

CONCLUSION GENERALE

Les synthèses empiriques discutées dans le cadre de l'étude **bibliographique** dans la première partie de ce mémoire se concentrent sur l'identification de corrélations entre le déplacement horizontal maximal de la structure (des écrans de soutènement de toute sorte construits dans des divers types de sol) ou le déplacement vertical de son environnement, et des facteurs géométriques liés à l'ouvrage ou des facteurs géotechniques liés aux terrains.

D'après ces études, les principaux paramètres en jeu sont le type de sol, la profondeur de l'excavation, la stabilité du fond de fouille et la rigidité du système. Un facteur important, omis dans cette énumération, est l'influence de **l'eau**. Dans la majorité des études synthétiques révisées, la présence d'eau (et notamment sa gestion) est identifiée comme un facteur qui exerce un effet important sur la consolidation des sols fins (et ainsi sur les tassements derrière l'écran). Le facteur n'est cependant pas quantifié et corrélé au comportement de l'ouvrage comme le sont les facteurs géométriques et géotechniques. C'est un aspect qui mériterait d'être mieux regardé.

Une observation très intéressante faite par les auteurs des études les plus récentes est que la rigidité des systèmes de soutènement a atteint un tel niveau ces dernières années que les faibles déformations qui en résultent sont peu affectées par une augmentation supplémentaire de la rigidité. Il en résulte que d'autres facteurs, habituellement plutôt considérés comme de deuxième ordre, gagnent de l'importance relative par rapport aux facteurs géométriques et géotechniques cités ci-dessus.

En plus, les recherches bibliographiques analysant l'effet de coins sur la stabilité des excavations tridimensionnelles, montrent que plusieurs facteurs qui peuvent influencer les caractéristiques d'effets de coin peuvent être : la largeur et la longueur de l'excavation, les caractéristique de force du sol et formation de strate, l'effet de buttons et de la configuration de l'excavation.

La **1^{ère} partie** du mémoire s'inscrit donc dans le cadre général de l'étude de l'écoulement *bi* et *tridimensionnel* autour des écrans étanches de forme plane, carrée, rectangulaire et circulaire. Plus particulièrement, l'objet de cette partie était de développer des techniques d'expérimentation numériques afin de caractériser le comportement tridimensionnel et axisymétrique 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 qui sont utiles pour l'étude du phénomène de renard. Mais ces travaux présentent un intérêt plus vaste, les modèles *tridimensionnel* et *axisymétrique* étant utilisés dans de nombreux contextes en géotechnique.

En fait, 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 dans le **chapitre III** de cette 1^{ère} partie 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.

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 dans le **chapitre IV**, pour chaque cas étudié (*homogène* ou *hétérogène*), une méthode **numérique** de détermination de la perte de charge critique provoquant le renard.

Dans la **2^{ème} partie** du travail, on a poursuivi la modélisation de l'effet mécanique sur l'ensemble des résultats obtenus dans le cadre du modèle numérique *bi- tridimensionnel* et *axisymétrique*. On a étudié aussi la stabilité du fond de fouille et la stabilité de l'écran étanche pour des cas d'ouvrages réels.

Le comportement mécanique des soutènements est très imparfaitement décrit par les méthodes de calcul classique qui ne permettent pas, en particulier, la prévision des déplacements. Les programmes de calcul sur ordinateur développés très récemment tels que ceux basés sur l'hypothèse du coefficient de réaction ou sur la méthode des éléments finis demandent encore à être confirmés par l'expérience.

Contrairement à la plupart des autres méthodes de calcul des ouvrages, la modélisation par *différences finies* présente l'avantage de permettre d'analyser les déplacements induits par la construction d'un ouvrage dans le terrain environnant, et par là, d'estimer l'impact des travaux sur les ouvrages voisins. Cependant, la mise en œuvre pratique de la méthode suppose de bien analyser au préalable les phénomènes qui ont une influence significative sur le comportement des ouvrages réels et, bien entendu, de disposer de moyens de calcul performants.

Pour ce qui concerne les soutènements d'excavation, il est clair que la première condition pour réaliser une simulation réaliste est, comme pour tout autre ouvrage de géotechnique, de bien connaître les conditions géotechniques, et si l'on veut obtenir des informations quantitatives ou semi-quantitatives, de disposer de reconnaissances approfondies. On s'attend également à ce que la façon dont les travaux sont exécutés ait une influence importante sur les déplacements induits, comme l'illustre par exemple l'étude d'une fouille circulaire proposée par Marten et al. (2003). Par ailleurs, les travaux de Delattre (1999) avaient montré qu'il est également nécessaire de rendre compte, d'une part, des effets des variations de la nappe au cours des travaux, et plus généralement du rôle de **l'eau**, et, d'autre part, de l'influence des **tirants** d'ancrage sur le comportement d'un soutènement.

