique  $H$  en amont et en aval, lors d'une rupture de sol par infiltration d'eau autour de **deux** écrans étanches, en utilisant l'analyse PIV (Particle Image Velocimetry). Parmi les conclusions obtenues est que : le mouvement de particules du sol est limité à approximativement à la profondeur de la fiche de l'écran  $D$  et largeur  $D/2$ , qui prouve la validité de la méthode de Terzaghi et le Concept de Prisme de Rupture - Prismatic failure concept -.

#### IV.3.1.2 Cas de deux écrans fichés dans une seule couche en milieu homogène anisotrope

❖ Pour un milieu *semi-infini*, Soubra *et al*, 1999, ont montré dans des abaques la variation du coefficient de butée avec  $K_h/K_v$  lorsque  $\varphi = 35^\circ$ ,  $H/f = 2$  et  $\delta/\varphi = 0, 1/3, 2/3$  et 1. Il y a une grande diminution du coefficient de butée jusqu'à  $K_h/K_v = 100$ . Au delà de cette limite, le coefficient de butée tend vers à un asymptote.

Et pour un milieu *fini*, ils ont montré leur résultats de la variation du coefficient de butée en fonction de  $H/f$  pour différentes valeurs de  $\varphi$  ( $\varphi = 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ ) et  $\delta/\varphi$  ( $\delta/\varphi = 0, 1/3, 2/3$ ) et pour  $D/f = 2$  lorsque le rapport de perméabilité  $K_h/K_v = 50$ .

#### IV.3.1.3 Cas de deux écrans fichés dans un milieu bicouche isotrope

Dans cette partie, est considéré le cas fréquent des batardeaux fichés dans un milieu bicouche.

##### IV.3.1.3.1 Cas où l'écran est fiché dans la couche supérieure (cas A)

❖ Pour le cas d'un milieu bicouche isotrope où la perméabilité des couches supérieure et inférieure sont respectivement  $K_1$  et  $K_2$ , et un milieu *fini*, Soubra *et al*, 1999, ont présenté un abaque qui donne la variation du coefficient de butée  $k_p$  avec  $k_1/k_2$  lorsque  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\delta/\varphi = 2/3$  et  $H/f = 2$ . Ils ont montré que pour le cas d'une seule couche ( $k_1/k_2 = 1$ ), le coefficient de butée est égal à 3,81. Lorsque  $k_1/k_2 > 10$ , le coefficient de butée obtenu correspond au cas d'une seule couche de profondeur limitée ( $\varphi = 35^\circ$ ,  $\delta/\varphi = 2/3$ ,  $H/f = 2$  et  $D/f = 2$ ), depuis que la couche inférieure peut être considérée comme un substratum imperméable. Cependant, pour les cas lorsque la couche inférieure a un plus grand coefficient de perméabilité que la couche supérieure ( $k_1/k_2 < 1$ ), la plupart de la perte de charge est concentrée dans la couche supérieure, résultant en plus grandes pressions interstitielles. Par conséquent, le coefficient de butée diminue avec la diminution de  $k_1/k_2$ .

##### IV.3.1.3.2 Cas où l'écran est fiché dans la couche inférieure (cas B)

❖ Il s'agit du même cas, mais la seule différence par rapport au cas précédent est que l'écran dans ce cas est fiché dans la couche inférieure. Pour un milieu *fini*, Soubra *et al*, 1999, ont aussi présenté une figure donnant la variation du coefficient de butée  $k_p$  avec  $k_1/k_2$  lorsque  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\delta/\varphi = 2/3$  et  $H/f = 2$ . Comme dans le cas précédent (cas A), le coefficient de butée dans le cas d'une seule couche en milieu isotrope ( $k_1/k_2 = 1$ ) est égal à 3,81. Pour  $k_1/k_2 > 100$ , la perte de charge a lieu uniquement dans la couche inférieure, et la couche supérieure peut être considérée comme un filtre qui augmente la stabilité globale du sol devant l'écran.

En revanche, pour les cas lorsque la couche inférieure a un plus grand coefficient de perméabilité que la couche supérieure ( $k_1/k_2 < 1$ ), la plupart de la perte de charge a lieu dans la couche supérieure, et par conséquent, le coefficient de butée diminue avec la diminution de  $k_1/k_2$ .

Cependant, il devrait être noté que ce schéma de calcul est seulement valide lorsque le gradient hydraulique vertical dans la couche supérieure est plus petit que le gradient critique  $i_c = \gamma'/\gamma_w$ , sinon comme autrement rupture par soulèvement de la couche supérieure se produira dû au fait que le poids saturé de cette couche est égal à la résultante des pressions interstitielles sur la base de cette couche.

❖ Pour un milieu *semi-infini*, Benmebarek *et al*, 2005 ont proposé avec prise en compte de l'effet de la perméabilité, les résultats suivants : pour les deux couches du sol  $\gamma_{sat}/\gamma_w = 2$ , module

volumique de sol  $K=30$  MPa, module de cisaillement  $G=11,25$  MPa, l'angle de frottement interne  $\varphi = 30^\circ$ , et une cohésion nulle, angle de dilatance  $\psi = 0$  (comportement de Mohr Coulomb non associé), angle de frottement de l'interface  $\delta = 0$ . Il faut noter qu'il s'agit de cas où la couche inférieure est considérée *semi-infini*, donc  $D_2 \geq 6*f$  où  $D_2$  : épaisseur de la couche inférieure,  $f$  est la fiche de l'écran.

Tableau IV.1. Valeurs de la perte de charge critique. D'après Benmebarek et al, 2005.

$k_1/k_2$ $D_1/f$	1/200	1/100	1/10	1/5	1/2	1	2	5	10	100	200
0.25	0.55	0.60	0.90	1.12	2.02	2.77	2.90	3.24	3.38	4.00	4.42
0.50	1.10	1.13	1.31	1.60	2.22	2.77	3.24	3.58	3.63	4.46	4.48
0.75	1.70	1.75	1.81	2.02	2.36	2.77	3.31	3.92	4.19	4.66	4.69
1.00	2.09	2.15	2.29	2.42	2.63	2.77	3.17	3.65	3.92	4.33	4.40
1.25	2.40	2.44	2.49	2.63	2.77	2.77	2.90	2.97	2.99	3.03	3.04
1.50	2.64	2.64	2.66	2.77	2.77	2.77	2.77	2.90	2.90	2.90	2.90
1.75	2.64	2.64	2.69	2.77	2.77	2.77	2.77	2.77	2.77	2.77	2.77

### IV.3.2 Cas des batardeaux circulaires

Les solutions susmentionnées peuvent être seulement utilisées pour prévoir le risque de renard dans le cas des batardeaux plans. Cependant, les écrans de soutènements circulaires, dû à leur supériorité structurelle comme les structures cylindriques, sont fréquemment utilisés dans les excavations (Kumagai *et al*, 2005 ; Qu *et al*, 2004). L'adoption du cas des déformations planes dans l'analyse et la construction n'est évidemment pas correcte, et conservatrice dans la conception des écrans de soutènement *circulaires* (Cheng, 2005). En conséquence, la détermination de la perte de charge hydraulique critique qui cause la rupture du sol par infiltration d'eau dans les batardeaux cylindriques revêt une grande signification.

Les résultats pratiques concernant ce problème sont cependant assez peu nombreux, et l'effet axisymétrique a reçu des études modérées utilisant des approches expérimentales qui ont révélé de très hautes dispersions des résultats.

❖ 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. Lorsque  $R/d > 1$  le gradient au point  $E$  est théoriquement infini. Dans ces conditions, le moindre écoulement devrait provoquer la bouillonnance. En fait le renard n'apparaît pas avant que le gradient moyen, compté sur une distance correspondant à plusieurs grains, ne soit critique.

❖ La comparaison des différentes méthodes de prévision du risque de renard montre qu'aucun des critères examinés ne permet la prévision correcte du soulèvement généralisé. Ainsi, Kastner, 1982 avait proposé une méthode permettant de calculer simplement et précisément ces le gradient moyen et gradient de sortie dans le cas des écoulements *plans*. Elle mériterait d'être étendue aux problèmes *tridimensionnels* tels que les fouilles *rondes*, *carrées* et *rectangulaires*, les corrections proposées dans ce cas par Davidenkoff et Franke, 1965 étant trop imprécises (Kastner, 1982).

❖ En fait, ces méthodes ne considèrent pas l'influence de la forme d'excavation sur la pression d'eau. En général, ces méthodes ont été développées pour les situations en déformations plane. Tanaka, 2002 a montré que la rupture se passe parfois dans les excavations profondes et devant les écrans étanches conçus par ces méthodes. En outre, l'écoulement de l'eau concentré à deux dimensions sous-estime le facteur de sécurité contre le phénomène de renard (Bauer, 1984 ; Tanaka *et al.*, 2002).

❖ Par ailleurs, Cai *et al.*, 2003 ont montré aussi à partir des cas pratiques étudiés que la bouillonnance se passe dans les excavations profondes conçues par des méthodes de calcul en plan.

Ainsi, l'étude faite dans ce chapitre, montre que l'effet **axisymétrique** est remarquable du moment que la perte de charge hydraulique critique qui cause la rupture est inférieure à celle obtenue par les méthodes en déformation plane.

❖ Tanaka *et al*, 2006, par des simulations en éléments finis, ont étudié les effets de 'jet grouting' (sous les écrans étanches) sur la stabilité du sol à la rupture par écoulement d'eau. Le but principal était de déterminer la perméabilité et l'épaisseur de 'grouting' utilisée pour prévenir la rupture du sol par infiltration de l'eau sous un écran unique, double et circulaire dans le cas d'un milieu semi-infini. Les auteurs utilisaient le Concept de Prisme de Rupture - Prismatic Failure Concept - (Tanaka, 1999) pour analyser les différences de pertes de charge hydraulique critiques causant la rupture du sol par infiltration  $H_c$ . D'après ce concept de rupture, les auteurs supposent que le prisme de sol soulevé par forces d'écoulement d'eau a la forme d'un prisme avec une certaine hauteur et une certaine largeur adjacent à l'écran étanche. Le soulèvement du prisme est résisté par le poids submergé et les frottements sur les faces gauche et droite du prisme. Cependant, la possibilité de l'étude de l'effet de 'jet grouting' pour prévenir la rupture du sol due aux forces d'écoulement d'eau est au delà de l'étendue de cette présente étude.

Tanaka *et al*, (année inconnue), par des tests au laboratoire, utilisant un appareil pour l'étude de la rupture du sol par écoulement d'eau sous les conditions **axisymétriques**. Les résultats obtenus montrent que : (1) lorsque la différence de charge hydraulique  $H$  entre le coté amont et aval augmente au delà de la différence de charge à la déformation  $H_y$ , les lignes équipotentiels se déforment en aval. (2) lorsque  $H$  devient grande, la condition du sol procède comme suit : abaissement (subsidence) en amont et soulèvement de l'aval, **implique un** mouvement des particules de sol du coté amont vers l'aval, **implique une** progression de la déformation du sol, **implique une** rupture de sol. La rupture de sol par écoulement se produit dans un type de rupture de forme d'une bague (Ring-shape failure) pour les **petites** valeurs de  $D/T$ , et un soulèvement généralisé (Bulk-heave failure) pour les **grandes** valeurs de  $D/T$  où  $D/T$  est le rapport de la fiche du rideau  $D$  et la profondeur totale de sol  $T$ . (3) La perte de charge hydraulique à la rupture  $H_y$ , est presque égale à la perte de charge hydraulique critique par le concept de rupture prismatique. (4) Le sol a un grand -free board- de la charge hydraulique de déformation à la rupture dans le cas des conditions **axisymétriques**. (5) Le sol a un effet auto stabilisateur dû au mouvement du sol du coté amont à l'aval. L'effet est plus grand dans la condition de l'axisymétrie que dans la condition en plan. Dans le cas des conditions **axisymétriques**, plus que la valeur  $D/T$  devient grande, plus que l'effet augmente.

❖ Tanaka *et al*, (année inconnue), dans une autre étude montre que pour une condition **axisymétrique**, le sol dans l'écran **circulaire** est en état d'équilibre entre une force d'écoulement ascendante et une force de gravité descendante. L'état est similaire à celui du test de rupture de sol par écoulement unidimensionnel dans le cas de condition d'écoulement uniforme.

Enfin, les recherches les plus récentes qui traitent la stabilité des excavations circulaires en présence d'écoulement d'eau sont présentés généralement comme des études de cas (Tanaka *et al*, 2006 ; 2003, Miura *et al*, 2000, Cai *et al*, 2003, Kim *et al*, 2005) et ne peuvent pas être généralisées.

De ces divers aperçus, il paraît que la stabilité de fond de fouille à la rupture en présence d'écoulement d'eau peut parvenir de différents mécanismes de rupture et la plupart des méthodes existantes ne considèrent pas l'influence de : la forme d'excavation, l'anisotropie et l'hétérogénéité du sol, ainsi les propriétés de l'écran étanche sur la perte de charge hydraulique critique qui cause la rupture de sol par infiltration d'eau. Par conséquent, cette présente étude a pour objet, la proposition d'une procédure numérique permettant d'évaluer la perte de charge hydraulique critique causant la rupture du sol au fond de fouille **circulaire** en conditions **axisymétriques**, et identifier les différents mécanismes de rupture utilisant la méthode de différences finies explicite implantée dans le code Flac2D. L'effet des différents paramètres sur la forme des mécanismes de rupture et la perte de charge hydraulique critique est discuté en détail. La comparaison avec d'autres existantes solutions montre un bon accord, qui confirme la convenance de l'analyse numérique proposée.

## IV.4 MODELISATION NUMERIQUE DU PHENOMENE DE RENARD

### IV.4.1 Choix des caractéristiques de l'interface en Flac

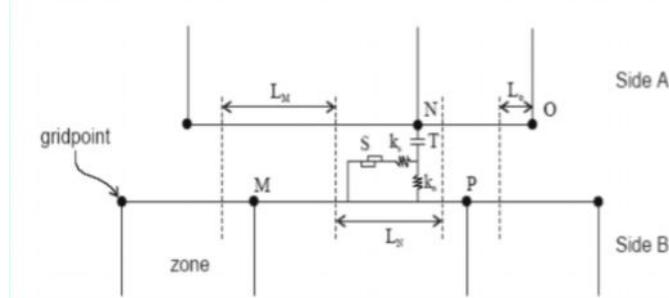


Figure IV.2. Eléments d'interface en Flac.

S = patin

T = contrainte de traction

$k_n$  = raideur normal

$k_s$  = raideur tangentielle

LN = longueur associée au point N

----- détermine la limite pour les segments adjacents (au milieu de deux points adjacents)

Les caractéristiques des interfaces sont :

- la raideur normale  $k_n$  (contrainte/déplacement) ; la raideur tangentielle  $k_s$  (contrainte/déplacement) ; la cohésion  $c$  (contrainte) ; l'angle de dilataance ; l'angle de frottement  $\varphi$ ,
- la résistance à la traction  $T$  (force).

Le critère de Coulomb est adopté. La force de cisaillement sur un élément de longueur  $L$  est limitée par la relation :

$$F_{s \max} = c.L + \tan \varphi.F_n \quad (\text{IV.1})$$

où  $F_n$  est la force normale. Si le critère est atteint,  $F_s = F_{s \max}$  avec conservation du signe.

Pour les caractéristiques de frottement, de cohésion, de dilataance et de traction limite, on prend généralement celles du matériau le moins résistant. Les raideurs  $k_n$  et  $k_s$  sont plus difficiles à estimer.

Des tests préliminaires pour les cas étudiés dans ce travail ont montré une faible sensibilité des résultats à ces deux paramètres. Afin de limiter les temps de calcul, en Flac, il est recommandé la règle suivante : prendre des valeurs de raideurs  $k_n$  et  $k_s$  égales à dix fois la valeur de rigidité équivalente de la partie voisine la plus rigide. La rigidité apparente d'une zone, exprimée en contrainte par unité de longueur est :

$$\max \left[ \frac{k + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{\min}} \right] \quad (\text{IV.2})$$

où  $K$  et  $G$  sont respectivement le module volumique et de cisaillement et  $\Delta z_{\min}$  est la petite dimension dans la direction normale des zones adjacentes. 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 (i.e de cisaillement direct et tests triaxiaux), ces essais peuvent fournir des propriétés physiques pour l'angle de frottement, la cohésion, l'angle de dilataance et traction limite, aussi bien que les rigidités normales et de cisaillement. On note que l'interface ne peut pas être connectée aux zones nulles.

### Densités en Flac

Trois différentes densités de masse peuvent être données en Flac : la densité sèche du sol,  $\rho_d$  ; la densité saturée du sol (densité volumique),  $\rho_s$  ; et la densité du fluide,  $\rho_w$ .

Il faut noter que ces densités sont seulement nécessaires si un chargement gravitationnel est spécifié. Les unités de la densité sont la masse divisée sur le volume (exemple, en unités SI,  $\rho_w$  est 1000 kg/m<sup>3</sup>). Si la commande *Config gw* en Flac est spécifiée, donc la densité sèche du sol  $\rho_d$  doit être utilisée. Le code Flac calculera la densité saturée de chaque élément utilisant la densité du fluide  $\rho_w$ , la porosité  $n$ , et la saturation  $s$  :

$$\rho_s = \rho_d + ns \rho_w$$

Le seul cas où la densité saturée est entrée comme donnée en Flac est pour le calcul des contraintes effectives (distribution des pressions interstitielles statiques) n'est pas utilisée en mode *Config gw*.

Elle est utilisée avec la commande *WATER Table* (ou la commande *INITIAL pp*) où la densité sèche est spécifiée pour les zones au-dessus de la surface libre et la densité saturée est spécifiée pour les zones au-dessous de la surface libre.

#### IV.4.2 Procédure de modélisation du phénomène de renard

La prédiction de conditions de rupture sous les conditions d'un écoulement plastique permanent est l'une des tâches qui peut être difficile à simuler correctement par un modèle numérique (Sloan *et al*, 1982). Frydman & Burd, 1997, et Erickson & Drescher, 2002, avec des algorithmes viscoplastiques ou élastoplastiques, ont montré clairement la dépendance du facteur de capacité portante  $N_r$  en déformations planes avec la géométrie du maillage et ont indiqué la réduction de ce facteur avec la diminution de l'angle de dilatation du sol.

En conséquence, afin de développer un acceptable schéma d'une analyse numérique pour les prochains calculs, des simulations préliminaires ont été menées en testant l'influence des dimensions du maillage, la dimension des éléments, les conditions aux limites, et le coefficient de pression de terre au repos  $K_0$ . Les résultats montrent la difficulté de capture des mécanismes de rupture pour un maillage grossier, donc un maillage raffiné est nécessaire afin de visualiser clairement ces mécanismes. Aussi, les résultats confirment que la variation des propriétés élastiques du sol et le coefficient de pression de terre au repos  $K_0$  n'ont aucune influence considérable sur la perte de charge hydraulique critique, comme l'estimation numérique du facteur de capacité portante  $N_r$  des fondations.

On doit mentionner que l'évaluation des valeurs précises de la perte de charge hydraulique provoquant la rupture de sol par écoulement n'est pas facile à déterminer, cependant, seulement le critère de stabilité du fond de fouille est traité pour les différentes valeurs de la perte de charge hydraulique  $H/f$ .

