

INTRODUCTION GENERALE

L'exécution des excavations soutenues par des écrans pour l'aménagement de sous-sols d'immeubles, de voiries et de parkings souterrains ou encore d'ouvrages d'assainissement s'accompagne de déformations des terrains environnants. Ces déformations, qui peuvent causer des désordres dans le bâti et les réseaux avoisinants, doivent être appréhendées aussi précisément que possible au stade des projets, et contrôlées soigneusement au cours de l'exécution des ouvrages et, idéalement, durant une certaine période après la mise en service de l'ouvrage.

L'analyse des interactions entre les ouvrages de génie civil et les sols, et entre les ouvrages, est une préoccupation de plus en plus forte dans le domaine de la géotechnique, en particulier en milieu urbain lors de la construction d'ouvrages souterrains complexes à proximité de bâtiments existants ou de l'exécution de fouilles à proximité d'immeubles.

En effet, le développement de l'utilisation de l'espace et du sous-sol urbains favorise la superposition et l'imbrication d'ouvrages divers correspondant à des fonctions variées. Il apporte des avantages économiques et sociaux importants, mais son coût est élevé, en raison des contraintes spécifiques au milieu urbain, en particulier la nécessité de limiter les impacts des travaux sur les ouvrages existants. Ce coût justifie que l'on cherche à améliorer les méthodes de conception et de justification des ouvrages.

Les méthodes actuelles, pour la plupart issues de l'expérience acquise sur des ouvrages isolés, reposent le plus souvent sur une analyse de la résistance des ouvrages vis-à-vis de la rupture. L'analyse du comportement des ouvrages au cours de leur construction et en service, et celle de leurs impacts sur les structures avoisinantes, reste limitée à certains types d'ouvrages et manque encore de précision. Il en résulte que les impacts de la mise en place d'un ouvrage sur les structures qui l'entourent (les déplacements provoqués par la réalisation d'un soutènement d'excavation par exemple) restent à l'heure actuelle difficiles à quantifier.

Dans ce travail, on s'intéresse plus particulièrement aux soutènements d'excavation. Des travaux récents (Delattre, 1999) ont permis de faire le point sur le comportement de ces ouvrages, et notamment d'acquérir des données expérimentales sur le comportement d'un certain nombre d'ouvrages réels au cours des différentes étapes, souvent complexes, de leur construction. On dispose ainsi de cas pour lesquels les déplacements, les efforts de flexion dans la paroi et la mobilisation des tirants d'ancrage sont bien documentés, et pour lesquels les conditions géotechniques sont décrites de manière relativement précise. Ces exemples de comportement observé fournissent des éléments pour valider des méthodes de calcul. Par ailleurs, Delattre (1999) a également proposé une synthèse des méthodes disponibles pour analyser le comportement des soutènements, et mis en évidence certaines faiblesses des techniques de modélisation numérique par éléments finis. Ces techniques semblent néanmoins constituer l'une des approches les plus prometteuses pour pouvoir calculer les déplacements induits par la réalisation d'une fouille dans le massif de terrain soutenu.

En effet, l'un des objectifs actuels de la recherche en géotechnique est d'améliorer la prévision des mouvements induits dans un massif de sol par les chargements qu'il subit, notamment lors de la construction d'un ouvrage. On cherche également à prévoir les effets potentiels des travaux sur les structures existantes. Cette problématique constitue un enjeu fort pour les projets souterrains : l'évaluation des tassements provoqués par le creusement d'un tunnel à faible profondeur (et des dommages qui peuvent en résulter), fait l'objet d'une abondante littérature. En dehors du contexte des ouvrages souterrains, certains projets imposent de vérifier que les travaux prévus à proximité d'un ouvrage existant ne vont pas provoquer des déplacements susceptibles d'interrompre ou de perturber son exploitation. De manière plus générale, les règlements de calcul des ouvrages tendent à imposer de vérifier que les déplacements induits par un projet restent dans des limites acceptables. Ces différents éléments imposent de faire progresser les méthodes de calcul des déplacements.

Les méthodes de calcul qui permettent d'évaluer les déplacements, non seulement de

l'ouvrage étudié, mais aussi du terrain et des structures situées à proximité, ne sont pas nombreuses : c'est l'un des atouts de la méthode des différences finies et éléments finis, qui permettent, a priori, de traiter des configurations à peu près quelconques (sur le plan de la géométrie et du phasage de construction) et de calculer les déplacements de l'ensemble du domaine pris en compte dans la discrétisation.