Dans cette partie de travail, on a abordé ces différents aspects successivement, avant de chercher à valider les méthodes de simulation proposées en les confrontant à des mesures sur des ouvrages réels instrumentés.

Dans les premiers chapitres, on s'est intéressé aux phénomènes de consolidation dans les sols élastoplastiques. La formulation des problèmes est relativement classique, mais, en pratique, la résolution de problèmes complètement **couplés** demeure relativement peu courante, et, à ce titre, continue à paraître délicate. La principale caractéristique d'un problème **couplé** réside dans le fait que la solution dépend du **temps**, et que les déplacements ne peuvent pas, dans le cas général, se calculer indépendamment du champ des pressions interstitielles. Dans certains cas particuliers favorables, on peut envisager de se ramener à une résolution **découplée**, mais la procédure proposée, valide en élasticité à long terme comme à court terme, ne l'est plus dans le cas, le plus courant en géotechnique, où des déformations plastiques peuvent se produire dans le sol : dans ce cas, on risque de **sous-estimer** les déformations plastiques qui peuvent se produire à court terme (en conditions non drainées), ce qui entraîne une erreur que l'on ne peut pas corriger dans la suite du calcul.

Pour autant, une approche **découplée** présente l'avantage d'être extrêmement simple à mettre en œuvre, et nous avons montré qu'elle permet d'aborder, si l'on se contente d'un calcul élastique en première analyse, des phénomènes complexes, comme la redistribution des contraintes sur le revêtement d'un tunnel lors d'une réparation partielle.

Pour traiter les problèmes élastoplastiques, nous avons choisi d'utiliser le mode de calcul hydromécanique couplé avec le code Flac. Nous avons apporté quelques fonctions FISH pour pouvoir simuler les différentes phases de construction d'un ouvrage de soutènement. Ces fonctions consistent à faciliter l'initialisation de l'état de contraintes et de pression lors de l'enchaînement des calculs, à introduire une option permettant de gérer simplement des mouvements de la nappe, et à proposer des options supplémentaires pour l'exploitation graphique des résultats.

Cette deuxième partie du mémoire concerne aussi la modélisation d'ouvrages **réels**. Ayant fait l'objet d'une instrumentation complète et soignée au cours de leur construction, accompagnée d'une bonne caractérisation géotechnique du site, le quai en eau profonde du **port de Calais**, le **quai Osaka du port du Havre** et le quai du **port 2000 au Havre** offrent l'occasion de tester les procédés de simulation numérique par différences finies. La modélisation de ces ouvrages regroupe les trois principaux aspects étudiés auparavant : le phasage de construction, le couplage hydromécanique et l'interaction sol-tirants.

Dans l'ensemble, les résultats de calcul sont en bon accord avec les mesures, surtout pour les déplacements de la paroi et la cinématique de l'ouvrage, en particulier dans le cas du port de Calais. Les modèles numériques, malgré certaines simplifications, permettent de reproduire globalement le comportement des ouvrages. Ces études confirment que le mode hydromécanique couplé avec les fonctions FISH du Flac constitue un outil performant et utilisable pour des études théoriques, et, à l'occasion, pour des études de cas réels.

La modélisation numérique met clairement en évidence le rôle joué par le couplage hydromécanique (lors des rabattements et notamment des remontées de la nappe phréatique), l'influence déterminante des tirants d'ancrage sur le comportement de la paroi, dont la prise en compte suppose d'être capable de décrire l'interaction sol-tirant de manière correcte.

Par ailleurs, ces études numériques confirment l'importance du choix des paramètres adoptés dans le calcul. Ils doivent être choisis avec beaucoup d'attention à partir des résultats d'essais en laboratoire et in situ. Néanmoins, nous avons obtenu des résultats satisfaisants sans procéder à des calages a posteriori des paramètres.

Enfin, il faut signaler que la simulation du remblaiement derrière la paroi et celle de l'interaction sol-tirant restent à améliorer. Ces problèmes nécessitent des études plus approfondies au niveau expérimental et numérique.

L'utilisation de calculs **couplés** se montre très efficace pour simuler le comportement du rideau expérimental de **Rotterdam-Pernis**, qui constitue un très bon exemple d'ouvrage de soutènement pour lequel les étapes d'excavation associent des mouvements complexes du niveau de la nappe. La comparaison des calculs avec les mesures est très satisfaisante pour ce qui concerne les déplacements des parois, les moments de flexion, les pressions latérales du sol et les pressions interstitielles. Les résultats montrent aussi que les mouvements de la nappe et l'évolution du problème dans le temps ont une influence primordiale sur les déplacements des parois. Par ailleurs, les résultats obtenus en mode couplé avec Flac sont bien meilleurs que ceux obtenus avec un calcul **découplé**.