Afin d'identifier les cas limites de la rupture du sol devant la fiche sous l'effet de l'écoulement et de mettre en évidence les différentes formes de renard, nous avons exploité le code Flac2D en conditions axisymétriques. On note qu'on peut tester deux procédures de simulation suivantes :

La première procédure est la même que celle utilisés pour la modélisation de la butée et la poussée en présence d'écoulement *plan*. Dans cette procédure, on continue à augmenter la perte de charge  $H/f$  progressivement jusqu'à la disparition de la butée (apparition de la rupture due à l'écoulement d'eau). Benmebarek, 2005, a montré que cette procédure ne permet pas de déterminer avec précision les valeurs de  $H/f$  qui donnent une butée nulle. Même en réduisant la vitesse de l'enfoncement de l'écran dans le massif. Ceci est à cause d'une faible résistance du massif qui se manifeste. Cette résistance s'explique par la réaction du sol à l'enfoncement de l'écran.

En outre, on ne peut pas parler de la modélisation de la butée pour une excavation supportée par des écrans circulaires, du moment que pour les structures circulaires, le déplacement de l'écran est restreint dû à l'effet de ses propres propriétés structurelles et ses supports intérieurs.

Une autre raison nous a poussé de penser à une autre procédure de simulation, et que dans les essais aux laboratoires de Terzaghi la paroi est maintenu fixe et le renard est provoqué en augmentant progressivement la perte de charge hydraulique.

Ainsi, nous avons passé à la procédure de simulation suivante :

**Etape 1** : Un **état initial** de contraintes géostatiques est établi en fonction du poids volumique du sol tout en considérant le domaine *élastique* : utilisation des fonctions *FISH* du code Flac en supposant que le coefficient de pression des terres au repos  $K_0 = 0,5$ , et l'effet de l'installation de l'écran dans le sol sur les contraintes est négligé. Le niveau de l'eau est assumé pour être localisé à la surface du sol. Cette analyse est exécutée en Flac dans une configuration *axisymétrique* et écoulement souterrain 'axisymmetric and groundwater configuration' en mode hydromécanique *découplé*. Au début, de grandes valeurs initiales sont attribuées pour la *cohésion* et la *tension* du sol. Ces valeurs sont utilisées pour le développement des contraintes gravitationnelles dans le sol. En effet, le modèle est forcé à se comporter en élasticité à l'état initial. Cela permet d'éviter le développement d'éventuelle rupture plastique durant la phase initiale des analyses. Elle est utilisée en simulation *explicite* en Flac.

La stabilité du modèle est vérifiée par le tracé du champ de contraintes totales verticales  $SYY$ , champ de contraintes totales horizontales  $SXX$ , champ de contraintes effectives verticales  $esyy$ , champ de contraintes effectives horizontales  $esxx$ , distribution des pressions interstitielles  $PP$  pour l'état initial saturé.

**Etape 2** : Un **calcul d'écoulement** : une perte de charge hydraulique  $H/f$  est imposée en simulant la distribution des pressions interstitielles sous les conditions aux limites présentées dans la Figure IV.8. La convergence des calculs **hydrauliques** est contrôlée par :

- *Historique des débits entrant et sortant (inflow and outflow history).*
- *Historique de  $q$ ratio (qratio history).*

**Etape 3** : Un **calcul mécanique** : le régime d'écoulement est fixé, puis un calcul mécanique est lancé sous l'effet des pressions interstitielles développées au cours de l'étape précédente dans le domaine élasto-plastique.

Les **étapes 2 et 3** sont répétées jusqu'à l'apparition du phénomène de renard en augmentant la perte de charge hydraulique progressivement. Donc, il s'agit d'un calcul hydromécanique **découplé**.

La convergence des calculs **mécaniques** est contrôlée par :

- *Historique de la force non équilibrée maximale (Maximum unbalanced force history).*
- *Historique des déplacements  $y$  du nœud  $i, j$  (point situé à l'aval) ( $y$ -displacement history of gridpoint  $i, j$ ).*

La **stabilité** ou **l'instabilité** (état de rupture) des calculs mécaniques peut être vérifiée par :

1- par le calcul du facteur de sécurité  $f_{os}$ :

- Si  $f_{os} > 1$  donc le modèle est stable (pas de phénomène de renard) ;
- Si  $f_{os} < 1$  donc le modèle est en *rupture* (soulèvement ou boulangue) ;
- Si  $f_{os} = 1$  donc le modèle est en état critique.

Et puisque cette option nous ne permet pas de vérifier la stabilité des calculs, à cause que le programme s'arrête avant de terminer le calcul de  $f_{os}$ , on procède aux commandes suivantes :

2- contrôle de :

- *Champ des vecteurs de déplacements ; Champ des vecteurs de vitesses ; - Historique des vecteurs de vitesses d'un nœud (point situé à l'aval) ; Historique des déplacements  $y$  d'un nœud (point situé à l'aval) ; Points plastiques dans le modèle ; Etat du modèle (state) :*

*1- zones en rupture de cisaillement ; 2- zones en rupture au passé ; 3- zones en rupture de tension*

Enfin, on peut identifier et distinguer les modes de rupture de sol devant la fiche de l'écran par écoulement à partir des résultats de l'analyse numérique en différences finies (boulangue ou soulèvement) par le traçage pour chaque cas étudié, les figures qui montrent le mécanisme de rupture visualisé par le champ de vecteurs de déplacements et la distribution des déformations maximales de cisaillement à la fin des calculs numériques lorsqu'ils atteignent l'état de l'écoulement plastique stable.

Sachant que, pour un sol homogène, la rupture localisée comme le "piping" ou "boulangue" est très probablement de commencer à un point sur la surface adjacent à l'écran étanche comme elle s'allonge dans le chemin de l'infiltration le plus court. Par ailleurs, contrairement à la boulangue qui se passe au niveau de la surface d'excavation, le phénomène de soulèvement généralisé devant la fiche de l'écran étanche, qui implique un plus grand volume de sol, a deux formes de mécanismes de ruptures: un prisme de rupture rectangulaire, et un prisme de rupture triangulaire

## IV.5 PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

### CAS DES BATARDEAUX AXISYMETRIQUES CIRCULAIRES

Flac2D peut être employé pour faire l'analyse des problèmes *axisymétriques* (ou corps de révolution). Le maillage axisymétrique est configuré par une commande spécifique. Pour cette configuration, un système de coordonnées cylindrique est appelé :  $x = 0$  est l'axe de symétrie, la direction de l'axe  $x$  correspondant à la coordonnée radiale, et la direction  $y$  à la coordonnée axiale.

En dehors de coordonnée plane (la direction  $z$ ) est la coordonnée circonférentielle. Seulement *l'abscisse positive* de l'axe  $x$  peut être employée pour créer un maillage axisymétrique. Tout nœud ayant  $x=0$  est automatiquement fixé dans la direction  $x$ , et tout déplacement dans le plan  $x$ - $y$  provoque automatiquement une contrainte dans la direction circonférentielle. Les quatre

composantes de déformation et de contrainte impliquées dans une analyse axisymétrique sont montrées dans la Figure IV.3.

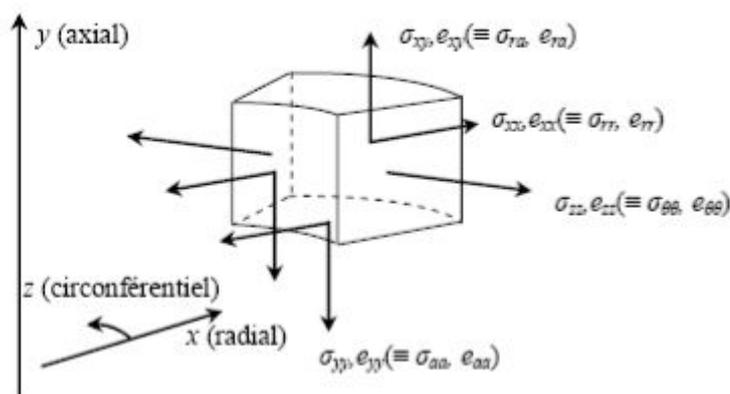


Figure IV.3. Déformations et contraintes pour l'analyse axisymétrique. Manuel Flac2D.

Le maillage axisymétrique peut contenir des interfaces. Cependant, une interface dans un modèle axisymétrique représente une surface en forme de *disque* si l'interface est parallèle à l'axe des  $x$ , une surface *cylindrique* si parallèle à l'axe des  $y$ , et une surface *conique* dans d'autre cas.

#### IV.5.1 Présentation des cas étudiés

On considère un écran étanche de forme circulaire d'une profondeur égale à  $f$  où  $f$  est la fiche de l'écran dans un sol homogène. L'épaisseur de la couche de sol est  $D$ ,  $B$  : le diamètre de la fouille circulaire,  $r = B/2$  : le rayon de la fouille circulaire. On considère que le milieu est *semi-infini* lorsque  $D/f \geq 6$ , et le milieu *fini* lorsque  $D/f < 6$ . Cet écran est soumis à une charge hydraulique  $H$  comme indiqué sur les figures IV.4 et IV.5.

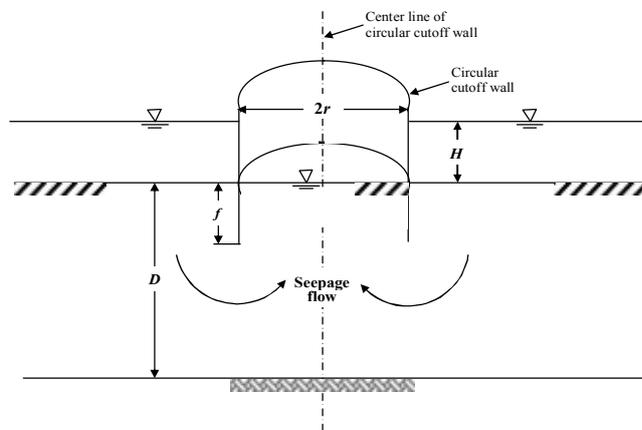


Figure IV.4. Ecran circulaire en conditions axisymétriques.

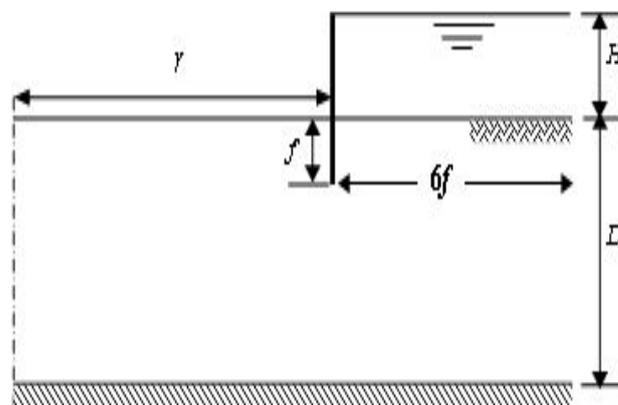


Figure IV.5. Cas d'un écran fiché dans une seule couche en milieu *semi-infini*. Cas axisymétrique

#### IV.5.2 Maillage et conditions aux limites

Les figures IV.6 et IV.7 montrent des exemples de maillage retenu pour la simulation numérique du batardeau circulaire en conditions axisymétriques respectivement pour le cas d'un milieu *semi-infini* et un milieu *fini*. Puisque deux milieux sont considérés, il est adopté pour chaque cas son propre maillage pour la simulation numérique de la perte de charge provoquant le renard, afin d'obtenir des résultats plus précis. Ce maillage est raffiné au voisinage de la paroi.

Afin de minimiser l'effet de l'extrémité droite ( $L'$  du côté amont) du modèle, cette limite est prise égale à 6 fois la fiche du batardeau  $L' = 6f$  et par conséquent, le nombre d'éléments change aussi tout en considérant toujours un maillage raffiné.

Dû à l'axisymétrie, l'analyse est exécutée dans le plan  $r-z$  où  $r$  et  $z$  sont les coordonnées radiales et verticales, respectivement. Pour les structures circulaires, le déplacement de l'écran est restreint dû à l'effet de ses propriétés structurales et ses supports intérieurs.

Les conditions aux limites mécaniques sont la nullité des déplacements verticaux et horizontaux à la base du maillage et le blocage du déplacement horizontal sur les frontières verticales.

Dans le 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, et puis on fixe la pression hydraulique à  $P = 0$  (où  $H_2 = 0$ , avec  $H_2$  la charge appliquée dans le coté aval).

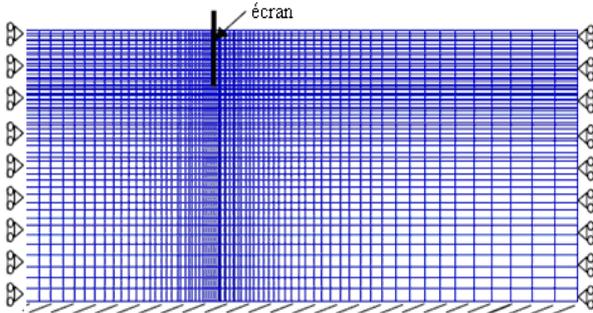


Figure IV.6. Maillage du milieu semi-infini.  
Cas circulaire axisymétrique.

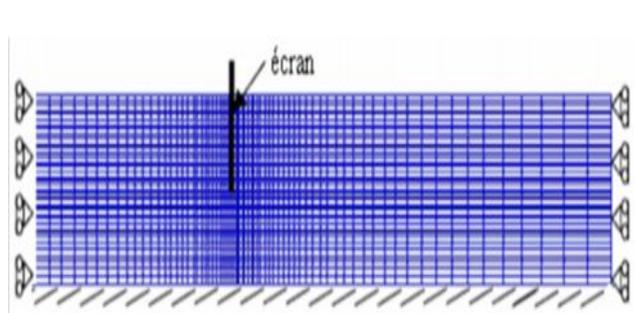


Figure IV.7. Maillage du milieu fini.  
Cas circulaire axisymétrique.

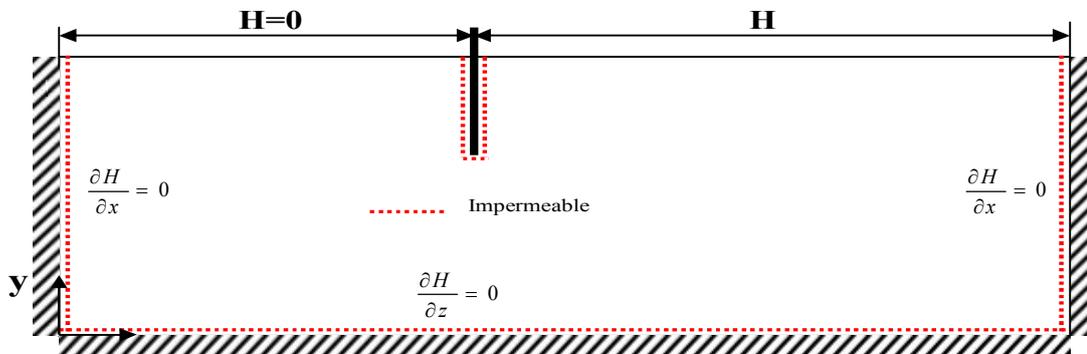


Figure IV.8. Conditions aux limites hydrauliques.

### IV.5.3 Modèle de comportement

Les observations expérimentales montrent que les sols ont un comportement *non associé* quantifié par l'angle de dilatance  $\psi$ . En conséquence, le modèle élastique parfaitement plastique non associé de Mohr-Coulomb inclus dans le code Flac est adopté.

Ce modèle est caractérisé par (les mêmes propriétés utilisées par Benmebarek, 2005):

- Un poids volumique  $\gamma_{sat}/\gamma_w=2$  donc la densité sèche du sol  $\gamma_d = 1700 \text{ kg/m}^3$  où  $\gamma_{sat} = \gamma_d + n s \gamma_w = 2000 \text{ kg/m}^3$ , une porosité de  $n = 0,3$ , la saturation  $s = 1$ .
- Un module volumique du sol  $K=30 \text{ MPa}$ , un module de cisaillement  $G = 11,25 \text{ MPa}$ , une cohésion *nulle*, un angle de frottement  $\varphi$  et un angle de dilatance  $\psi$ .

Pour les **propriétés hydrauliques** on prend :

- Une perméabilité du sol  $k_{Flac} = 10^{-10} \text{ m/s}$  donc la perméabilité réelle  $10^{-10} * \gamma_w = 10^{-6} \text{ m/s}$ .
- Pour le module volumique de l'eau  $K_f$ , il faut noter que la valeur physique pour l'eau pure en température de chambre est  $2 \text{ GPa}$ , et afin d'accélérer les calculs hydrauliques et mécaniques, on a choisi une petite valeur  $K_f = 10^4 \text{ Pa}$ .

Il faut noter que, le temps de calcul hydraulique  $\Delta t_f$  utilisé en Flac est relié à la porosité  $n$ , la perméabilité  $k_{Flac}$  et au module volumique de l'eau  $K_f$ :

$$\Delta t_f \propto \frac{n}{k_f k_{Flac}}$$

Il faut noter aussi que le coefficient de buté  $K_p$  pour un écoulement plan augmente avec  $\gamma_{sat}$ , la valeur de la perte de charge critique  $H/f$  qui provoque le renard augmente aussi. Ceci montre que le poids du sol a un effet favorable sur l'augmentation de la stabilité du massif de sol devant l'écran étanche.

Au début, de grandes valeurs initiales sont attribuées pour la *cohésion* et la *tension* du sol, on prend  $cohésion = 1^{10}$  Pa,  $tension = 1^{10}$  Pa. Ces grandeurs sont utilisées pour le développement des contraintes gravitationnelles dans le sol. En effet, le modèle est forcé à se comporter en élasticité à l'état initial. Cela permet d'éviter le développement d'aucune rupture plastique durant la phase initiale des analyses. Elle est utilisée en simulation explicite en Flac. Et durant les calculs hydraulique et mécanique on utilise une cohésion *nulle* et par conséquent la tension sera *nulle* puisque  $Ten = Coh/Tang \varphi$ , afin que la rupture plastique peut se développer.

#### IV.5.4 Modélisation de l'écran

Puisque dans un modèle *axisymétrique*, on ne peut pas utiliser les *éléments de structure*, la modélisation d'un écran circulaire et de son comportement en flexion est réalisée seulement avec des éléments *massifs*.

L'écran qui est considéré comme un matériau *élastique* est modélisé dans ces cas *axisymétriques* par des éléments *massifs* quadrilatères. L'écran se comporte donc comme un rideau imperméable, l'écoulement ne peut pas pénétrer à travers ces éléments, une perméabilité *nulle* est attribuée aux mailles constituant ce massif élastique.

Pour le cas de référence, il a été considéré un écran circulaire de densité du sol (élément massif)  $2500 \text{ kg/m}^3$ , avec épaisseur égale à  $0,05 \text{ m}$ ;  $0,237 \text{ GPa}$  et  $0,2$  pour le module d'élasticité de Young et le coefficient de Poisson, respectivement.

Cet écran est connecté au sol via des *éléments d'interface* de type Mohr-Coulomb attachés sur les deux côtés des éléments de massif. L'interface est caractérisée par une cohésion *nulle*, un angle de frottement  $\delta$  variable selon le cas, un angle de dilatation *nul*, une rigidité normale  $K_n = 10^9 \text{ Pa/m}$  et une rigidité de cisaillement  $K_s = 10^9 \text{ Pa/m}$ . Les valeurs de rigidité de l'interface sont choisies de manière à simuler un contact *rigide* entre le sol et l'écran.

#### IV.5.5 Détermination de la charge hydraulique critique provoquant le renard

On doit mentionner que l'évaluation des valeurs précises de la perte de charge hydraulique provoquant une rupture de sol par écoulement n'est pas facile à déterminer, cependant, seulement le critère de stabilité du fond de fouille est traité pour les différentes valeurs de la perte de charge hydraulique  $H/f$ .

##### IV.5.5.1 Cas d'un milieu homogène isotrope

###### IV.5.5.1.1 Cas d'un écran fiché dans une seule couche en milieu semi-infini

Dans ce cas, on considère que le milieu est *semi-infini*  $D/f = 6$  où  $D$  : épaisseur du sol,  $f$  : la fiche de l'écran,  $B$  : le diamètre de la fouille,  $r = B/2$  : le rayon de la fouille.