Néanmoins, dans les conditions où la méthode des *éléments finis* est utilisée le plus fréquemment, la méthode reste insuffisante pour deux types de problèmes particuliers : le creusement des tunnels peu profonds et l'excavation d'une fouille soutenue par un écran. Dans les deux cas, l'opération réalisée se traduit par l'application au terrain d'une force verticale vers le haut, égale au poids du terrain excavé. Cette force se traduit généralement dans les calculs par *éléments finis* par un déplacement vertical vers le haut peu réaliste : on obtient souvent un soulèvement de la surface du terrain dans le cas d'un tunnel, et un mouvement de l'écran de soutènement vers le terrain et non pas vers la fouille dans le cas d'un soutènement. Ces mouvements calculés sont en contradiction avec les cinématiques observées généralement, qui correspondent à un mouvement de tassement de la surface du sol au-dessus d'un tunnel, et un mouvement de l'écran de soutènement vers la fouille.

L'origine physique du mouvement prévu par le calcul est claire : elle provient de l'application d'une force vers le haut. En revanche, la réponse du sol à ce déchargement est mal reproduite par le calcul par *éléments finis*. Une des principales causes de ce problème est probablement le fait que l'on ne tient pas compte, lorsque l'on utilise les lois de comportement habituelles, du fait que le module du sol en déchargement est différent, en général nettement plus fort, que son module en chargement. Il est donc naturel de chercher à décrire le comportement des sols plus fidèlement que ne le font les modèles classiques de la mécanique des sols pour améliorer les résultats fournis par les calculs.

La façon la plus simple d'aborder la question des soulèvements excessifs ou intempestifs dans les problèmes d'excavation consiste à faire varier les modules avec la profondeur, de telle sorte que les couches plus profondes soit plus raides. On introduit donc une hétérogénéité de comportement, en espérant qu'elle permette de corriger la réponse calculée. Sur le plan mathématique le problème posé reste linéaire, au moins tant que le sol reste dans le domaine élastique : cette approche met donc en jeu des modules qui restent constants en un point donné au cours du calcul (mais dépendent du point considéré). Avec ce type de modèle, on peut obtenir une réponse globale à l'excavation plus raide qu'avec des modules identiques en tout point et constants. Il faut noter cependant que, tant que les déformations restent élastiques, il n'y a pas de distinction entre les modules en chargement et en déchargement.

Le travail présenté dans ce mémoire aborde la problématique de la mise hors d'eau, et des déplacements liés aux travaux et plus précisément les moyens de faire progresser la représentativité des calculs par *différences finies* pour traiter ces problèmes. On cherchera donc à traiter les principales difficultés qui, comme pour d'autres méthodes de calcul, sont liées à la prise en compte dans les calculs des effets de *l'eau*, d'une part, et du rôle joué par les *tirants* d'ancrage, d'autre part.

Dans ce contexte, on se propose de faire progresser la simulation numérique par *différences finies* pour améliorer la prise en compte de la complexité réelle des ouvrages, notamment du phasage de construction, et pour pouvoir estimer les impacts des travaux sur les ouvrages existants. On cherchera à valider la démarche de modélisation proposée en confrontant les résultats numériques à des mesures réalisées sur des ouvrages réels.

Le travail réalisé dans le cadre de la présente thèse participe à cet objectif. Il est découpé en **deux** parties.

1^{ère} partie : Excavation profonde en site urbain, fluvial et maritime - Problèmes liés à la mise hors d'eau.

Cette partie est scindée à **quatre** chapitres.

Le **premier chapitre** est consacré à la présentation de deux approches qui ont été privilégiées jusqu'ici pour prévoir les déformations liées à l'exécution des ouvrages.

L'approche **empirique** repose sur l'idée que le comportement d'un ouvrage donné devrait peu différer de ceux d'autres ouvrages construits dans des conditions voisines. Cette méthode a prouvé sa pertinence dans de nombreux champs de la géotechnique, en particulier dans le domaine des fondations. Dans le domaine des excavations, elle constitue la base de nombreux règlements de calculs à l'étranger (distributions d'efforts aux Etats-Unis et en Allemagne, déformations associées à la construction des ouvrages, aux Etats-Unis et au Japon) mais n'a pas été développée en France.

L'approche par le **calcul**, fondée à l'origine sur des modèles très simplifiés, s'est progressivement perfectionnée pour conduire aux méthodes numériques actuelles (*éléments finis, différences finies*) qui permettent de prendre en compte de multiples aspects du problème. Cependant, malgré les efforts faits depuis les années 1970, ces méthodes se heurtent à deux obstacles principaux : d'une part, la difficulté d'identifier des lois représentatives du comportement des sols à l'échelle des massifs de sols et, d'autre part, l'absence de prise en compte des conditions réelles de construction des ouvrages (caractère trop fortement tridimensionnel, couplages de phénomènes multiples). Les résultats des calculs peuvent pour cette raison rester relativement éloignés des comportements d'ouvrages observés.

Cette première partie comprend aussi une étude bibliographique sur le suivi du comportement d'écrans de soutènement. L'étude s'attache en particulier à rappeler les paramètres multiples qui influencent le comportement de la structure et de ses alentours, de façon à pouvoir interpréter le comportement d'ouvrages individuels dans le cadre plus général des « comportements repères ». On s'appuie sur les travaux synthétiques effectués depuis la fin des années 1960, qui étudient les paramètres influençant le comportement des écrans de soutènement selon des aspects variés. Les parallèles et les différences entre les approches sont discutés.

