

## CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

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

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

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

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

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

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

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

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

Les résultats de calculs obtenus montrent que :

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

- Les relations établies par MANDEL en écoulement plan sont valables dès que  $2r/e = 2.7$  pour le cas des batardeaux *carrés* et *circulaires*. De plus, les résultats de DAVIDONKOFF et FRANKE en 3D sont seulement valables pour les batardeaux étroits et l'erreur peut dépasser 15 % pour les batardeaux larges. Ce résultat approximatif est le reflet du domaine étroit qu'ils ont étudié et ne peut être adopté comme règle générale. En particulier, nous avons pu vérifié l'hypothèse d'un batardeau de rayon infini pouvant être assimilé à un batardeau plan, et on a montré que le coefficient minérateur qu'ils ont défini tends vers l'unité.

- A partir de la valeur  $2R/e = 2.5$  où  $2R/2r = 5$  donc  $R = 5 r$  le débit reste constant ce qui montre qu'à partir de cette valeur que l'effet tridimensionnel devient négligeable au terme du débit, et l'effet de la troisième dimension peut être négligé pour le cas d'un batardeau *rectangulaire*. En outre, pour les batardeaux de faibles largeurs, nous proposons de calculer le débit à l'aide de la relation :  $Q = Q_{\text{plan}} * B$  où  $B$  est un facteur de réduction dépendant à la fois de  $f/e$  et de  $2 r/e$ . On peut estimer ce facteur à environ  $B = 0.85$ .

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

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

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

- On a remarqué que dans le cas des batardeaux **carrés** le rapport entre les pertes de charges en aval *tridimensionnelles* et celles en *plan* est très petit pour les fouilles étroites et dès que  $2r/e_1=2.7$ , ce rapport augmente et tend presque vers 1 pour de très fortes largeurs du batardeau. Et on a pu noter aussi que les pertes de charge dans le batardeau carré sont supérieures que celles du batardeau circulaire. Tandis que, ce rapport est très petit pour les fouilles étroites et n'a jamais dépassé la valeur 0.73 pour de très fortes largeurs du batardeau dans le cas des batardeaux **rectangulaires**. Ces écarts se compensant dans l'écoulement global, les relations de MANDEL devient utilisables dès que  $2R/e= 2.5$  où  $2R/2r = 5$  donc  $R= 5 r$  avec une erreur aussi inférieure à 5 %.

- Pour le cas d'un batardeau **circulaire**, l'écart entre les pertes de charge partielles est important, ainsi l'erreur peut atteindre 23.28 % dans le cas des grandes fouilles.

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

Enfin, on peut noter pour tous ces cas que contrairement au cas de l'écoulement global les pertes de charge partielles restent différentes de celles relatives à l'écoulement plan. Même pour les fortes largeurs de batardeau, les pertes de charge intérieures et extérieures restent respectivement supérieures et inférieures.

Par contre, ces écarts se compensant dans l'écoulement global, les relations de MANDEL devient utilisables dès que  $2r/e$  est égal à 2.7 avec une erreur inférieure à 5 %.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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