L'objectif de cette partie de l'étude est de chercher:

- la perte de charge hydraulique critique  $H/f$  à partir laquelle le phénomène de renard commence à apparaître pour le cas :  $\varphi$  ( $\varphi = 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ ),  $\delta/\varphi$  ( $\delta/\varphi = 0, 1/3, 2/3, 1$ ),  $\psi/\varphi$  ( $\psi/\varphi = 0, 1/2, 1$ );
- le rayon relatif à partir lequel l'effet de l'axisymétrie devient négligeable (cas de batardeaux larges) où le problème peut être étudié en déformation plane ;
- Etude de l'effet de la rigidité EI de l'écran sur les valeurs de  $H/f$ .

Ainsi, on vérifie si l'analyse numérique en différences finies peut décrire correctement les mécanismes de rupture dû à l'écoulement de l'eau ascendant observés aux fonds de fouille.

Une série d'analyse axisymétrique par Flac en différences finies a été exécutée pour le cas d'un batardeau circulaire en conditions axisymétriques. Ce code utilise un programme en différences finis explicites pour étudier numériquement la stabilité de fond de fouille du batardeau lorsqu'il atteint l'équilibre ou un écoulement plastique permanent.

Pour étudier l'effet du rayon relatif  $r/f$  du batardeau circulaire sur la perte de charge hydraulique critique, quatre (04) valeurs de  $r/f$  sont considérées ( $r/f = 1, 5, 6$  et  $9$ ) représentant une fouille étroite, intermédiaire et large, respectivement.

Les résultats de simulation numérique sont présentés dans le Tableau IV.2. Dans ce tableau, le terme « rupture » indique une rupture par soulèvement (représenté dans le tableau par une ou deux astérisques), ou par boullance (représenté dans le tableau par trois astérisques).

Tableau IV.2. Comparaison de présents résultats de perte de charge hydraulique critique  $H/f$  avec les solutions existantes. Milieu *semi-infini*.

		$H/f$ critique																			
		$\delta/\varphi$																			
$\varphi$	$\psi/\varphi$	0					1/3					2/3					1				
		$r/f=1$	$r/f=5$	$r/f=6$	$r/f=9$	B	$r/f=1$	$r/f=5$	$r/f=6$	$r/f=9$	B	$r/f=1$	$r/f=5$	$r/f=6$	$r/f=9$	B	$r/f=1$	$r/f=5$	$r/f=6$	$r/f=9$	B
20°	0	1.38*	2.10*	2.22*	2.60*	2.63*	1.41*	2.13*	2.25*	2.65*	2.67*	1.44*	2.17*	2.28*	2.68*	2.72*	1.47*	2.17*	2.30*	2.70*	2.73*
	1/2	1.39**	2.11**	2.23**	2.61**	2.64**	1.41**	2.13**	2.26**	2.66**	2.68**	1.45**	2.17**	2.29**	2.69**	2.73**	1.48**	2.17**	2.31**	2.71**	2.73**
	1	1.40**	2.11**	2.23**	2.61**	2.64**	1.41**	2.13**	2.26**	2.66**	2.68**	1.45**	2.17**	2.29**	2.69**	2.73**	1.48**	2.17**	2.31**	2.71**	2.73**
25°	0	1.43*	2.15*	2.25*	2.65*	2.68*	1.47*	2.19*	2.28*	2.74*	2.78*	1.50*	2.19*	2.31*	2.77*	2.81*	1.51*	2.23*	2.35*	2.81*	2.84*
	1/2	1.44**	2.16**	2.26**	2.66**	2.70**	1.48**	2.19**	2.30**	2.77**	2.82**	1.51**	2.21**	2.33**	2.79**	2.83**	1.52**	2.24**	2.37**	2.84**	2.87**
	1	1.46**	2.18**	2.28**	2.68**	2.71**	1.50**	2.20**	2.32**	2.80**	2.84**	1.52**	2.23**	2.35**	2.81**	2.84**	1.54**	2.25**	2.38**	2.87**	2.90**
30°	0	1.47*	2.19*	2.29*	2.71*	2.74*	1.58*	2.28*	2.34*	2.79*	2.84*	1.60*	2.28*	2.36*	2.84*	2.90*	1.61*	2.28*	2.38*	2.86*	2.90*
	1/2	1.52**	2.26**	2.33**	2.75**	2.79**	1.59**	2.29**	2.37**	2.83**	2.88**	1.62**	2.30**	2.40**	2.88**	2.92**	1.63**	2.30**	2.43**	2.90**	2.94**
	1	1.54**	2.27**	2.37**	2.79**	2.82**	1.60**	2.30**	2.44**	2.86**	2.91**	1.63**	2.31**	2.47**	2.90**	2.93**	1.64**	2.31**	2.50**	2.95**	2.98**
35°	0	1.51*	2.23*	2.33*	2.75*	2.77*	1.60*	2.30*	2.37*	2.86*	2.90*	1.63*	2.30*	2.40*	2.88*	2.92*	1.64*	2.31*	2.43*	2.90*	2.93*
	1/2	1.53**	2.26**	2.36**	2.78**	2.82**	1.61**	2.31**	2.39**	2.90**	2.94**	1.64**	2.33**	2.45**	2.93**	2.97**	1.66**	2.34**	2.50**	2.97**	3.03**
	1	1.55**	2.28**	2.42**	2.82**	2.84**	1.62**	2.32**	2.48**	2.93**	2.97**	1.65**	2.36**	2.51**	2.99**	3.04**	1.67**	2.37**	2.58**	3.02**	3.05**
40°	0	1.53*	2.25*	2.35*	2.82*	2.80*	1.60*	2.30*	2.41*	2.91*	2.93*	1.63*	2.32**	2.45*	2.95*	2.97*	1.65*	2.32*	2.47*	2.97*	2.99*
	1/2	1.56**	2.28**	2.38**	2.88**	2.90**	1.62**	2.33**	2.46**	2.95**	2.98**	1.65**	2.35**	2.51**	3.03**	3.12**	1.68**	2.38**	2.55**	3.07**	3.13**
	1	1.59**	2.30**	2.50**	2.92**	2.93**	1.64**	2.35**	2.55**	3.01**	3.03**	1.67**	2.37**	2.59**	3.06**	3.16**	1.69**	2.40**	2.62**	3.10**	3.16**
$H/f(2D)$																					
Soubra		2.78																			
Terzaghi		Soulèvement: 2.82																			
		Boullance: 3.14																			

B : d'après Benmebarek *et al*, (2005). S : d'après Soubra *et al*, (1999). Terzaghi : d'après Terzagui , 1943.

\* soulèvement (prisme rectangulaire) ; \*\* soulèvement (prisme triangulaire) ; \*\*\* boullance

Dans ce cas, pour les batardeaux larges en milieu semi-infini, les présents résultats numériques *axisymétriques* sont comparés aux résultats du cas plan obtenus par : Benmebarek *et al.*, 2005 ; Soubra *et al.*, 1992 ; 1999 et Terzaghi, 1943.

- Ce tableau montre clairement l'influence du rayon  $r/f$  du batardeau sur la perte de charge hydraulique critique  $H/f$  provoquant la rupture du sol. Cette perte de charge augmente avec l'augmentation de  $r/f$ .

Lorsque le rayon relatif atteint la valeur de  $r/f = 9$ , l'effet *axisymétrique* s'annule, et les valeurs de  $H/f$  convergent vers les valeurs en déformation plane.

- Ces résultats indiquent clairement que la stabilité de fond de fouille à la rupture due à l'écoulement est toujours correspond à un soulèvement sauf dans le cas d'un sable dense :  $\varphi \geq 35^\circ$ , un sol dilatant  $\psi/\varphi > 1/2$  et l'angle de frottement de l'interface de sol/écran  $\delta/\varphi > 1/3$  où la boullance se produirait.

Par exemple, pour  $\varphi = 40^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 1$  et  $\delta/\varphi$  varie de 0 à 1, la valeur critique de  $H/f$  se trouve dans la gamme de **2.92–3.10**. La boullance apparaît pour le cas  $\delta/\varphi = 1$  pour une valeur critique  $H/f = 3,10$ , alors que pour le même cas *plan*, Benmebarek *et al*, 2005, utilisant une approche numérique ont obtenu la valeur critique de  $H/f$  qui se trouve dans la gamme de **2.93–3.16**. Pour le cas de batardeaux larges, ces valeurs sont plus proches à la valeur de la perte de charge hydraulique critique théorique  $H/f = 3.14$  proposée par Terzaghi, 1943.

Cependant, lorsque  $r/f = 6$  (même cas en déformations planes traité par Benmebarek *et al*, 2005) pour  $\varphi = 40^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 1$  et  $\delta/\varphi$  varie de 0 à 1, la valeur critique de  $H/f$  se trouvent dans la gamme de

**2,50-2,62.** La boullance apparaît lorsque  $\delta/\varphi = 2/3$  pour une valeur critique de  $H/f = 2,59$ . Dans ce cas de fouilles étroites, ces valeurs sont petites comparées aux résultats en déformations planes susmentionnés. Donc, les méthodes en déformations planes peuvent largement surestimer la perte de charge hydraulique critique, si elles sont appliquées sans prise en compte de la forme de l'excavation pour les cas où  $r/f < 9$ .

En plus, comme le rayon relatif de l'écran devient plus étroit,  $H/f$  continue à diminuer.

Dans ce cas de boullance, le gradient hydraulique de sortie atteint la valeur du gradient hydraulique critique. La Figure IV.9 montre le mécanisme de rupture indiqué par le champ de déplacement et la distribution des déformations maximales de cisaillement correspondante obtenu pour le cas  $\varphi = 40^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 1$  et  $\delta/\varphi = 1$ ,  $H/f = 2,62$  et  $r/f = 6$  où le phénomène de *boullance* est indiqué.

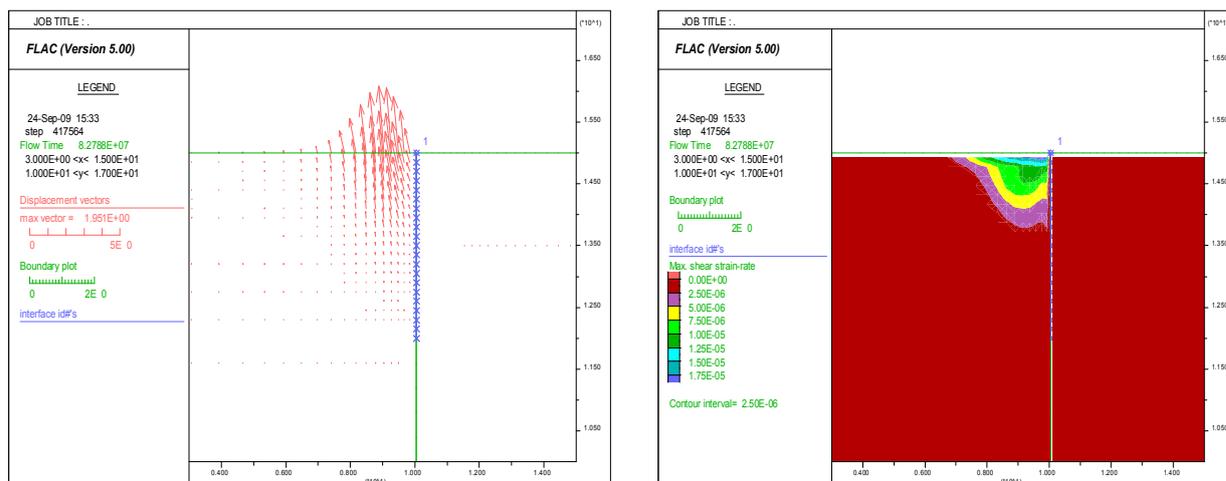


Figure IV.9. Mécanisme de rupture axisymétrique - phénomène de boullance - pour  $\varphi=40^\circ$ ,  $\psi/\varphi=1$ ,  $\delta/\varphi = 1$ ,  $H/f = 2,62$  et  $r/f=6$  indiqué par: Champ de déplacements et distribution des déformations maximales de cisaillement correspondante.

- En revanche, du Tableau IV.2, pour  $r/f = 9$  ( $\delta/\varphi = 0$ ,  $\psi/\varphi = 1$  et  $\varphi$  varie de  $20^\circ$  à  $40^\circ$ ), la valeur critique de  $H/f$  se trouve dans la gamme de **2,61–2,92**. On note que pour le même cas *plan*, Benmebarek *et al*, 2005 ont obtenu une valeur critique de  $H/f$  qui se trouve dans la gamme de **2,64–2,93**, et pour les différentes valeurs de  $\varphi$ , la solution de Terzaghi, 1943 est  $H/f = 2,82$ , alors que celle de Soubra *et al*, 1999 est  $H/f = 2,78$ . Donc, ces présentes valeurs de  $H/f$  sont en accord et proches aux résultats en écoulement plan

Néanmoins, pour le cas où  $r/f = 6$  ( $\delta/\varphi = 0$ ,  $\psi/\varphi = 1$  et  $\varphi$  varie de  $20^\circ$  to  $40^\circ$ ), la valeur critique de  $H/f$  se trouvent dans la gamme de **2,23-2,50**. Ces valeurs sont petites comparées aux résultats en déformations planes présentés ci-dessus. Aussi, comme le rayon relatif de batardeau circulaire devient plus étroit,  $H/f$  continue à diminuer.

- Pour  $\psi/\varphi = 0$  (sol non dilatant), on obtient le soulèvement d'un prisme *rectangulaire* similaire à celui obtenu par Benmebarek *et al*, 2005 ; Kastner, 1982, et celui proposé par Terzaghi, 1943 pour le cas d'un écoulement plan.

- La Figure IV.10 présente le mécanisme de rupture pour le cas  $\varphi = 20^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$  ;  $H/f = 2,28$  et  $r/f = 6$  où un soulèvement d'un prisme *rectangulaire* d'une largeur *inférieure* que celui observé par Terzaghi, 1943 ( $f/2$ ) et similaire à celui obtenu par Benmebarek *et al*, 2005 pour le cas plan. Cette figure montre respectivement le champ de déplacements et la distribution du rapport des déformations de cisaillement maximales à la rupture du prisme *rectangulaire*.

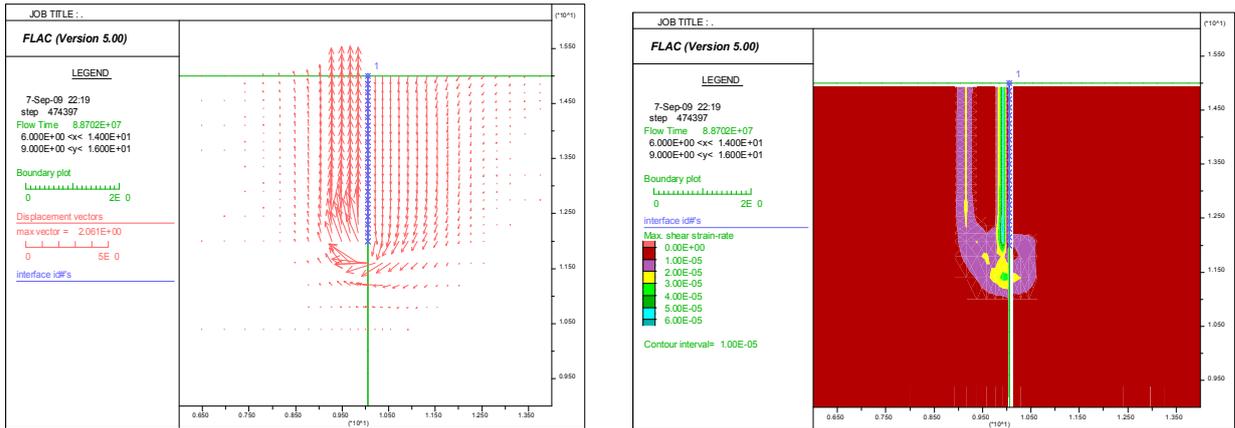


Figure IV.10. Mécanisme de rupture axisymétrique - soulèvement d'un prisme rectangulaire – pour  $\varphi = 20^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$ ,  $\delta/\varphi = 2/3$ ,  $H/f = 2,28$  et  $r/f = 6$  indiqué par: Champ de déplacements et distribution des déformations maximales de cisaillement

- Cependant, pour un sol dilatant  $\psi/\varphi \geq 1/2$ , un prisme *triangulaire* du sol est obtenu, et ce dernier est similaire à celui proposé par Kastner, 1982 et à celui obtenu par Benmebarek *et al*, 2005 pour le cas en écoulement plan. Par exemple, la Figure IV.11 présente le cas de  $\varphi = 20^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 1$  et  $\delta/\varphi = 2/3$ ,  $H/f = 2,29$  où un soulèvement d'un prisme *triangulaire* est observé.

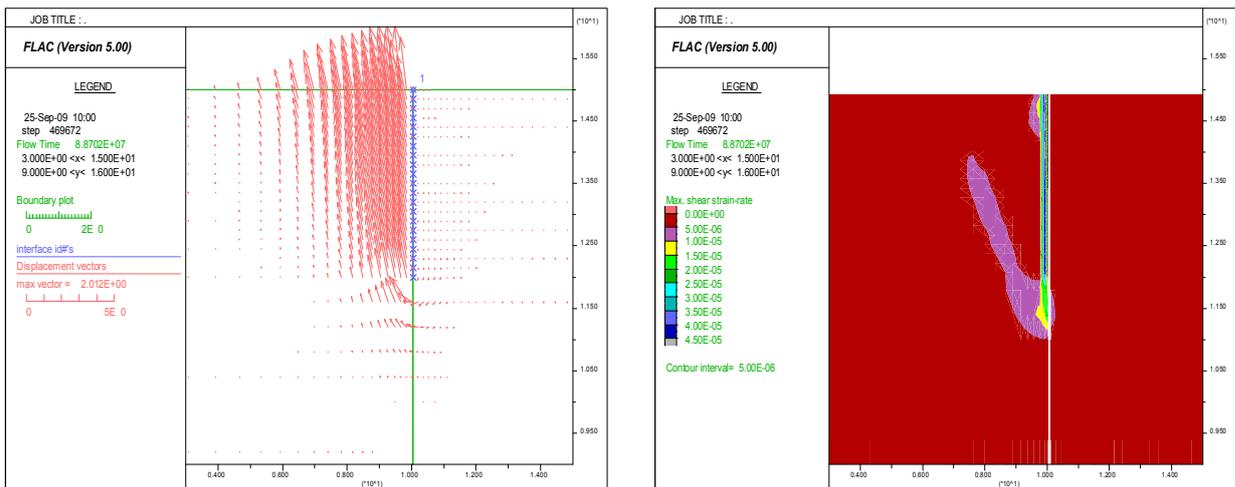


Figure IV.11. Mécanisme de rupture axisymétrique - soulèvement d'un prisme triangulaire – pour  $\varphi = 20^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 1$ ,  $\delta/\varphi = 2/3$ ,  $H/f = 2,29$  et  $r/f = 6$  indiqué par: Champ de déplacements et distribution des déformations maximales de cisaillement correspondante.

- La présente procédure de simulation montre que  $H/f$  causant la rupture de sol par écoulement d'eau dépend l'angle de frottement interne du sol, et l'angle de *dilatance*  $\psi$  du sol a une influence considérable sur la forme du mécanisme de rupture.

En plus, contrairement aux constatations de Soubra *et al*, 1992 ; 1999, ces présents résultats montrent que la perte de charge hydraulique critique  $H/f$  causant la rupture de sol par écoulement d'eau, dépend de l'angle de frottement de l'interface  $\delta$  du sol/écran. Ces résultats confirment ceux obtenus par Tanaka (1999, 2002, 2006), Khan *et al* 2001 et Benmebarek *et al*, 2005.