En réalité, les excavations sont à trois dimensions (3D) dans la nature. Par conséquent, en dernier lieu, cette partie inclut une recherche bibliographique concernant les effets de coins sur la stabilité des excavations. Cette bibliographie montre que l'effet de coins des excavations tridimensionnelles participe à la stabilité des excavations. Les méthodes 2D **surestiment** la déflexion des écrans étanches.

Le **chapitre II** est consacré à la présentation de l'outil numérique utilisé dans cette étude et les lois de comportement adoptées dans les modèles numériques élaborés.

Dans le **chapitre III**, nous allons implanter tous ces modèles dans le code de calcul aux différences finies Flac3D et Flac2D. La démarche consiste de déterminer les caractéristiques hydrauliques : débit d'exhaure, pressions interstitielles et les pertes de charge. L'étude de l'effet tridimensionnel et axisymétrique sur les différents calculs obtenus, les résultats, les graphes et les discussions de ces derniers font aussi l'objet de ce chapitre.

L'étude numérique du phénomène de renard en faisant évaluer la perte de charge critique qui cause la rupture du sol par le phénomène de renard sous ses deux formes : **boullance** et **soulèvement** sera la tâche du **chapitre IV**.

La **deuxième partie** est consacrée à la prise en compte des **couplages hydromécaniques** dans les calculs par *différences finies*, c'est-à-dire du rôle de l'eau. Le **chapitre V** présente les différentes manifestations de ces couplages dans la réalisation d'un soutènement d'excavation, et rappelle la formulation mathématique des problèmes de couplage.

Le **chapitre VI** est consacré à la modélisation de **trois** ouvrages de soutènement réels instrumentés. Les deux premiers sont le quai en eau profonde du **port de Calais, le quai Osaka du**

port du Havre et le port 2000 au Havre qui a été suivi de sa construction en décembre 2002 jusqu'à la fin des travaux principaux en septembre 2004. Par ailleurs, les mesures sont poursuivies afin d'enregistrer le comportement de l'ouvrage en phase d'exploitation. Une première exploitation des données est proposée sous forme d'une modélisation numérique par différences finies dans ce chapitre. La construction du mur de quai, avec les différentes phases de travaux et les mouvements de nappe, a été modélisée en utilisant un mode couplé du code Flac. Il s'agit de **trois** ouvrages dont le phasage de construction est complexe, et dont le comportement est conditionné par les mouvements de nappe de part et d'autre de la paroi et par la mobilisation des tirants d'ancrage. Ces trois simulations permettent de tirer parti des instrumentations soignées dont ces ouvrages ont fait l'objet [voir par exemple Delattre (1999), Delattre et al. (1999), Delattre et Mespoulhe (1999)] pour mettre en évidence le bon accord entre les simulations numériques et les mesures effectuées sur les ouvrages.

À partir du **chapitre VII**, on prend donc le parti de résoudre le problème en prenant en compte complètement le couplage hydromécanique. On utilise pour cela le mode de calcul couplé du code Flac. Comme l'utilisation de calculs couplés est relativement moins courante que celle des calculs mécaniques classiques, on donne une présentation détaillée des précautions à prendre, des étapes de la constitution des jeux de données, et de la démarche que l'on a suivie pour s'assurer que le programme de calcul utilisé permettait effectivement de modéliser les travaux de réalisation d'un soutènement en présence d'eau. On mentionne également les fonctions **FISH** qui ont été apportées au code de calcul.

Donc, le **chapitre VII** s'intéresse au cas particulier des murs de soutènement, qui sont des ouvrages du génie civil fréquemment construits en site urbain et pour lesquels les prévisions des déplacements induits par leur construction dans le sol environnant manquent de précision. On propose **trois** cas de mise en œuvre des calculs couplés pour la modélisation d'ouvrages expérimentaux réels relativement simples, pour lesquels on dispose d'une bonne description du site et qui ont fait l'objet d'une instrumentation. Il s'agit de la *fouille expérimentale de Rotterdam-Pernis* ; la modélisation tridimensionnelle d'une barrette de *fondation de grandes dimensions réalisée à Hong-Kong*, et enfin l'expérimentation, menée dans le cadre d'un concours de prévision pour lequel de nombreux résultats sont disponibles, du rideau de *palplanches expérimental construit et instrumenté en 1993 à Hochstetten (Allemagne)*, par l'université de Karlsruhe. Dans ce chapitre, on compare les déplacements calculés avec les mesures, en discutant l'influence de la méthode de détermination des paramètres (à partir d'essais en place ou en laboratoire), du modèle de comportement du sol ou de la modélisation adoptée pour le rideau de palplanches lui-même.

Enfin, les conclusions générales de cette étude sont dégagées, des perspectives et des recommandations proposées.