On a également abordé au **chapitre VII** de cette partie, la question de la modélisation de la mise en place d'un panneau de paroi moulée, et de la perturbation du champ de contraintes qui en résulte dans le sol. La mise en place du panneau est simulée en utilisant la théorie de la pression bilinéaire. Les résultats des calculs **couplés tridimensionnels** donnent une idée grossière de la cinématique et de l'ordre de grandeur des déplacements. De plus, la différence de contraintes totales entre la situation après le bétonnage et la situation initiale est relativement faible, ce qui peut justifier des calculs d'excavation dans lesquels on néglige la perturbation du champ de contraintes due à la construction du panneau.

Quant au cas du rideau de palplanches expérimental de **Hochstetten**, Coquiallay, 2005 a montré que le modèle de comportement Fahey et Carter, conserve un défaut important qui est que l'identification des paramètres n'est pas simple, notamment sur la base d'essais en place comme l'essai pressiométrique. L'utilité d'un modèle de comportement est limitée si la détermination des paramètres requiert des moyens inaccessibles dans la pratique courante. Toutefois, il faut garder à l'esprit l'idée qu'il n'est pas cohérent de chercher à utiliser des modèles de comportement ayant une plus grande capacité prédictive que les modèles usuels si l'on refuse de consacrer les moyens

nécessaires à la détermination des paramètres, et à des reconnaissances de qualité de manière plus générale : il y a donc un compromis à trouver.

Dans ce cas, on a montré qu'il est possible, à partir d'une reconnaissance de sol suffisamment complète, d'obtenir une simulation de l'ouvrage très proche de la réalité en phase définitive. Cette étude sur ouvrage instrumenté confirme que le modèle de Mohr Coulomb et de Fahey et Carter convient pour dimensionner des ouvrages réels. En effet, ce dernier donne une réponse très correcte à la fois en termes d'efforts et en termes de déplacements, même si certains défauts subsistent (soulèvement du sol derrière la paroi ou entraînement de la paroi avec le sol qui la fait pencher du mauvais côté).

En **conclusion**, ce travail avait pour objectif de contribuer à améliorer la fiabilité et la représentativité des calculs en stabilité de fond de fouille, prise en compte de effet de l'eau, et déplacements, qui sont actuellement demandés par les règlements, pour des ouvrages en interaction (par exemple dans le domaine du génie civil urbain). Par ailleurs, certains maîtres d'ouvrage demandent que l'on vérifie que la construction à proximité d'un ouvrage qu'ils exploitent ne va pas perturber son utilisation. Enfin, les tassements en zone urbaine au-dessus des tunnels peuvent conduire à des problèmes de contentieux, fissurations des bâtiments, etc.

Dans ce contexte, le travail présenté ici propose un certain nombre de techniques de simulation pour modéliser par différences finies le comportement d'ouvrages de soutènement **complexes**. Nous avons choisi de privilégier une approche **couplée** pour la prise en compte du rôle de l'eau, ce qui conduit à des temps de préparation, d'exécution et de dépouillement des calculs relativement importants, mais les résultats obtenus en confrontant les calculs à des mesures sur des ouvrages réels confirment la validité de ce choix. Moyennant quelques fonctions FISH apportées au code Flac, la prise en compte de phasages de travaux complexes ne pose plus de difficultés particulières. Pour ce qui concerne la modélisation des tirants d'ancrage, on peut dire que l'approche utilisée permet de reproduire qualitativement le comportement des ouvrages instrumentés étudiés, même si le doute demeure sur la qualité de l'estimation des efforts dans le tirant. Ce point pourra faire l'objet de discussions ultérieures. De manière générale, les résultats de calcul sont en accord satisfaisant avec les mesures.

PERSPECTIVES

- ✓ En termes de perspectives, il apparaît clairement que l'effort de développement et de validation de la méthode des différences finies sur des cas réels doit être poursuivi.
- ✓ La deuxième perspective réside dans la poursuite de l'étude du phénomène de renard (détermination de H/f critique) pour le cas des batardeaux tridimensionnels.
- ✓ La troisième perspective réside dans l'amélioration de la simulation du remblaiement derrière la paroi et celle de l'interaction sol-tirant. Ces problèmes nécessitent des études plus approfondies au niveau expérimental et numérique.