Ce comportement peut être expliqué comme suit: lorsque le sol adjacent à l'écran s'étend par une dilatation pendant la rupture, les forces de cisaillement induisant sur les faces verticales du prisme, interceptent le soulèvement du prisme *rectangulaire*. Par conséquent, un prisme triangulaire de rupture s'obtient au lieu d'un prisme rectangulaire. Ceci correspond à un mécanisme cinématiquement admissible dans le cadre de la théorie de l'analyse limite. Ce phénomène a été observé expérimentalement par Kastner, 1982.

Pour les grandes valeurs de  $\varphi$  et  $\psi$ , les forces de cisaillement sur la fiche de l'écran et l'expansion horizontale du sol par dilatation interceptent la rupture du prisme *triangulaire*. Par conséquent, la

surface du gradient de sortie devient critique avant un soulèvement du prisme *triangulaire*, et donc, il commence le phénomène de la boullance. Ce cas peut se produire aussi pour un écran flexible supporté partiellement par le sol. Intercepte

### **Influence des propriétés de l'écran**

Les écrans de soutènement peuvent être constitués avec une grande variété de matériaux. Depuis un écran flexible (palplanche) jusqu'à un écran de soutènement rigide (paroi moulée). À cette diversité d'écrans de soutènement est associée, évidemment, une grande gamme de valeurs de rigidité de l'écran. Notons que la méthode de Terzaghi, 1943 a été développée avant l'introduction de systèmes d'écrans rigides, et d'autres auteurs cités dans la première partie de ce chapitre utilisaient dans leur analyse les écrans de soutènement avec petite épaisseur. D'où, la perte de charge hydraulique critique causant la rupture est déterminée par ces auteurs sans prise en compte de la rigidité de l'écran. Pour les batardeaux circulaires, la rigidité peut avoir une influence plus considérable sur la stabilité de fond de fouille.

On note que dans cette partie, la rigidité de l'écran en analyse bidimensionnelle est assumée pour être identique à celle des écrans circulaires.

### **Effet de la rigidité en flexion de l'écran**

Pour évaluer l'effet de la rigidité en flexion de l'écran sur la perte de charge hydraulique critique à la rupture, des analyses numériques supplémentaires ont été menées. En premier lieu, pour isoler l'effet de la rigidité en flexion de l'écran EI, toutes les analyses ont été exécutées considérant un batardeau circulaire avec une épaisseur égal à 0,05 m. Cinq valeurs de EI ont été considérées: 0,39 kNm<sup>2</sup> ; 2,47 kNm<sup>2</sup> (cas de référence) ; 15,63 kNm<sup>2</sup> ; 104,2 kNm<sup>2</sup> et 3937,5 kNm<sup>2</sup>. Ces valeurs ont été achevées avec un module d'élasticité de Young de 0,038 GPa ; 0,237 GPa ; 1,5 GPa ; 10 GPa et 378 GPa, respectivement.

Les résultats obtenus sont les mêmes que ceux représentés dans le **Tableau IV.2**. Les résultats calculés montrent que pour une même épaisseur de l'écran ( $t_l = 0,05$  m), la rigidité de l'écran n'a aucune influence sur la perte de charge hydraulique critique à la rupture. Lorsque la rigidité de l'écran augmente, la perte de charge hydraulique critique n'augmente pas.

Ainsi, l'influence de la rigidité de l'écran pour sa même épaisseur sur la perte de charge hydraulique critique à la rupture n'est pas significative.

### **Effet de la géométrie de l'écran circulaire pour des rigidités en flexion différentes**

Puisque les analyses présentées dans le dernier point montrent que pour une même épaisseur de l'écran  $t_l = 0,05$  m (cas de référence), la rigidité de l'écran (avec différent module d'élasticité de Young  $E$ ) n'a aucune influence sur la perte de charge hydraulique critique, d'autres analyses numériques supplémentaires ont été exécutées pour étudier l'influence de l'épaisseur de l'écran.

Puisque la rigidité du batardeau circulaire avec une épaisseur  $t_l = 0,05$  ( $t/t_l = 1$ ) est petite, la perte de charge hydraulique critique est relativement petite.

Utilisons une analyse numérique exécutée avec prise en compte de différentes rigidités de l'écran, la différence entre les résultats de l'écran avec une grande et petite rigidité peut être clairement notifiée. Pour les cas similaires, l'effet de la rigidité de l'écran sur la perte de charge hydraulique critique causant la rupture de sol a été apprécié en variant la rigidité de l'écran : EI = 2,47 ; 66,7 ; 2468,8 ; 30037,3 et 66656,3 kNm<sup>2</sup>, qui correspondent à une variation d'épaisseur de l'écran :  $t/t_l = 1, 3, 10, 23$  et 30, respectivement. Avec,  $t_l = 0,05$  m (épaisseur de l'écran du cas de référence) et  $t$  épaisseur variée de l'écran.

Les tableaux **IV.3** à **IV.6** présentent l'influence de la rigidité de l'écran EI, pour différentes épaisseurs d'écran  $t/t_l$  sur la perte de charge hydraulique critique qui cause la rupture de sol par écoulement d'eau.

Tableau IV.3. Cas d'un batardeau circulaire:  
 $EI = 66,7 \text{ kNm}^2$ ,  $t/t_1 = 3$ .

$\varphi$ $\psi/\varphi$		$H/f$ Critique					
		$\delta/\varphi$					
		0		1/3		1	
		$r/f=6$	$r/f=9$	$r/f=6$	$r/f=9$	$r/f=6$	$r/f=9$
20°	0	2.27*	2.65*	2.30*	2.68*	2.35*	2.73*
	1	2.28**	2.66**	2.30**	2.69**	2.35**	2.73**
30°	0	2.40*	2.85*	2.44*	2.89*	2.49*	2.96*
	1	2.50**	2.95**	2.55**	3.05**	2.60**	3.10**
40°	0	2.55*	2.94*	2.59*	2.99*	2.62*	3.07*
	1	2.60**	3.05**	2.64**	3.10**	2.70***	3.15***

Tableau IV.5. Cas d'un batardeau circulaire:  
 $EI=30037.3 \text{ kNm}^2$ ,  $t/t_1=23$ .

$\varphi$ $\psi/\varphi$		$H/f$ Critique					
		$\delta/\varphi$					
		0		1/3		1	
		$r/f=6$	$r/f=9$	$r/f=6$	$r/f=9$	$r/f=6$	$r/f=9$
20°	0	2.75*	3.20*	2.77*	3.24*	2.80*	3.30*
	1	2.76**	3.21**	2.78**	3.25**	2.80**	3.32**
30°	0	2.82*	3.41*	2.86*	3.45*	2.92*	3.49*
	1	2.91**	3.50**	2.95**	3.55**	2.97**	3.59**
40°	0	2.90*	3.50*	2.93*	3.54*	2.99*	3.60*
	1	3.00**	3.60**	3.04**	3.64**	3.10***	3.70***

Tableau IV.4. Cas d'un batardeau circulaire:  
 $EI=2468.8 \text{ kNm}^2$ ,  $t/t_1=10$ .

$\varphi$ $\psi/\varphi$		$H/f$ Critique					
		$\delta/\varphi$					
		0		1/3		1	
		$r/f=6$	$r/f=9$	$r/f=6$	$r/f=9$	$r/f=6$	$r/f=9$
20°	0	2.50*	2.85*	2.54*	2.89*	2.60*	2.95*
	1	2.51**	2.86**	2.54**	2.90**	2.60**	2.95**
30°	0	2.57*	3.05*	2.61*	3.09*	2.67*	3.15*
	1	2.66**	3.15**	2.70**	3.20**	2.77**	3.25**
40°	0	2.70*	3.15*	2.74*	3.19*	2.80*	3.25*
	1	2.80**	3.25**	2.83**	3.29**	2.90***	3.35***

Tableau IV.6. Cas d'un batardeau circulaire:  
 $EI=66656.3 \text{ kNm}^2$ ,  $t/t_1=30$ .

$\varphi$ $\psi/\varphi$		$H/f$ Critique					
		$\delta/\varphi$					
		0		1/3		1	
		$r/f=6$	$r/f=9$	$r/f=6$	$r/f=9$	$r/f=6$	$r/f=9$
20°	0	2.85*	3.35*	2.88*	3.39*	2.92*	3.45*
	1	2.86**	3.36**	2.89**	3.40**	2.93**	3.46**
30°	0	2.95*	3.57*	2.99*	3.61*	3.00*	3.67*
	1	2.99**	3.65**	3.04**	3.69**	3.08**	3.75**
40°	0	3.00*	3.64*	3.04*	3.69*	3.10*	3.74*
	1	3.10**	3.75**	3.14**	3.79**	3.20***	3.85***

Dans ces tableaux, les résultats obtenus montrent que plus que la rigidité de l'écran devient grande (grande épaisseur), plus que la perte de charge hydraulique critique  $H/f$  augmente. Ainsi, l'influence de la rigidité de l'écran est plus significative lorsque l'épaisseur de l'écran est distincte. La raison réside évidemment dans le fait que l'augmentation de l'épaisseur de l'écran provoque une perte de charge hydraulique supplémentaire. Par conséquent, l'influence de l'épaisseur de l'écran sur la perte de charge hydraulique critique causant la rupture de sol par écoulement est très considérable.

#### IV.5.5.1.2 Cas d'un écran circulaire fiché dans une seule couche en milieu fini

Dans ce cas, on considère un milieu fini  $D/f = 2$  où  $D$  : épaisseur du sol,  $f$  : la fiche de l'écran,  $B$  : le diamètre de la fouille,  $r = B/2$  : le rayon de la fouille.

Les paramètres utilisés dans ce modèle sont les mêmes utilisés pour le cas précédent (cas d'un milieu semi-infini).

De la même façon que le cas précédent, on cherche pour la même profondeur relative  $D/f = 2$  la perte de charge hydraulique critique à partir laquelle le phénomène de renard commence à apparaître,  $H/f$  pour  $\varphi$  ( $\varphi = 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ ),  $\delta/\varphi$  ( $\delta/\varphi = 0, 1/3, 2/3, 1$ ),  $\psi/\varphi$  ( $\psi/\varphi = 0, 1/2, 1$ ) et pour  $D/f = 2$ .

**Etape 1 :** Un état de contraintes géostatiques est établi en fonction du poids volumique du sol tout en gardant le domaine élastique ;

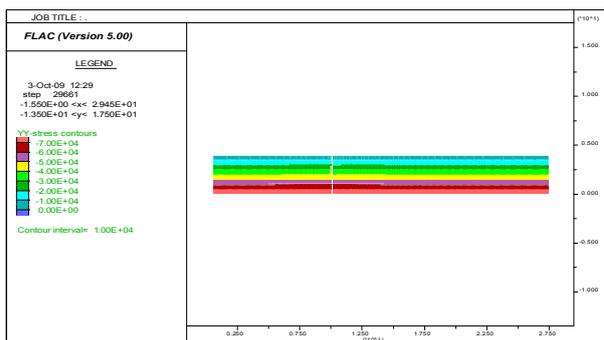


Figure IV.12. Champ de contraintes totales verticales SYY pour l'état initial saturé. Fonction 'ININV.FIS', pour  $\varphi=30^\circ$ ,  $\psi/\varphi=1$  et  $\delta/\varphi=0$ .

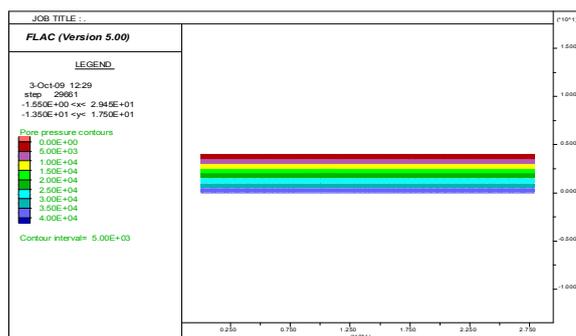


Figure IV.13. Distribution des pressions interstitielles PP pour l'état initial saturé. Fonction 'ININV.FIS', pour  $\varphi=30^\circ$ ,  $\psi/\varphi=1$  et  $\delta/\varphi=0$ .

**Etape 2 :** On impose une perte de charge hydraulique  $H/f$  et on simule la distribution des pressions interstitielles. Contrôle de la convergence des calculs hydrauliques :

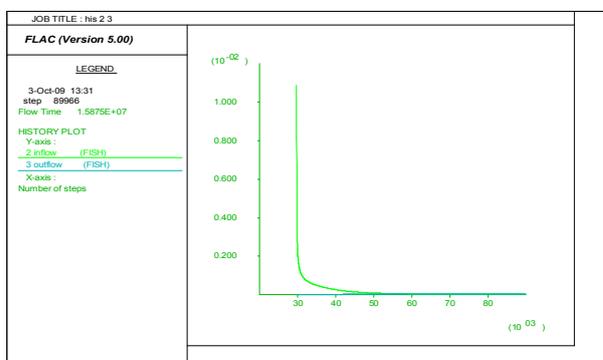


Figure IV.14. Historique de débit entrant et sortant. inflow and outflow history

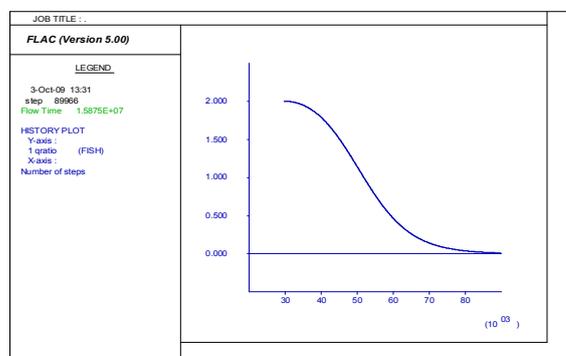


Figure IV.15. Historique de gratio. gratio history

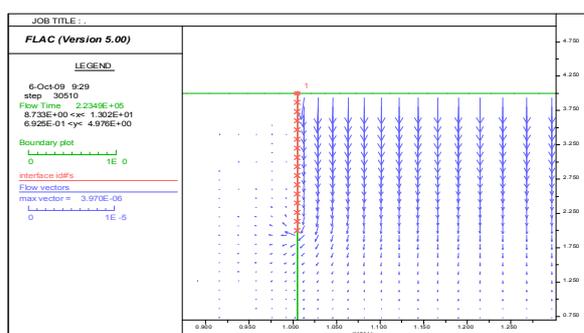


Figure IV.16. Vecteurs d'écoulement à l'état d'écoulement transitoire (non permanent).

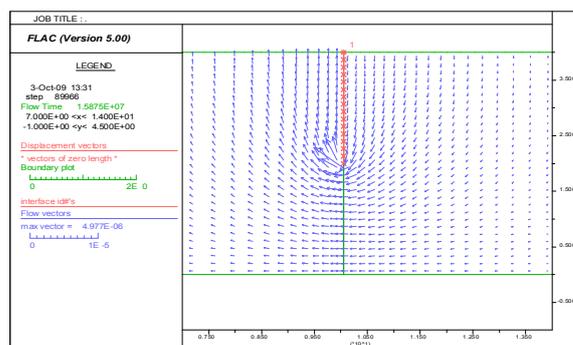


Figure IV.17. Vecteurs d'écoulement à l'état d'écoulement permanent.  $H/f=2,90$ .

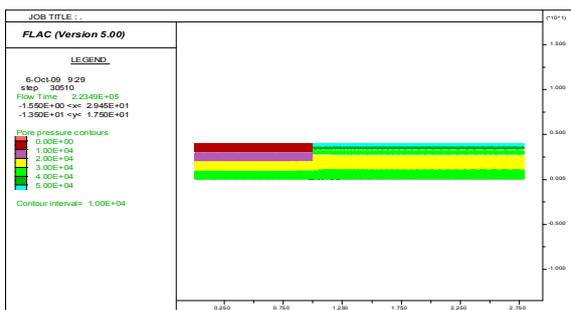


Figure IV.18. Champ de pressions interstitielles à l'état d'écoulement transitoire (non permanent).

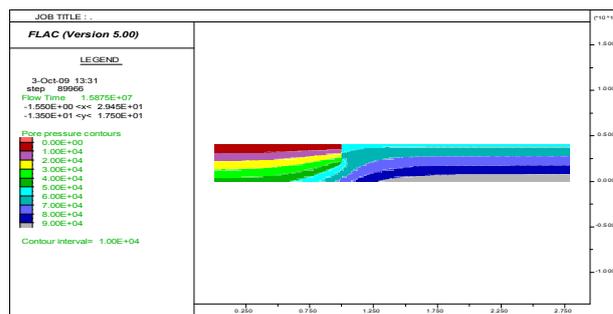


Figure IV.19. Champ de pressions interstitielles à l'état d'écoulement permanent.  $H/f=2,90$ .

**Étape 3 :** On fixe le régime d'écoulement et on lance un calcul mécanique sous l'effet des pressions interstitielles développées au cours de l'étape précédente dans le domaine élasto-plastique. On répète les étapes 2 et 3 jusqu'à l'apparition du phénomène de renard en augmentant la perte de charge hydraulique progressivement  $H/f$ . Contrôle de la convergence des calculs mécaniques:

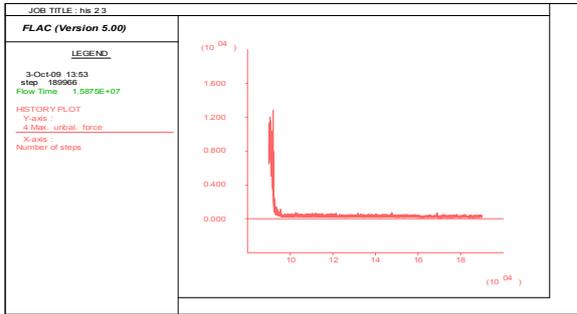


Figure IV.20. Historique de la force non équilibrée maximale.

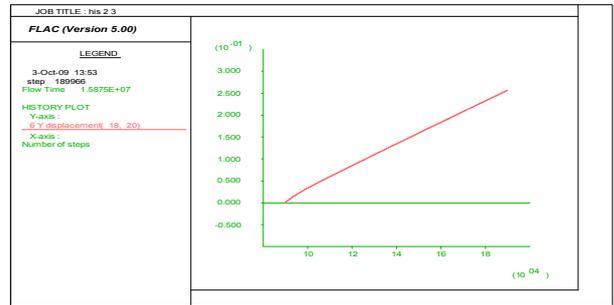


Figure IV.21. Historique des déplacements  $y$  du nœud  $i=18, j=20$  (point situé à l'aval).

Contrôle de la stabilité et l'instabilité (état de rupture) des calculs mécaniques:

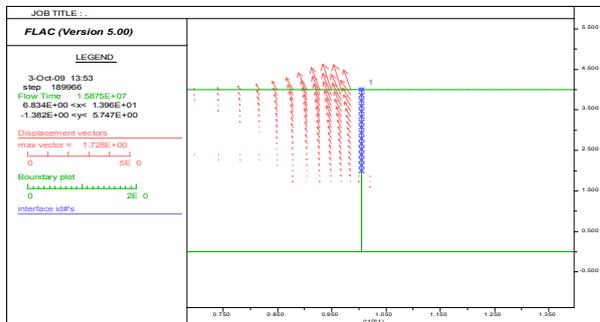


Figure IV.22. Champ des vecteurs de déplacements.

