

Principes de modélisation numérique en travaux de fondations

1 Modélisation numérique

Modéliser consiste à proposer une idéalisation de la réalité. Cet acte généralement réducteur – nous sommes rarement en mesure de tout comprendre et de tout représenter correctement – peut être théorique, physique ou numérique, raison pour laquelle on précise par un adjectif le sens qu'on veut lui donner. Ainsi, lorsque les équations régissant un problème ne peuvent être résolues analytiquement (modèle théorique), la modélisation numérique permet de trouver une solution approchée à ce problème par une discrétisation dans l'espace et éventuellement dans le temps. Ce type de méthodes nécessitant souvent un grand nombre de calculs, elles ont surtout pris leur essor lors de l'avènement de l'informatique.

Les modèles utilisés en génie civil proposent une idéalisation de la structure, des sollicitations et du comportement des matériaux afin de pouvoir prévoir et justifier la tenue des ouvrages (sécurité structurale et aptitude au service). Selon la phase du projet, la modélisation de l'ouvrage ne sera pas la même :

- En phase de conception et de dimensionnement (études préliminaires, avant-projet), il convient de largement privilégier les techniques et méthodes de calcul traditionnelles conformes à l'expertise et l'expérience. A ce niveau, la modélisation ne doit jamais être complexe et doit rester pragmatique. L'utilisation de méthodes numériques peut cependant se justifier si certaines tâches sont répétitives, par exemple si un même modèle peut être utilisé pour examiner diverses variantes constructives (optimisation).
- Lors du projet d'exécution, la part relative des méthodes traditionnelles et des modélisations numériques peut varier fortement en fonction du type de l'ouvrage et de son environnement. Pour l'étude d'une structure courante dans une zone non sensible (crédits d'étude faibles), des modèles simplifiés éprouvés existent et il n'y a pas lieu d'entreprendre des calculs démesurés. Par contre, si l'ouvrage est complexe et dans un environnement délicat (zones urbaines, zones protégées, etc.), une modélisation numérique est susceptible de mieux rendre compte du comportement de l'ouvrage et de son impact sur le voisinage.

Une bonne modélisation numérique devrait résulter d'un partenariat de spécialistes : l'expert ou l'ingénieur qui connaît le fonctionnement de l'ouvrage et les techniques de construction, et le numéricien spécialiste des théories et des méthodes de résolution qui sait calculer. Sur ce point, Prat & al. [1] proposent les caricatures suivantes : ceux qui modélisent sans calculer ou qui calculent sans modéliser, ceux plus soucieux de l'ouvrage que du calcul ou ceux plus soucieux du calcul que de l'ouvrage. Ces images expriment cependant une réalité essentielle : l'acte de modélisation ne se résume pas à la réalisation d'un calcul, mais intègre diverses étapes qui doivent impérativement précéder, accompagner et suivre le calcul proprement dit [2]. Ce sont :

- La réalisation d'une analyse préalable au calcul. Des questions fondamentales telles que : « quel type d'étude dois-je réaliser ? (ELU ↔ ELS, 2D ↔ 3D, court et/ou long terme, etc.) ; à quoi doit servir mon modèle ? (étude de variantes, dimensionnement, vérification) ; de quels résultats ai-je besoin ? » sont souvent oubliées alors qu'elles vont orienter la modélisation. Ce sont en effet les réponses à ces questions qui permettent de choisir entre les nombreux modèles et programmes qu'il est possible d'envisager a priori pour une structure donnée.
- La justification de chaque étape dans l'élaboration du modèle. Le jeune ingénieur a plutôt tendance à se focaliser sur l'outil de modélisation et non sur l'élaboration d'un modèle, processus qui nécessite un nombre important de justifications afin d'assurer la représentativité du calcul.
- La vérification des résultats obtenus, une analyse des sorties graphiques ne se résumant pas à un simple constat ! La tentation est souvent grande d'accepter telles quelles les belles sorties couleurs, alors qu'il est absolument indispensable que les résultats soient comparés aux ordres de grandeur obtenus par des méthodes simples et qu'ils soient confrontés aux mesures et observations faites en pratique sur des ouvrages analogues.

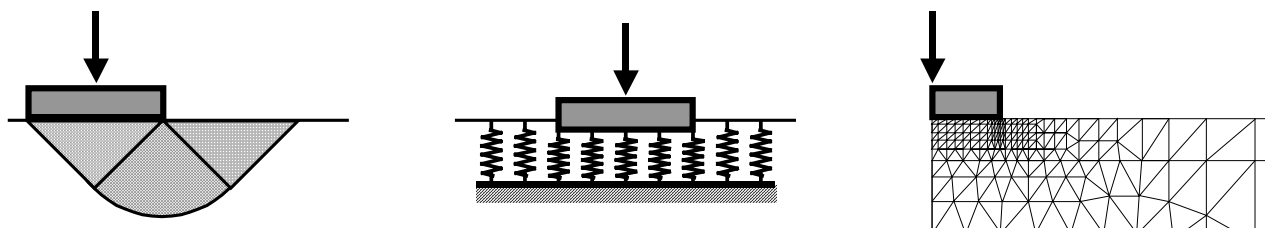


Figure 1 : Diverses idéalizations de l'interaction d'une fondation superficielle avec un massif de sol