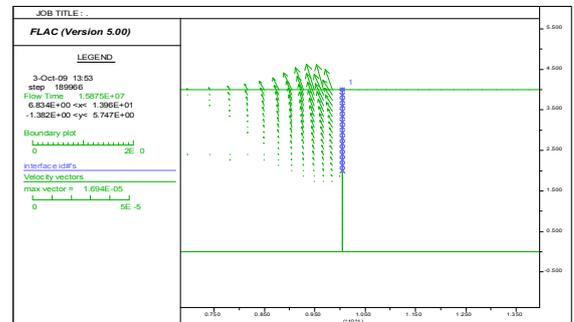


Figure IV.23. Champ des vecteurs de vitesses.

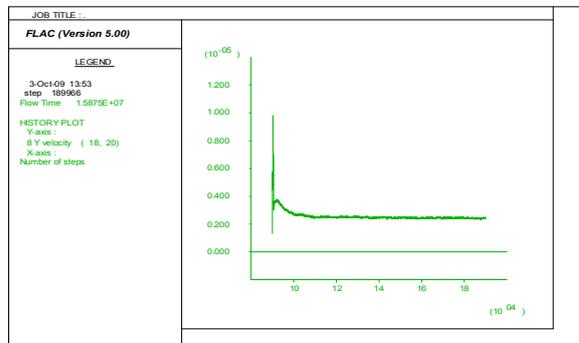


Figure IV.24. Historique des vecteurs de vitesses.

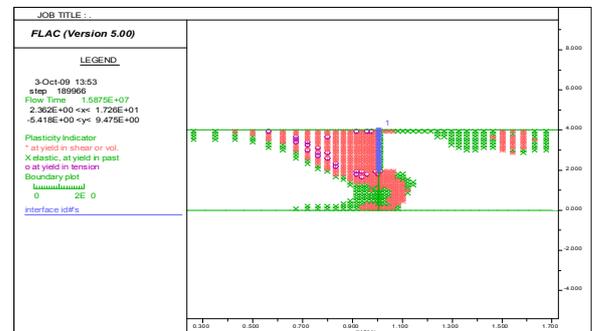


Figure IV.25. Points plastiques dans le modèle pour  $H/f = 2,90$ .

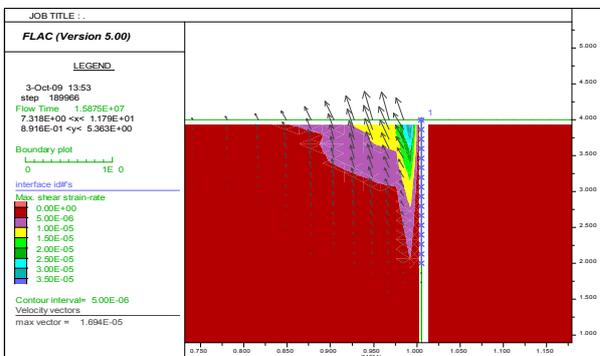


Figure IV.26. Tracé de la Surface de rupture pour  $\varphi = 30^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 1$  et  $\delta/\varphi = 0$ ,  $H/f = 2,90$ . ; surface de rupture définie par champ de déformation de cisaillement et vecteurs de vitesse.

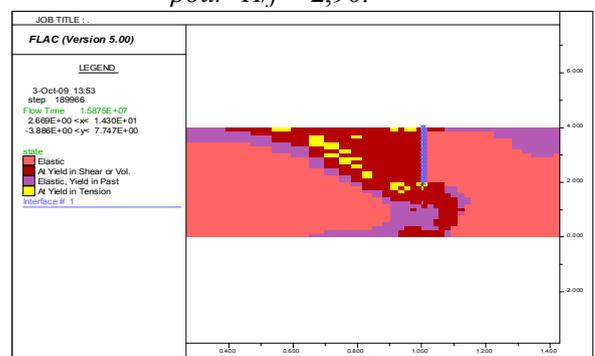


Figure IV.27. Etat du modèle :  
1- zones en rupture de cisaillement  
2- zones en rupture au passé ;  
3- zones en rupture de tension.

Tableau IV.7. Perte de charge hydraulique critique  $H/f$  pour différents paramètres  $\varphi$ ,  $\psi/\varphi$  et  $\delta/\varphi$ .  
Batardeau circulaire en milieu fini.  $D/f = 2$ .  $r/f = 6$ .

		$H/f$ Critique			
		$\delta/\varphi$			
		0	1/3	2/3	1
$\varphi$	$\psi/\varphi$				
20°	0	2.45*	2.56*	2.56*	2.57*
	1/2	2.50**	2.57**	2.57**	2.57**
	1	2.55**	2.57**	2.57**	2.57**
25°	0	2.70*	2.73*	2.73*	2.74*
	1/2	2.71**	2.74**	2.74**	2.75**
	1	2.72**	2.74**	2.75**	2.76**
30°	0	2.75*	2.78*	2.79*	2.80*
	1/2	2.80**	2.92**	2.93**	2.94**
	1	2.90**	2.93**	2.94**	2.95**
35°	0	2.80*	2.82*	2.83*	2.84*
	1/2	2.85**	2.93**	2.94**	2.95**
	1	2.92**	2.94**	2.96**	2.97**
40°	0	2.81*	2.83*	2.84*	2.86*
	1/2	2.88**	2.94**	2.96**	2.97**
	1	2.94**	2.96**	2.98***	2.99***

\* soulèvement (prisme rectangulaire) ; \*\* soulèvement (prisme triangulaire) ; \*\*\* boullance

• Pour ce cas du milieu fini et  $r/f = 6$ , on constate que la boullance apparaît à partir d'une perte de charge hydraulique critique  $H/f = 2,98$ . Cette valeur est plus grande que celle du cas précédent (milieu *semi-infini*  $H/f = 2,59$ ). Dans ce cas, le gradient hydraulique de sortie atteint la valeur du gradient hydraulique critique.

Les résultats numériques obtenus, montrent que la perte de charge hydraulique critique  $H/f$  provoquant le renard est *supérieure* à celle du cas précédent (milieu *semi-infini*), donc  $H/f$  augmente avec la diminution de la profondeur  $D/f$ . La profondeur relative minimum  $D/f$  nécessaire pour obtenir les résultats du cas semi-infini doit être supérieure ou égale à 6. Il est considéré dans ce cas de milieu fini une valeur de  $D/f = 2$ .

• Du même que le cas précédent, l'angle de frottement de l'interface sol/ écran  $\delta$  a une influence *remarquable* sur la valeur de perte de charge  $H/f$  qui provoque le renard.

• Pour  $\psi/\varphi = 0$  (sol non dilatant), on obtient le soulèvement d'un prisme *rectangulaire* similaire à celui obtenu pour le cas précédent (*semi-infini*).

• Du même, pour un sol dilatant  $\psi/\varphi \geq 1/2$ , un prisme *triangulaire* du sol est obtenu, et ce dernier est similaire à celui obtenu pour le cas précédent (*semi-infini*).

• Egalement, la présente procédure de simulation montre que l'angle de dilatance du sol a une influence considérable sur la forme du mécanisme de rupture.

• Du Tableau IV.7, pour  $\delta/\varphi = 0$ ,  $\psi/\varphi = 1$  et  $\varphi$  varie de 20° à 40°, la valeur critique de  $H/f$  se trouve dans la gamme de 2,55–2,94. Donc, ces valeurs de perte de charge hydraulique critique sont *supérieures* que le cas précédent (*semi-infini*).

Aussi, pour  $\varphi = 40^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 1$  et  $\delta/\varphi$  varie de 0 à 1, la valeur critique de  $H/f$  se trouve dans la gamme de 2,94–2,99 qui sont aussi *supérieures* que le cas d'un milieu semi-infini.

#### IV.5.5.2 Cas de d'un écran fiché dans une seule couche en milieu homogène anisotrope

Dans la discussion ci-dessus, la perméabilité en Flac est assumée pour être *isotrope*. En réalité, la perméabilité est une quantité du tenseur, avec deux principales valeurs et deux principales

directions, en 2D. Si seulement la commande *perm* est donnée avec *PROPERTY*, alors la perméabilité sera donc *isotrope*. Pour spécifier une perméabilité *anisotrope*, les composantes *kij* devraient être donnés : *k11*, *k22* et *k12* qui correspondent respectivement aux composantes *kxx*, *kyy* et *kxy*. Pour obtenir ces composantes des principales valeurs données et angles, les mêmes formules utilisées pour la transformation des *contraintes* peuvent être utilisées (ou une construction graphique, telle que le cercle de Mohr).

S'il y a une variation de perméabilité à travers le maillage, les pas de temps seront dominés par la plus grande perméabilité. Pour les problèmes dans lesquels l'état permanent (mais pas un comportement transitoire) est nécessaire, il peut être utile de limiter les variations dans la perméabilité pour améliorer la rapidité de convergence. Par exemple, il y aura probablement une petite différence dans le dernier état entre les systèmes où il y'a une 20:1 variation dans la perméabilité, comparé à une 200:1 variation, lorsque les variations de la perméabilité en série avec la direction de l'écoulement. Le schéma *d'échelle du module volumique de fluide (fluid bulk modulus scaling) (SET fastwb)* est recommandé pour ces types de problèmes. Les inclusions imperméables (*écran étanche, paroi moulée, palplanche,...*) peuvent être modélisées avec Flac en attribuant une perméabilité *nulle* aux zones dans la partie d'intérêt.

#### IV.5.5.2.1 Milieu fini

Dans ce cas, on considère le cas d'un milieu *fini*  $D/f = 2$ . On prend :  $r = B/2 = 10$  m, (similaire au cas de Soubra, 1999).

Les paramètres utilisés dans le modèle sont :

Les paramètres du sol sont les mêmes que le cas précédent.

Le rapport de perméabilité  $K_h/K_v = 50$ , on prend  $k22 = kyy = K_v = 10^{-10}$  m/s, donc  $k11 = kxx = K_h = 50 * K_v = 50 * 10^{-10}$  m/s. De la même façon que le cas précédent, on cherche la perte de charge hydraulique critique à partir laquelle le phénomène de renard commence à apparaître,  $H/f$  pour  $\varphi$  ( $\varphi = 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ ),  $\delta/\varphi$  ( $\delta/\varphi = 0, 1/3, 2/3, 1$ ),  $\psi/\varphi$  ( $\psi/\varphi = 0, 1/2, 1$ ) et pour  $D/f = 2$  lorsque le rapport de perméabilité  $K_h/K_v = 50$ . Contrôle de la convergence des calculs hydrauliques :

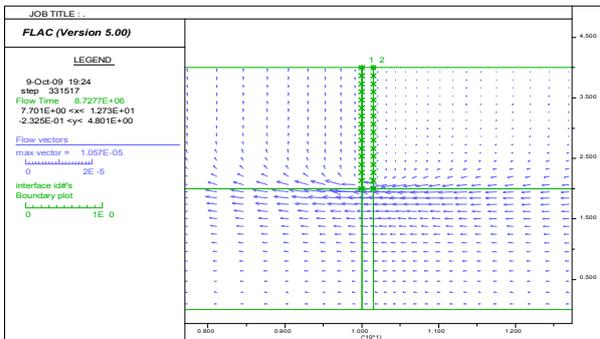


Figure IV.28. Vecteurs écoulement à l'état d'écoulement permanent.  $H/f=2, 90$ ; pour  $\varphi = 20^\circ, \psi/\varphi = 1$  et  $\delta/\varphi = 0$ .

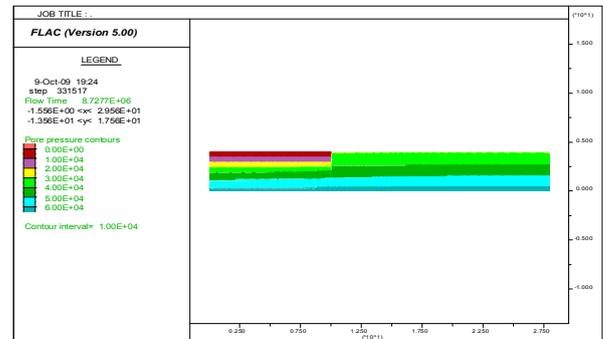


Figure IV.29. Champ de pressions interstitielles à l'état d'écoulement permanent.  $H/f=2,90$ .

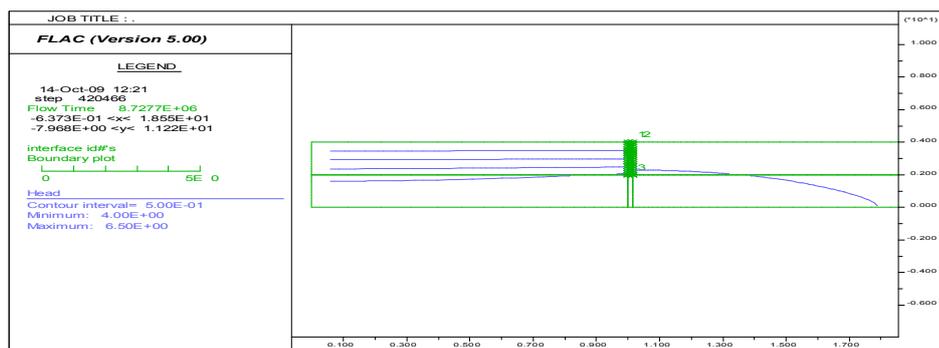


Figure IV.30. Lignes équipotentielles devant l'écran deviennent quasi-horizontales.  $H/f=2, 90$ ; pour  $\varphi = 20^\circ, \psi/\varphi = 1$  et  $\delta/\varphi = 0$ .

Contrôle de la convergence des calculs mécaniques:

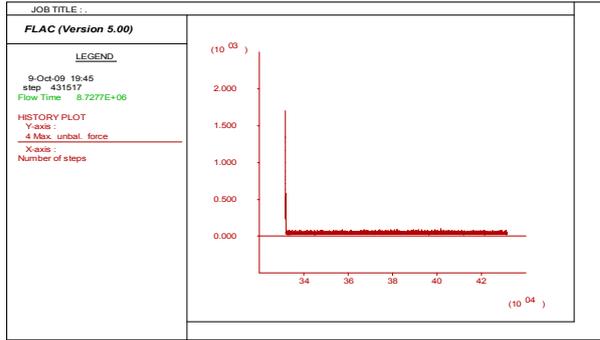


Figure IV.31. Historique de la force non équilibrée maximale.

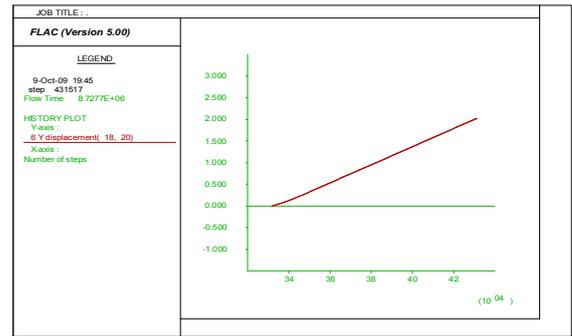


Figure IV.32. Historique des déplacements y du nœud  $i=18, j=20$  (point situé à l'aval).

Contrôle de la stabilité et l'instabilité (état de rupture) des calculs mécaniques:

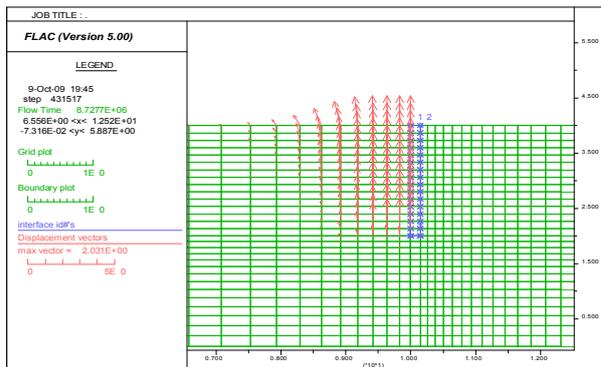


Figure IV.33. Champ des vecteurs de déplacements. Soulèvement triangulaire.

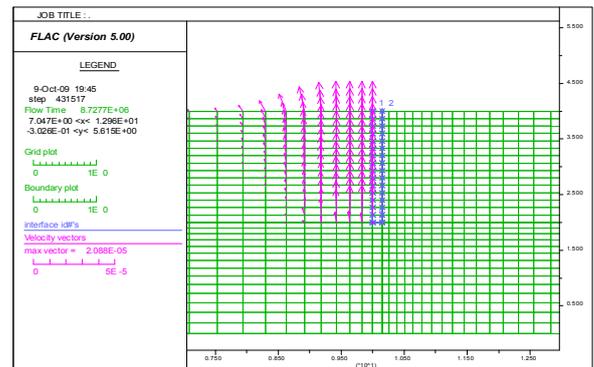


Figure IV.34. Champ des vecteurs de vitesses. Soulèvement triangulaire.

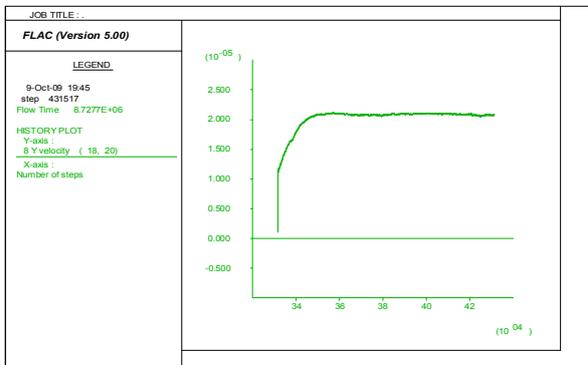


Figure IV.35. Historique des vecteurs de vitesses.

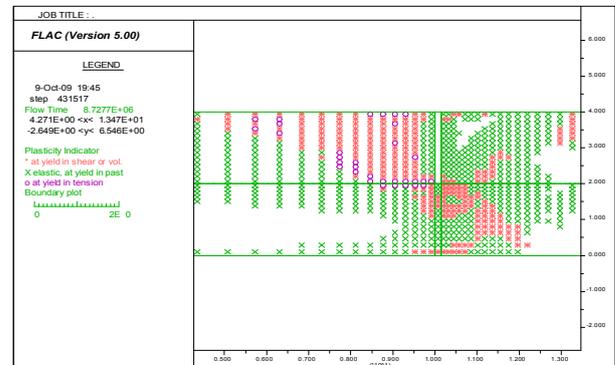


Figure IV.36. Points plastiques dans le modèle pour  $H/f=2,90$ .

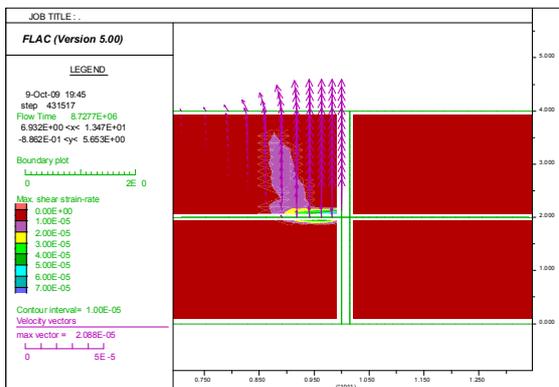


Figure IV.37. Tracé de la Surface de rupture pour  $\phi = 20^\circ, \psi/\phi = 1$  et  $\delta/\phi = 0, H/f=2,90$ ; surface de rupture définie par champ de déformation de cisaillement et vecteurs de vitesse.

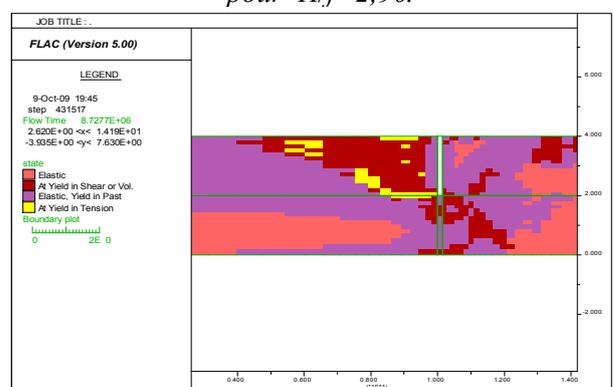


Figure IV.38. Etat du modèle  
1- zones en rupture de cisaillement  
2- zones en rupture au passé  
3- zones en rupture de tension

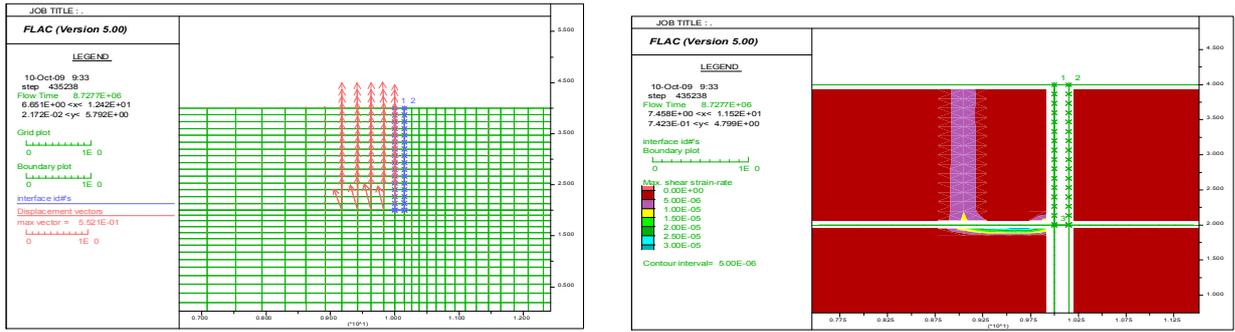


Figure IV.39. Champs de déplacements et distribution des déformations maximales de cisaillement correspondante pour  $\varphi = 20^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 6,67$  et  $\delta/\varphi = 1/3$ ,  $H/f=2,9$ .

- Mécanisme de rupture axisymétrique anisotrope : soulèvement d'un prisme rectangulaire -

Tableau IV.8. Perte de charge hydraulique critique  $H/f$  pour différents paramètres  $\varphi$ ,  $\psi/\varphi$  et  $\delta/\varphi$ . Batardeau circulaire en milieu fini **anisotrope**.  $D/f = 2$  ;  $K_h/K_v = 50$ .

		$H/f$ Critique			
		$\delta/\varphi$			
		0	1/3	2/3	1
$\varphi$	$\psi/\varphi$				
20°	0	1.42*	1.43*	1.44*	1.45*
	1/2	1.43**	1.43**	1.45**	1.45**
	1	1.43**	1.44**	1.45**	1.45**
25°	0	1.43*	1.44*	1.45*	1.45*
	1/2	1.43**	1.45**	1.46**	1.46**
	1	1.43**	1.45**	1.46**	1.46**
30°	0	1.43*	1.45*	1.46*	1.46*
	1/2	1.43**	1.46**	1.47**	1.47**
	1	1.44**	1.46**	1.47**	1.47**
35°	0	1.44*	1.46*	1.47*	1.47*
	1/2	1.45**	1.47**	1.48**	1.48**
	1	1.45**	1.47**	1.48**	1.48**
40°	0	1.45*	1.46*	1.47*	1.48*
	1/2	1.46**	1.47**	1.48**	1.49**
	1	1.46**	1.47**	1.48**	1.49**

\* soulèvement (prisme rectangulaire) ; \*\* soulèvement (prisme triangulaire) ; \*\*\* boulange

- Les résultats numériques obtenus, montrent que la perte de charge hydraulique critique provoquant le renard  $H/f$  est nettement *inférieure* à celle du cas de milieu fini *isotrope*. Donc  $H/f$  *diminue* avec l'augmentation du rapport de perméabilité  $K_h/K_v$ , il y a une grande diminution de  $H/f$  jusqu'à  $K_h/K_v = 100$  et la rupture du sol adjacent de l'écran étanche apparaît pour une petite perte de charge comparé au cas *isotrope*. Cela peut être expliqué par le fait que les lignes équipotentielles devant l'écran deviennent *quasi-horizontales* au delà d'une certaine valeur de  $K_h/K_v$  et, donc, le champ potentiel ne change pas en plus dans la zone concernée par le mécanisme de rupture.
- Ces résultats indiquent clairement que la stabilité de fond de fouille à la rupture due à l'écoulement est toujours correspond à un soulèvement et la boulange n'a pas apparu. Donc, le mécanisme de rupture de ce cas *anisotrope* se diffère du cas précédent (milieu fini *isotrope*).
- On constate que la perte de charge hydraulique critique  $H/f$  provoquant le renard augmente avec de petites valeurs en fonction de l'augmentation de l'angle de frottement  $\varphi$ , et  $\delta$  de l'ordre de 0,01.

- Contrairement aux constatations de Soubra *et al*, (1992, 1999) pour le cas en déformations planes, l'angle de frottement de l'interface sol/ écran  $\delta$  a une influence (mais *moins importante* que le cas isotrope) sur la valeur de perte de charge  $H/f$  qui provoque le renard.
  - Pour  $\psi/\varphi = 0$  (sol non dilatant), on obtient le soulèvement d'un prisme *rectangulaire* similaire à celui obtenu pour le cas précédent (milieu *fini isotrope*) mais avec une largeur supérieure à  $f/2$ .
  - Du même, pour un sol dilatant  $\psi/\varphi \geq 1/2$ , un prisme *triangulaire* du sol est obtenu, et ce dernier est similaire à celui obtenu pour le cas précédent (milieu *fini isotrope*).
  - La présente procédure de simulation démontre que l'angle de *dilatance*  $\psi$  du sol a une influence considérable sur la forme du mécanisme de rupture.
  - Du Tableau IV.8, pour  $\delta/\varphi = 0$ ,  $\psi/\varphi = 1$  et  $\varphi$  varie de  $20^\circ$  à  $40^\circ$ , la valeur critique de  $H/f$  se trouve dans la gamme de **1,43–1,46**. Donc, ces valeurs de perte de charge hydraulique sont *inférieures* que le cas précédent (milieu *fini isotrope*).
- Aussi, pour  $\varphi = 40^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 1$  et  $\delta/\varphi$  varie de **0 à 1**, la valeur critique de  $H/f$  se trouve dans la gamme de **1,46–1,49** où le phénomène de boullance n'apparaît pas contrairement au cas *isotrope*.
- Ces résultats montrent que la perte de charge hydraulique critique  $H/f$  causant le renard, dépend de l'angle de frottement interne du sol  $\varphi$  et l'angle de frottement de l'interface  $\delta$  du sol/écran.

#### IV.5.5.2.2 Milieu semi-infini

Dans ce cas, on considère le cas *semi-infini*, la profondeur du modèle  $D = 6*f$  où  $D$  : épaisseur du sol,  $f$  : la fiche de l'écran,  $r = B/2$  : le rayon de la fouille circulaire. On prend :  $r = B/2 = 10$  m (similaire au cas de Soubra *et al*, 1999). Les paramètres du sol utilisés dans le modèle sont les mêmes que le cas précédent. Le rapport de perméabilité  $K_h/K_v = 50$ , on prend  $K_v = 10^{-10}$  m/s, donc  $K_h = 50*K_v = 50*10^{-10}$  m/s. On rappelle que cette perméabilité est la perméabilité utilisée en Flac, et la perméabilité réelle du sol est  $K = K_{Flac} * \gamma_w$ . De la même façon que le cas précédent, on cherche la perte de charge hydraulique critique à partir laquelle le phénomène de renard commence à apparaître,  $H/f$  pour  $\varphi$  ( $\varphi = 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ ),  $\delta/\varphi$  ( $\delta/\varphi = 0, 1/3, 2/3, 1$ ),  $\psi/\varphi$  ( $\psi/\varphi = 0, 1/2, 1$ ) lorsque le rapport de perméabilité  $K_h/K_v = 50$ .

Tableau IV.9. Perte de charge hydraulique critique  $H/f$  pour différents paramètres  $\varphi$ ,  $\psi/\varphi$  et  $\delta/\varphi$ . Batardeau circulaire en milieu semi-infini **anisotrope**.  $K_h/K_v = 50$ .

		<b><i>H / f Critique</i></b>			
		$\delta/\varphi$			
		0	1/3	2/3	1
$\varphi$	$\psi/\varphi$				
20°	0	1.67*	1.68*	1.69*	1.70*
	1/2	1.68**	1.69**	1.70**	1.70**
	1	1.68**	1.69**	1.70**	1.70**
25°	0	1.68*	1.69*	1.70*	1.70*
	1/2	1.68**	1.70**	1.71**	1.71**
	1	1.68**	1.70**	1.71**	1.71**
30°	0	1.68*	1.70*	1.71*	1.71*
	1/2	1.69**	1.71**	1.72**	1.72**
	1	1.69**	1.71**	1.72**	1.72**
35°	0	1.69*	1.71*	1.72*	1.72*
	1/2	1.70**	1.72**	1.73**	1.73**
	1	1.70**	1.72**	1.73**	1.73**
40°	0	1.70*	1.71*	1.72*	1.73*
	1/2	1.71**	1.72**	1.73**	1.74**
	1	1.71**	1.72**	1.73**	1.74**

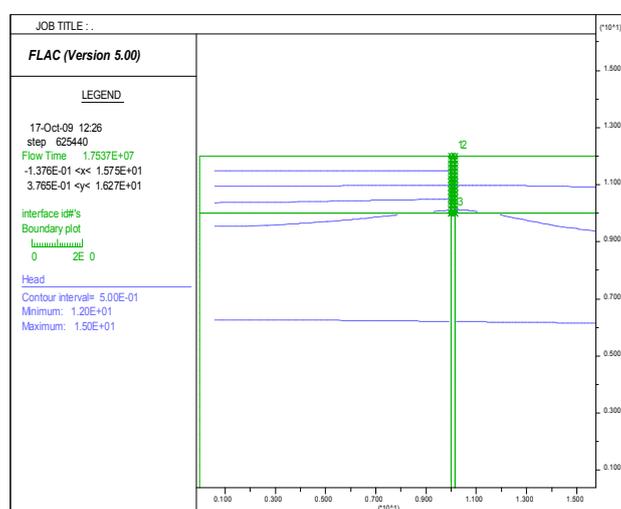


Figure IV.40. Lignes équipotentielles quasi-horizontales devant l'écran.  $H/f = 1,70$ . Pour  $\varphi = 40^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 0$ .

- Les résultats numériques obtenus, montrent que la perte de charge hydraulique critique provoquant le renard  $H/f$  est nettement *inférieure* à celle du cas de milieu *semi-infini isotrope*. Donc  $H/f$  *diminue* avec l'augmentation du rapport de perméabilité  $K_h/K_v$ , il y a une grande diminution de  $H/f$  jusqu'à  $K_h/K_v = 100$  et la rupture du sol adjacent de l'écran étanche apparaît pour une petite perte de charge comparé au cas *isotrope*.
- Par ailleurs, ces résultats, montrent que la perte de charge hydraulique critique  $H/f$  provoquant le renard est *supérieure* à celle du cas de milieu *fini anisotrope*. Donc pour un cas *anisotrope*,  $H/f$  *augmente* avec l'augmentation de la profondeur relative  $D/f$ .
- Du même, ces résultats indiquent clairement que la stabilité de fond de fouille à la rupture due à l'écoulement est toujours correspond à un soulèvement et la boullance n'a pas apparu. Donc, le mécanisme de rupture de ce cas *anisotrope* se diffère du cas précédent (milieu *semi-infini isotrope*).
- Egalement, on constate que la perte de charge hydraulique critique  $H/f$  provoquant le renard augmente avec de petites valeurs en fonction de l'augmentation de l'angle de frottement  $\varphi$ , et  $\delta$  de l'ordre de 0,01.
- Contrairement aux constatations de Soubra *et al*, (1992, 1999) pour le cas en déformations planes, l'angle de frottement de l'interface sol/écran  $\delta$  a une influence (mais *moins importante* que le cas isotrope) sur la valeur de perte de charge  $H/f$  qui provoque le renard.
- Pour  $\psi/\varphi = 0$  (sol non dilatant), on obtient le soulèvement d'un prisme *rectangulaire* similaire à celui obtenu pour le cas d'un milieu *semi-infini isotrope* mais avec une largeur égale à  $f/2$  comme celui obtenu par Terzaghi, 1943 pour un cas *plan* en milieu *semi-infini*.
- Du même, pour un sol dilatant  $\psi/\varphi \geq 1/2$ , un prisme *triangulaire* du sol est obtenu, et ce dernier est similaire à celui obtenu pour le cas précédent (milieu *fini anisotrope*).
- La présente procédure de simulation démontre que l'angle de *dilatance*  $\psi$  du sol a une influence considérable sur la forme du mécanisme de rupture.
- Du Tableau IV.9, pour  $\delta/\varphi = 0$ ,  $\psi/\varphi = 1$  et  $\varphi$  varie de  $20^\circ$  à  $40^\circ$ , la valeur critique de  $H/f$  se trouve dans la gamme de **1,68–1,71**. Ainsi, ces valeurs de perte de charge hydraulique sont *inférieures* que le cas d'un milieu *semi-infini isotrope* et *supérieures* au cas milieu *fini anisotrope*. Aussi, pour  $\varphi = 40^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 1$  et  $\delta/\varphi$  varie de **0 à 1**, la valeur critique de  $H/f$  se trouve dans la gamme de **1,71–1,74** où le phénomène de boullance n'apparaît pas contrairement au cas *isotrope*.
- Ces résultats montrent aussi que la perte de charge hydraulique critique  $H/f$  causant le renard, dépend de l'angle de frottement interne du sol  $\varphi$  et l'angle de frottement de l'interface  $\delta$  du sol/écran.

#### IV.5.5.3 Cas d'un écran fiché dans un milieu bicouche isotrope

##### IV.5.5.3.1 Milieu fini

##### IV.5.5.3.1.1 Cas où l'écran est fiché dans la couche supérieure (cas A)

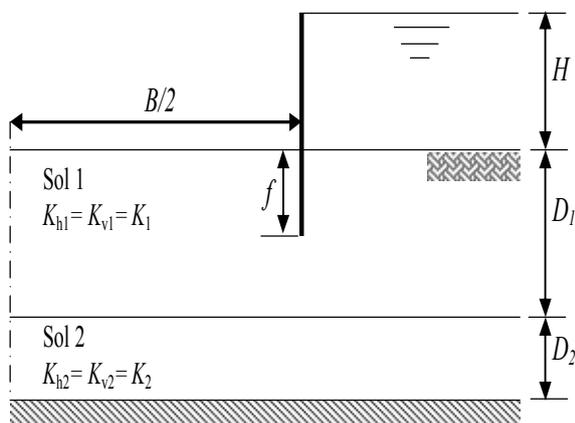


Figure IV.41. Cas axisymétrique dans un milieu bicouche isotrope (cas A).

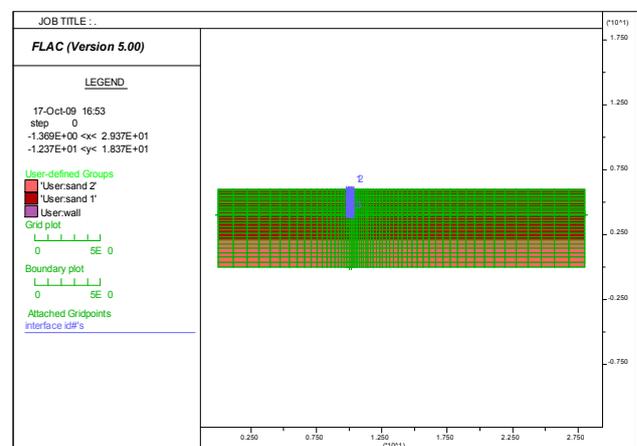


Figure IV.42. Modèle axisymétrique Flac2D.

$D_1$  : épaisseur de la couche supérieure,  $D_2$  : épaisseur de la couche inférieure,  $f$  : la fiche de l'écran,  $B$  : diamètre de la fouille,  $r = B/2$  : le rayon de la fouille.

La Figure IV.41 montre le cas d'un milieu *bicouche isotrope axisymétrique* où la perméabilité des couches supérieure et inférieure sont respectivement  $K_1$  et  $K_2$ .

On s'intéresse dans cette partie, à l'effet de la perméabilité, donc pour comparer ces résultats axisymétriques aux résultats de Soubra *et al*, 1999, on utilise les mêmes données qui ont utilisé dans leur modèle :  $D_1/f = 2$ ,  $D_2/f = 1$  ;  $r = B/2 = 10$  m. Pour les deux couches du sol  $\gamma_{sat}/\gamma_w = 2$ , module volumique de sol  $K = 30$  MPa, module de cisaillement  $G = 11,25$  MPa, l'angle de frottement interne  $\varphi = 35^\circ$ , et une cohésion *nulle*, angle de dilatance  $\psi$  *nulle* (comportement de Mohr Coulomb non associé), angle de frottement de l'interface  $\delta/\varphi = 2/3$ .

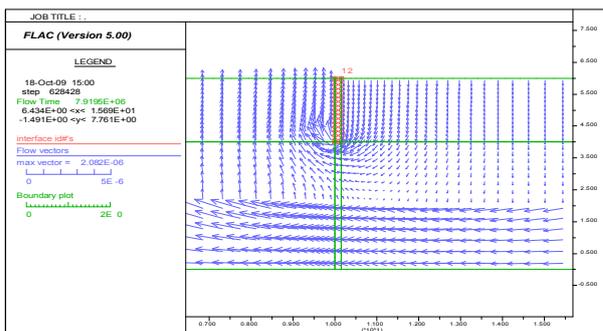


Figure IV.43. Vecteurs écoulement à l'état d'écoulement permanent.  $H/f = 2,2$ , pour  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$ .  $k_1/k_2 = 1/100$ .

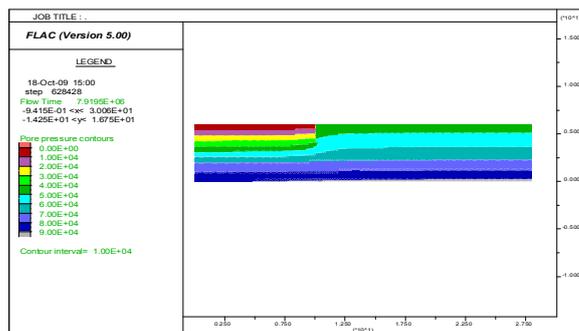


Figure IV.44. Champ de pressions interstitielles à l'état d'écoulement permanent.  $H/f = 2,2$ , pour  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$ ,  $k_1/k_2 = 1/100$ .

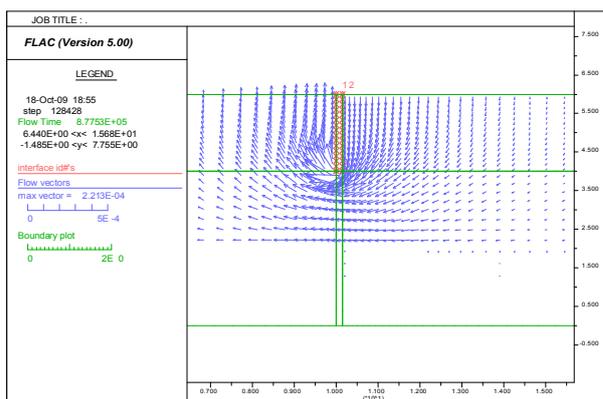


Figure IV.45. Vecteurs écoulement à l'état d'écoulement permanent.  $H/f = 5,55$ , pour  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$ ,  $k_1/k_2 = 100$ .

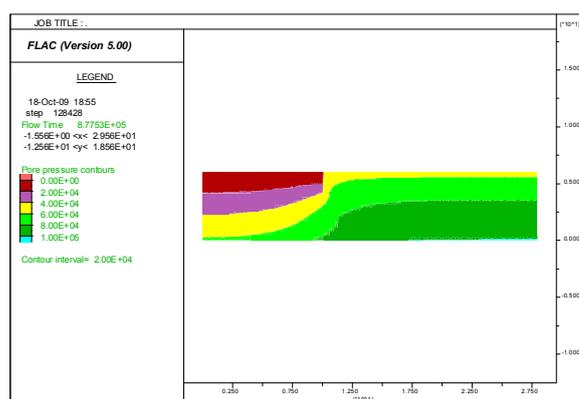


Figure IV.46. Champ de pressions interstitielles à l'état d'écoulement permanent.  $H/f = 5,55$ , pour  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$ ,  $k_1/k_2 = 100$ .

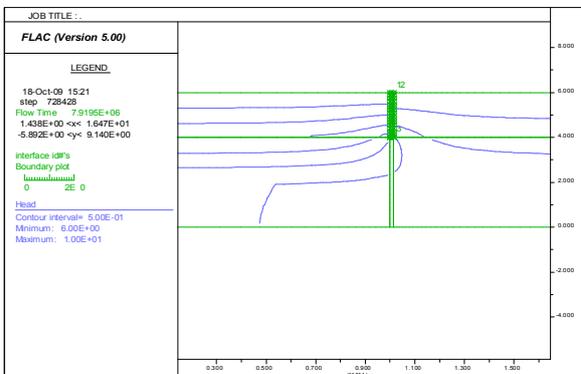


Figure IV.47. Lignes équipotentielles devant l'écran deviennent quasi-horizontales.  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$ .  $H/f = 2,2$ ,  $k_1/k_2 = 1/100$ .

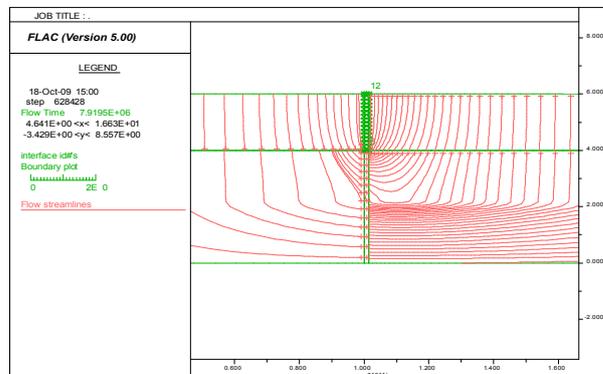


Figure IV.48. Lignes de courant devant l'écran.  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$ .  $H/f = 2,2$  ;  $k_1/k_2 = 1/100$

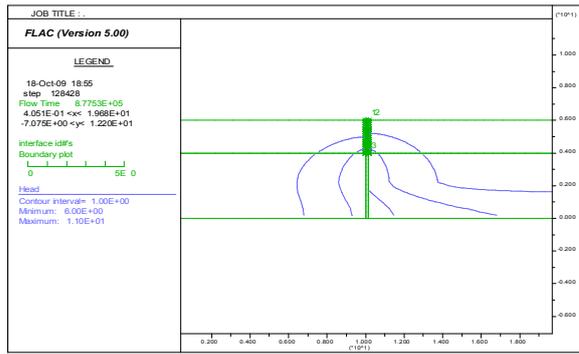


Figure IV.49. Lignes équipotentielles devant l'écran  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$ .  $H/f = 5,55$  ;  $k_1/k_2 = 100$ .

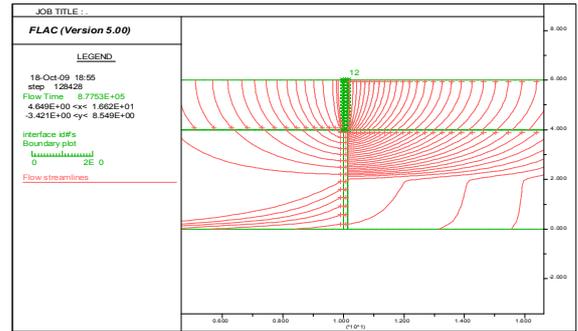


Figure IV.50. Lignes de courant devant l'écran.  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$ .  $H/f = 5,55$  ;  $k_1/k_2 = 100$ .

Contrôle de la convergence des calculs mécaniques:

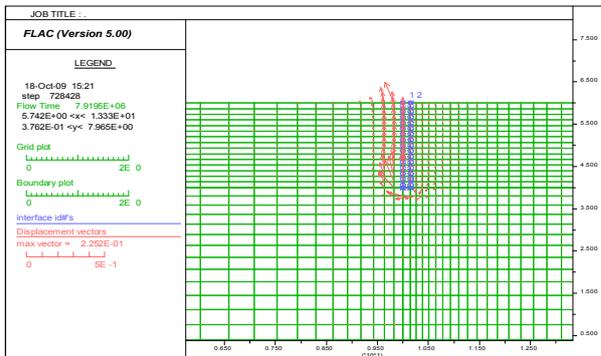


Figure IV.51. Champ des vecteurs de déplacements. Soulèvement rectangulaire pour  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$ .  $H/f = 2,2$  ;  $k_1/k_2 = 1/100$ .

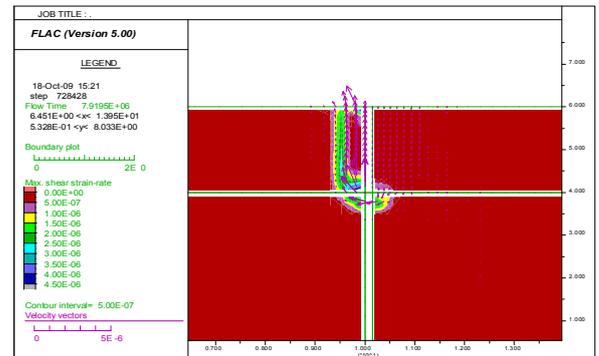


Figure IV.52. Tracé de la Surface de rupture pour  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$  ;  $H/f = 2,2$  ;  $k_1/k_2 = 1/100$ . ; surface de rupture définie par champ de déformation de cisaillement et vecteurs de vitesse.

Contrôle de la stabilité et l'instabilité (état de rupture) des calculs mécaniques:

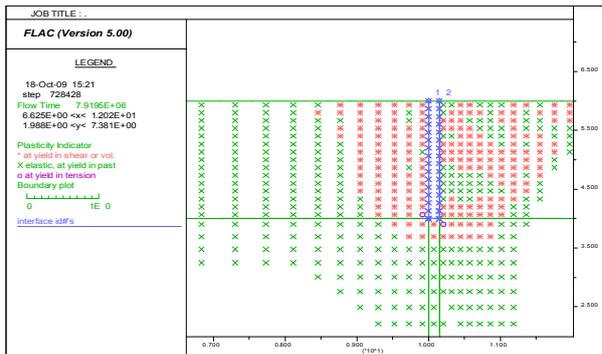


Figure IV.53. Points plastiques dans le modèle pour  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$ .  $H/f = 2,2$  ;  $k_1/k_2 = 1/100$ .

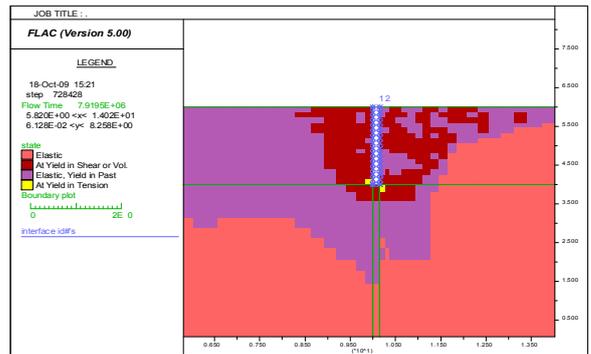


Figure IV.54. Etat du modèle 1- zones en rupture de cisaillement, 2- zones en rupture au passé, 3- zones en rupture de tension pour  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$ .  $H/f = 2,2$  ;  $k_1/k_2 = 1/100$ .

Tableau IV.10. Perte de charge hydraulique critique  $H/f$  pour différents paramètres  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$ .  $D_1/f = 2$ .  $D_2/f = 1$ . Cas d'un écran fiché dans un milieu fini bicouche isotrope (cas A).

$k_1/k_2$	1/100	1/10	1	10	100	1000
2	2,20	2,23	2,57	2,75	2,77	2,77

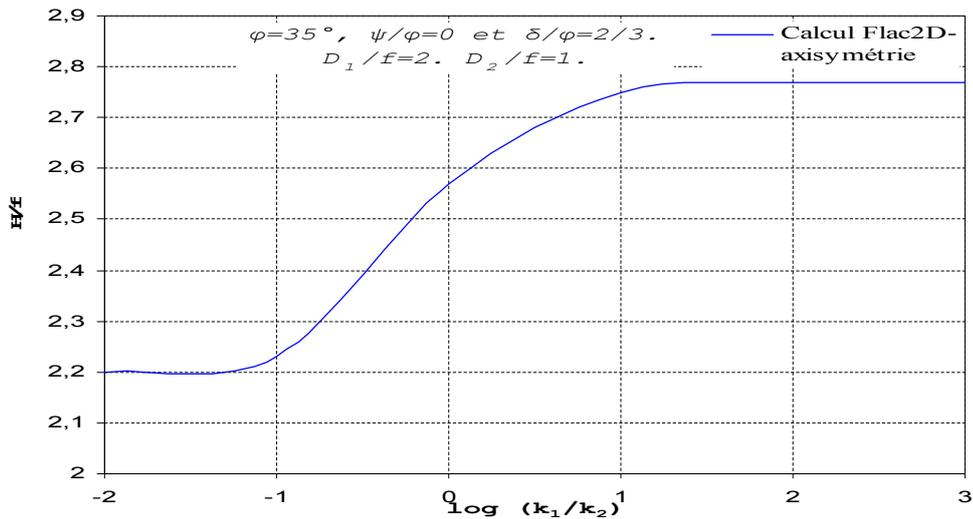


Figure IV.55. Perte de charge hydraulique critique  $H/f$  pour différents paramètres  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$ .  $D_1/f = 2$ .  $D_2/f = 1$ .

- Pour le cas d'une seule couche ( $k_1/k_2 = 1$ ), la perte de charge  $H/f$  est égale à **2,57**. Lorsque  $k_1/k_2 > 10$ , on obtient une perte de charge qui correspond au cas d'une seule couche de profondeur limitée ( $\varphi = 35^\circ$ ,  $\delta/\varphi = 2/3$ ,  $H/f = 2,77$  ; et  $D_1/f = 2$ ), du moment que la couche inférieure peut être considérée comme un substratum imperméable.
- On note cependant, que pour les cas où la couche inférieure a un plus grand coefficient de perméabilité que la couche supérieure ( $k_1/k_2 < 1$ ), la plupart de la perte de charge  $H/f$  est concentrée dans la couche supérieure, résultant en plus grandes pressions interstitielles. Par conséquent, la perte de charge  $H/f$  diminue avec la diminution de  $k_1/k_2$ . On note que pour un écoulement en plan, Soubra *et al*, 1999 constatent que le coefficient de butée dans ce cas diminue avec la diminution de  $k_1/k_2$ .

IV.5.5.3.1.2 Cas où l'écran est fiché dans la couche inférieure (cas B)

Soit :  $D_1$  : épaisseur de la couche supérieure,  $D_2$  : épaisseur de la couche inférieure,  $f$  : la fiche de l'écran,  $B$  : le diamètre de la fouille,  $r = B/2$  : le rayon de la fouille.  $D_1/f = 1/2$ ,  $D_2/f = 5/2$ ,  $B/2 = 10$  m.

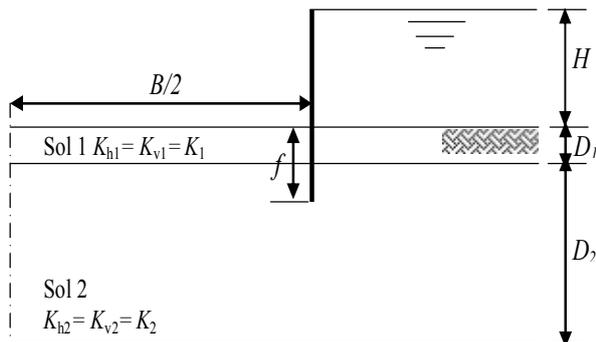


Figure IV.56. Cas axisymétrique dans un milieu bicouche isotrope (cas B).

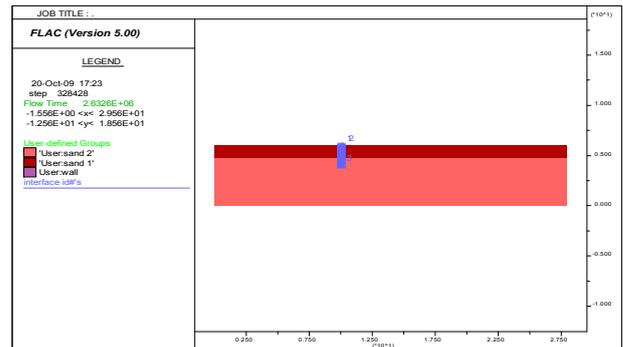


Figure IV.57. Modèle axisymétrique Flac2D.

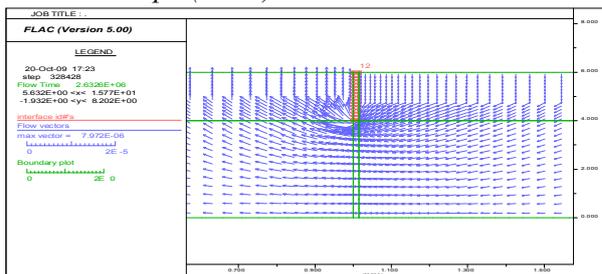


Figure IV.58. Vecteurs écoulement à l'état d'écoulement permanent.  $H/f = 2,25$  ; pour  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$ ,  $k_1/k_2 = 1/100$ .

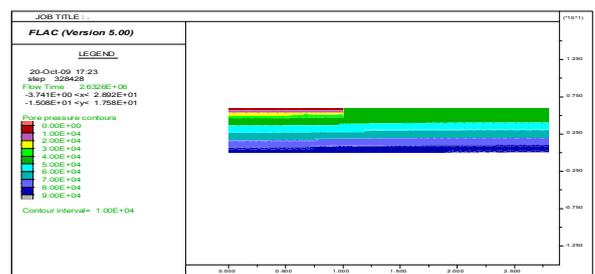


Figure IV.59. Champ de pressions interstitielles à l'état d'écoulement permanent.  $H/f = 2,25$ , 126 pour  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$ ,  $k_1/k_2 = 1/100$ .

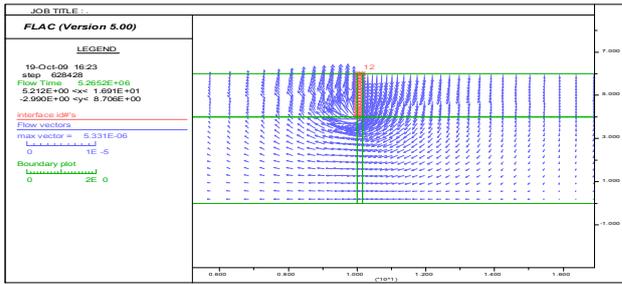


Figure IV.60. Vecteurs écoulement à l'état d'écoulement permanent.  $H/f = 4,87$  ; pour  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$ .  $k_1/k_2 = 100$ .

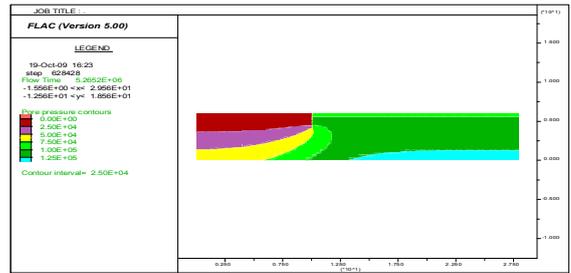


Figure IV.61. Champ de pressions interstitielles à l'état d'écoulement permanent.  $H/f = 4,87$  ; pour  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$ ,  $k_1/k_2 = 100$ .

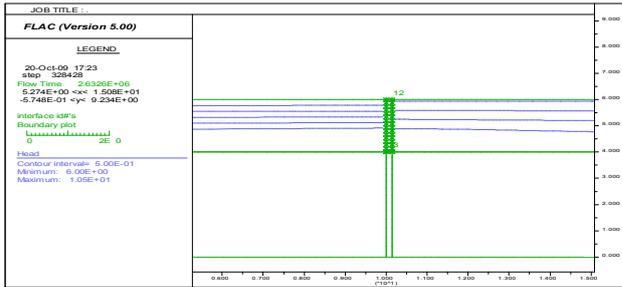


Figure IV.62. Lignes équipotentielles quasi-horizontales devant l'écran.  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$ ,  $H/f = 2,25$ ,  $k_1/k_2 = 1/100$ .

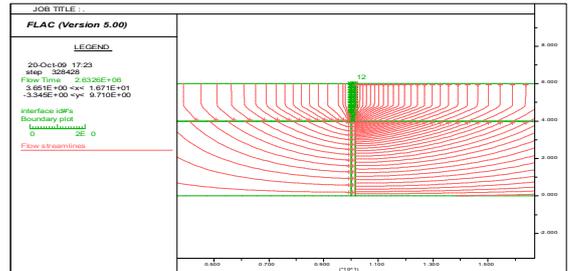


Figure IV.63. Lignes de courant devant l'écran.  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$ ,  $H/f = 2,25$ ;  $k_1/k_2 = 1/100$ .

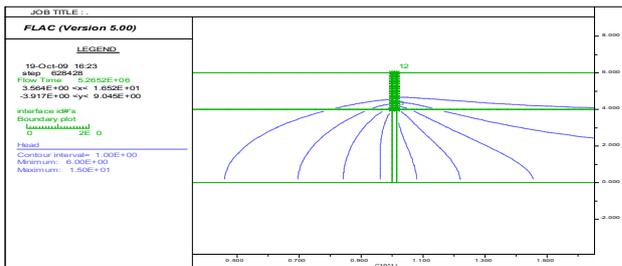


Figure IV.64. Lignes équipotentielles devant l'écran  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$ ,  $H/f = 4,87$  ;  $k_1/k_2 = 100$ .

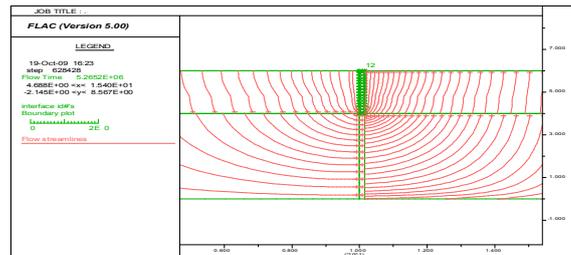


Figure IV.65. Lignes de courant devant l'écran.  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$ ,  $H/f = 4,87$ ;  $k_1/k_2 = 100$ .

Tableau IV.11. Perte de charge hydraulique critique  $H/f$  pour différents paramètres  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$ .  $D_1/f = 0,5$ .  $D_2/f = 2,5$ . Cas d'un écran fiché dans un milieu fini bicouche isotrope (cas B).

$k_1/k_2$	$D_2/f$	$D_1/f$					
		1/100	1/10	1	10	100	1000
0,5	2,5	2,25	2,30	2,57	4,2	4,87	5,50

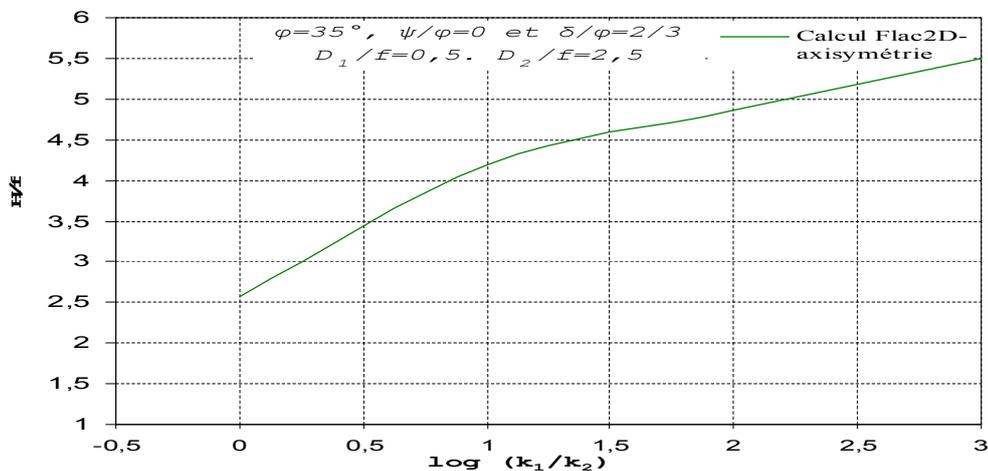


Figure IV.66. Perte de charge hydraulique critique  $H/f$  pour différents paramètres  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 2/3$ .  $D_1/f = 0,5$  ;  $D_2/f = 2,5$ .

- Comme dans la partie précédente (cas A), la perte de charge  $H/f$  d'une seule couche en milieu isotrope ( $k_1/k_2 = 1$ ) est égale à **2,57**. Pour  $k_1/k_2 > 100$ , la perte de charge a lieu uniquement dans la couche inférieure, et la couche supérieure peut être considérée comme un filtre qui augmente la stabilité globale du sol devant l'écran. Par conséquent, l'augmentation de la perte de charge avec l'augmentation de  $k_1/k_2$  est un phénomène logique. Les mêmes constatations sont observées par Soubra *et al.*, 1999 pour le cas d'un écoulement plan : augmentation du coefficient de butée.
- En revanche, pour les cas où la couche inférieure a un plus grand coefficient de perméabilité que la couche supérieure ( $k_1/k_2 < 1$ ), la plupart de la perte de charge  $H/f$  a lieu dans la couche supérieure, en résultant en une réduction considérable de sa force du corps résultante (poids flottable (*buoyant weight*) + force de l'infiltration). Par conséquent, la perte de charge  $H/f$  diminue avec la diminution de  $k_1/k_2$ . On note que pour un écoulement en plan, Soubra *et al.*, 1999 constatent que le coefficient de butée diminue avec la diminution de  $k_1/k_2$ .
- Cependant, il devrait être noté que ce schéma de calcul est seulement valide lorsque le gradient hydraulique vertical dans la couche supérieure est plus petit que le gradient critique  $i_c = \gamma'/\gamma_w$ , sinon une rupture par soulèvement de la couche supérieure se produira dû au fait que le poids saturé de cette couche est égal à la résultante des pressions interstitielles sur la base de cette couche. Cette limitation est montrée dans Figure IV.66 par une ligne verticale pointillée log ( $k_1/k_2$ ) = 0.

### IV.5.5.3.2 Milieu semi-infini

On s'intéresse dans cette partie, à l'effet de la perméabilité, ainsi pour comparer ces résultats axisymétriques aux résultats de Benmebarek *et al.*, 2005, on utilise les mêmes données que celles utilisées dans leur modèle. Pour les deux couches du sol  $\gamma_{sat}/\gamma_w = 2$ , module volumique de sol  $K = 30$  MPa, module de cisaillement  $G = 11,25$  MPa, l'angle de frottement interne du sol  $\varphi = 30^\circ$ , et une cohésion nulle, angle de dilatance  $\psi$  nul (comportement de Mohr Coulomb non associé), angle de frottement de l'interface  $\delta$  nul. Il faut noter qu'il s'agit de cas où la couche inférieure  $D_2$  est considérée *semi-infini*, donc,  $D_2 \geq 5 \cdot f$  où  $f$  est la fiche de l'écran.

Tableau IV.12. Perte de charge hydraulique critique  $H/f$  pour différents paramètres  $\varphi = 30^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 0$ .  $D_2/f = 5$ . Cas d'un écran fiché dans un milieu semi-infini

$D_1/f$	$D_1$ m	f m	$D_2=5 \cdot f$ m
0,50	1	2	10
1,00	2	2	10
2	4	2	10

$k_1/k_2$ \ $D_1/f$	1/100	1/10	1	10	100	1000
0,50	1,12	1,15	2,40	3,60	4,42	7,5
1,00	-	1,75	2,40	3,80	6,5	8,5
2	-	2	2,40	2,55	2,65	2,65

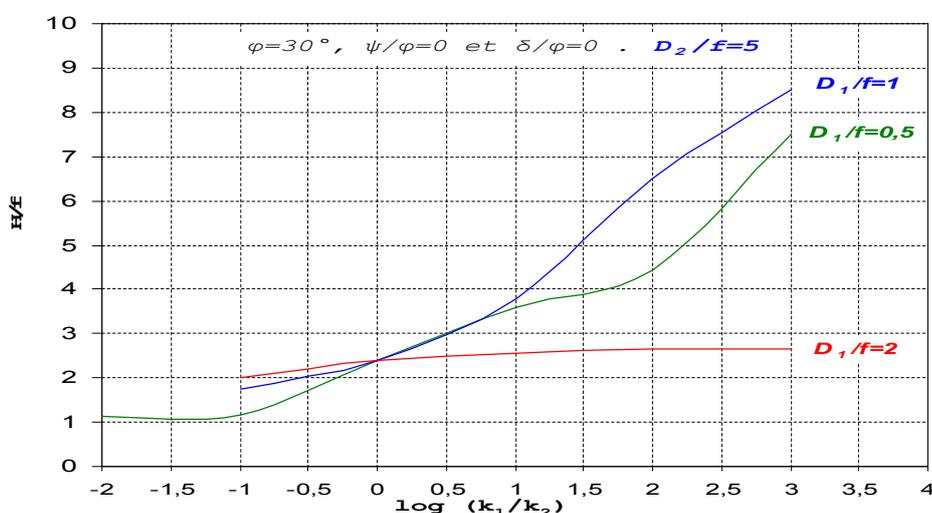


Figure IV.67. Perte de charge hydraulique critique  $H/f$  pour différents paramètres  $\varphi = 30^\circ$ ,  $\psi/\varphi = 0$  et  $\delta/\varphi = 0$ ;  $D_2/f = 5$ .

- Pour le cas d'une seule couche ( $k_1/k_2 = 1$ ), la perte de charge  $H/f$  est égale à **2,40**.
- Il faut noter que lorsque  $k_1/k_2 \geq 1$  et  $D_1/f \geq 2$ , on obtient la perte de charge hydraulique critique correspondant au cas homogène et isotrope dans une seule couche, du moment que la couche inférieure peut être considérée comme un substratum imperméable. Par contre, pour les cas où  $D_1/f = 0,5$  et  $D_1/f = 1$ , la perte de charge critique augmente avec l'augmentation du rapport de perméabilité  $k_1/k_2$ .
- On note cependant, que pour les cas où la couche inférieure a un plus grand coefficient de perméabilité que la couche supérieure ( $k_1/k_2 < 1$ ), la plupart de la perte de charge  $H/f$  est concentrée dans la couche supérieure, résultant en plus grandes pressions interstitielles. Par conséquent, la perte de charge  $H/f$  diminue avec la diminution de  $k_1/k_2$ .
- L'analyse des résultats présentés dans le Tableau **IV.12** montre une grande sensibilité de la perte de charge à la variation de la perméabilité. Le risque augmente avec la diminution de l'épaisseur de la couche supérieure et de sa perméabilité. En effet, pour  $D_1/f = 0,5$  un petit rapport de perméabilité  $k_1/k_2 = 1/2$  réduit la perte de charge critique par **42%** =  $(2,82-1,15)/(2,82+1,15)$ , tandis qu'un rapport de perméabilité  $k_1/k_2 = 1/100$  réduit la par **43%** =  $(2,82-1,12)/(2,82+1,12)$ , comparé à la valeur proposée par Terzaghi pour un sol homogène isotrope.
- Pour le cas où l'écran est fiché dans la couche inférieure ( $D_1/f = 0,5$ ) et  $k_1/k_2 > 100$ , la perte de charge a lieu uniquement dans la couche inférieure, et la couche supérieure peut être considérée comme un filtre qui augmente la stabilité globale du sol devant l'écran. Par conséquent, l'augmentation de la perte de charge (due à l'augmentation du coefficient de butée) avec l'augmentation de  $k_1/k_2$  est un phénomène logique.
- En revanche, pour les cas lorsque la couche inférieure a un plus grand coefficient de perméabilité que la couche supérieure ( $k_1/k_2 < 1$ ), la plupart de la perte de charge a lieu dans la couche supérieure, en résultant en une réduction considérable de sa force du corps résultante (poids flottable (*buoyant weight*) + force de l'infiltration). Par conséquent, la perte de charge  $H/f$  diminue avec la diminution de  $k_1/k_2$ . On note que pour un écoulement en plan, Soubra *et al*, 1999 constatent que le coefficient de butée diminue avec la diminution de  $k_1/k_2$ .
- Cependant, il devrait être noté que ce schéma de calcul est seulement valide lorsque le gradient hydraulique vertical dans la couche supérieure est plus petit que le gradient critique  $i_c = \gamma'/\gamma_w$ , sinon une rupture par soulèvement de la couche supérieure se produira dû au fait que le poids saturé de cette couche est égal à la résultante des pressions interstitielles sur la base de cette couche. Cette limitation est montrée dans Figure **IV.67**.
- La comparaison de ces présents résultats *axisymétriques* par rapport au même cas en écoulement *plan* (résultats de Benmebarek *et al*, 2005) montre que lorsque :
  - $D_1/f = 0,5$  et  $1/100 \leq k_1/k_2 \leq 100$  la valeur de la perte de charge critique  $H/f$  se trouve dans la gamme **1,12-4,42**, tandis que pour le cas *plan*, elle varie de **1,13-4,46** ;
  - $D_1/f = 1$  et  $1/10 \leq k_1/k_2 \leq 10$  la valeur de la perte de charge critique  $H/f$  se trouve dans la gamme **1,75-3,80**, tandis que pour le cas *plan*, elle varie de **2,29-3,92** ;
  - $D_1/f = 2$  et  $1/10 \leq k_1/k_2 \leq 100$  la valeur de la perte de charge critique  $H/f$  se trouve dans la gamme **2,00-2,65**, tandis que pour le cas *plan*, elle varie de **2,69-2,77**.

En conséquence, les valeurs de perte de charge hydraulique critique en *plan* sont **surestimées**, et par conséquent les valeurs du coefficient de sécurité sont **surestimées** par rapport au présent cas *axisymétrique*.

## IV.6 Conclusion

Les écrans de soutènements circulaires, dû à leur supériorité structurelle, sont fréquemment utilisés dans les excavations. L'adoption du cas des déformations planes dans l'analyse et la construction n'est évidemment pas correcte, et conservatrice dans la conception des écrans de soutènement **circulaires**. 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  $(r, z)$ .

Dans ce chapitre, des simulations numériques de la stabilité du sol devant la fiche des écrans circulaires en présence d'écoulement ont été menées en utilisant le logiciel Flac2D. Les résultats présentés sont donnés pour les sols associés et non associés pour différentes valeurs de l'angle de frottement interne  $\varphi$  et de l'angle de l'interface  $\delta$ . Il a été montré que le mécanisme de rupture, dans le cas général axisymétrique d'un sol homogène et isotrope, est une rupture par boulangement ou soulèvement. Dans ce cas de d'écoulement en conditions axisymétriques, le présent mécanisme de rupture a permis de déterminer la perte de charge hydraulique critique  $H/f$  provoquant la rupture de sol par boulangement ou soulèvement. Pour ce cas, le présent mécanisme de rupture décrit le phénomène de soulèvement traditionnel devant la fiche des écrans.

L'analyse de ces résultats permet de tirer ces conclusions :

### 1) Pour le cas d'un sol homogène isotrope:

- Le temps de calcul numérique diffère d'un cas à l'autre.
- Le soulèvement en masse du sol devant la fiche de l'écran circulaire se produit avant le phénomène de boulangement dans le cas d'un sol homogène isotrope en milieu semi-infini lorsque  $\varphi$  est inférieur à  $45^\circ$  ;
- La boulangement apparaît seulement pour un sol dense  $\varphi \geq 35^\circ$ , et dilatant  $\psi/\varphi > 1/2$  et un écran rugueux  $\delta/\varphi > 1/3$ . Dans ce cas, le gradient de sortie devient égal au gradient hydraulique critique, alors que le soulèvement se produit pour les autres cas
- La perte de charge hydraulique critique  $H/f$  provoquant le renard, dépend de l'angle de frottement interne du sol  $\varphi$  et l'angle de frottement de l'interface  $\delta$  du sol/écran.
- L'angle de *dilatance* du sol a une influence considérable sur la forme du mécanisme de rupture. Pour un sol dilatant, un prisme de rupture triangulaire par soulèvement est obtenu, alors qu'un prisme rectangulaire est obtenu pour d'autres cas. Le prisme rectangulaire en conditions axisymétriques a une largeur plus petite que celle du prisme obtenu par la méthode en plan de Terzaghi, 1943.
- Les résultats du cas homogène isotrope *fini* montrent que la perte de charge hydraulique critique  $H/f$  provoquant le renard est *supérieure* à celle du cas d'un milieu *semi-infini*, donc  $H/f$  augmente avec la diminution de la  $D/f$ .
- La perte de charge critique  $H/f$  provoquant la rupture du sol augmente avec l'augmentation du rayon relatif  $r/f$  du batardeau. Cependant, pour de grandes valeurs de  $r/f$  ( $r/f = 9$ ), les présents résultats de calcul numérique de  $H/f$  montrent que l'effet axisymétrique s'annule et  $H/f$  converge vers les résultats en déformations planes, et en excavant un grand diamètre, la rupture de sol due à la présence de l'écoulement devant un écran étanche circulaire est un problème en déformations planes. La comparaison avec les résultats en écoulement plan pour les grandes valeurs du rayon relatif  $r/f$  montre un bon accord, et confirme que, la présente procédure numérique peut prédire d'une manière satisfaisante la perte de charge hydraulique critique  $H/f$  provoquant la rupture de sol par soulèvement ou boulangement dans le cas des batardeaux circulaires. En outre, cette présente approche numérique propose les limites d'utilisation des méthodes en déformations planes.

L'analyse numérique indique que la stabilité du fond de fouille d'excavations est considérablement influencée par les propriétés de l'écran circulaire. Les résultats obtenus montrent que :

- L'influence de la rigidité de l'écran, pour sa même épaisseur, sur la perte de charge hydraulique critique  $H/f$  n'est pas importante. Néanmoins, la rigidité de l'écran (avec épaisseur différente) a une grande influence sur la perte de charge hydraulique critique  $H/f$ , autant que  $H/f$  augmente avec l'augmentation d'épaisseur de l'écran. La raison réside évidemment dans le fait que l'augmentation de l'épaisseur de l'écran provoque une perte de charge hydraulique supplémentaire.
- La perte de charge hydraulique critique dépend des dimensions de l'écran circulaire. De plus,  $H/f$  a une relation approximativement consistante avec le rapport du rayon à la profondeur ( $r/f$ ) de l'écran.

## 2) Pour le cas d'un sol homogène anisotrope:

- L'anisotropie du coefficient de perméabilité du sol peut causer une réduction significative du coefficient de butée, et par conséquent une diminution de la perte de charge critique qui provoque la rupture.
- Pour le cas d'un milieu *homogène anisotrope fini*, la perte de charge hydraulique critique  $H/f$  provoquant le renard est nettement *inférieure* à celle du cas de milieu *fini isotrope*. Donc  $H/f$  *diminue* avec l'augmentation du rapport de perméabilité  $K_h/K_v$ , puisque dans ce cas il y a une grande diminution du coefficient de butée jusqu'à  $K_h/K_v=100$  et la rupture du sol adjacent de l'écran étanche apparaît pour une petite perte de charge comparé au cas *isotrope*.
- Les résultats de ce cas montrent que la stabilité de fond de fouille à la rupture due à l'écoulement est toujours correspond à un soulèvement et la boullance ne se produit pas. Donc, le mécanisme de rupture de ce cas *anisotrope* se diffère du cas d'un milieu *fini isotrope*.
- Pour  $\psi/\phi = 0$  (sol non dilatant), on obtient le soulèvement d'un prisme *rectangulaire* similaire à celui obtenu pour le cas d'un milieu *fini isotrope* mais avec une largeur  $>f/2$  comme celui obtenu par Terzaghi, 1943 pour un cas plan en milieu *semi-infini*.
- Du même, les résultats numériques obtenus pour le milieu *semi-infini anisotrope*, montrent que la perte de charge hydraulique critique  $H/f$  provoquant le renard est nettement *inférieure* à celle du cas de milieu *semi-infini isotrope*.

## 3) L'étude du sol *bicouche isotrope* a montré que :

- Pour de grandes valeurs de  $k_1/k_2$  lorsque l'écran est fiché dans la couche supérieure, on obtient une perte de charge qui correspond au cas d'une seule couche de profondeur limitée, et lorsque l'écran est fiché dans la couche inférieure, la couche supérieure peut être considérée comme un filtre qui augmente la stabilité globale du sol devant l'écran.
- En revanche, pour de petites valeurs de  $k_1/k_2$ , la plupart de la perte de charge a lieu dans la couche supérieure, en résultant en une réduction considérable de la butée.
- Pour le milieu *semi-infini*, on a constaté une grande sensibilité de la perte de charge à la variation de la perméabilité. Le risque augmente avec la *diminution* de l'épaisseur de la couche supérieure et de sa perméabilité.
- La comparaison du cas *axisymétrique* par rapport au même cas *plan* (résultats de Benmebarek *et al*, 2005) montre que les valeurs de perte de charge hydraulique critique en *plan* sont *surestimées*, et par conséquent les valeurs du coefficient de sécurité sont *surestimées* par rapport au présent cas axisymétrique.

Enfin, on peut voir que l'effet de *l'anisotropie* et *l'hétérogénéité* et de la forme de l'excavation est significative pour la réduction de la perte de charge critique  $H/f$  provoquant le phénomène de renard par boullance ou soulèvement.

Les petites valeurs de  $H/f$  résultent des conditions axisymétriques et de la diminution de la rigidité de l'écran (diminution de l'épaisseur de l'écran). Cela veut dire que le mécanisme de rupture n'est pas seulement caractérisé par les caractéristiques du sol mais aussi par la géométrie de l'écran (épaisseur et rayon). Par conséquent, pour évaluer exactement la perte charge hydraulique critique provoquant le renard, l'analyse doit être exécutée en tenant compte ce qui suit : caractéristiques du sol, l'anisotropie et l'hétérogénéité de sol ; interface sol/écran ; forme de l'excavation et les propriétés de l'écran.

Ainsi, l'évaluation de  $H/f$  tenant compte de ces paramètres est de grand intérêt dans la pratique de l'ingénierie géotechnique. Puisque la plupart des méthodes proposées pour évaluer le risque de rupture (en présence de l'écoulement d'eau) du fond de fouille d'un batardeau par boullance ou soulèvement, mènent quelquefois aux grandes différences sur la perte de charge causant la rupture: elles surestiment cette valeur, comparée à un écoulement en conditions axisymétrique autour des écrans cylindriques souvent utilisé pour modéliser un tel écoulement tridimensionnel.