2 Spécificités de la modélisation en géotechnique

Contrairement à une majorité des matériaux utilisés dans le domaine du génie civil qui sont fabriqués par l'homme, les sols et les roches ont une origine naturelle. En plus des hétérogénéités et variabilités spatiales rencontrées sur tout site - Dame Nature est très capricieuse -, les géomatériaux présentent un comportement particulièrement complexe à modéliser : anisotropie, non-linéarité marquée, réponse différée (consolidations primaire et secondaire), influence de l'histoire de chargement, etc. Au vu de cette méconnaissance et de cette complexité, l'étude des ouvrages géotechniques se doit d'être globale, réunissant des approches empiriques, analytiques, physiques, numériques et métrologiques. En procédant de la sorte, il est possible de mieux appréhender les phénomènes en jeu et, par comparaison des diverses solutions, de réduire au minimum les erreurs d'évaluation qui peuvent résulter des déficiences de chacune des approches prises individuellement.

Comme illustré schématiquement à la figure 1 pour une fondation superficielle, la modélisation numérique d'un ouvrage géotechnique peut être effectuée de diverses manières, selon la façon dont on idéalise l'interaction de la structure avec le massif de sol ou de roche.

- Les méthodes aux équilibres limites ultimes considèrent le comportement du géomatériau comme rigide-plastique. On ne peut donc réellement parler d'interaction puisque les actions du sol sur l'ouvrage et réciproquement de l'ouvrage sur le sol sont indépendantes du déplacement relatif sol-structure. Les programmes de calcul basés sur ce modèle de comportement rigide-plastique résultent dans une majorité de cas d'une implémentation d'équations pouvant être également résolues à la main.
- La méthode aux modules de réaction, encore appelée méthode des ressorts ou de Winkler, assimile le massif au contact de l'ouvrage à une infinité de ressorts placés les uns à côté des autres et travaillant indépendamment les uns des autres. Cette schématisation de l'interaction entre le sol et la structure n'a pas de justification physique et de plus la raideur des ressorts n'est pas un paramètre intrinsèque du sol. Malgré ces limites, cette méthode de calcul conserve un intérêt indéniable pour estimer rapidement les efforts internes et la déformée d'ouvrages souples dans le domaine des charges de service (comportement élastique linéaire) ; par contre, elle devrait être évitée pour des ouvrages rigides et pour l'évaluation de mouvements absolus.
- Finalement, viennent des modélisations beaucoup plus complexes dans lesquelles le massif est considéré comme un milieu continu ou discontinu. Il s'agit des méthodes des intégrales frontières, des éléments finis et des différences finies pour l'étude de milieux continus (pouvant présenter des discontinuités localisées) et de la méthode des éléments distincts pour l'analyse de milieux discontinus. Dans ces méthodes, l'interaction entre l'ouvrage et le massif ne peut être correctement modélisée que moyennant l'introduction d'éléments de contact (ou interface) autorisant un glissement ou décollement entre la structure et le sol (figure 2) et permettant l'introduction de caractéristiques de résistance réduites.

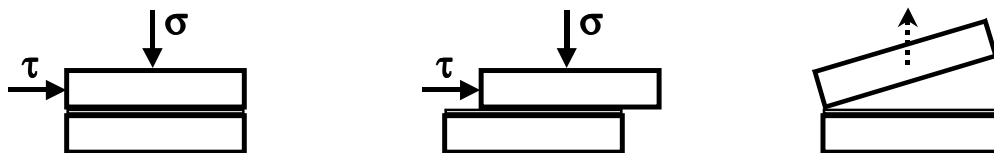


Figure 2 : élément de contact autorisant un glissement ou un décollement

Comme expliqué auparavant, le choix de la méthode de calcul dépend de la phase d'étude, des résultats attendus et... des budgets à disposition ! On gardera également à l'esprit que les belles sorties graphiques et les nombreuses possibilités offertes par certaines méthodes et/ou logiciels ne constituent certainement pas une garantie de pertinence et de qualité des résultats.

Parmi les facteurs qui conditionnent le plus les résultats d'une modélisation numérique en géotechnique, on trouve indéniablement le modèle constitutif choisi pour représenter (idéaler) le comportement du géomatériau ainsi que les paramètres mécaniques utilisés. L'importance du modèle de comportement ressort par exemple d'un travail de comparaison de modélisations physiques et numériques effectué à la City University [3]. Lors d'essais de chargement en centrifugeuse de modèles de fondation superficielle circulaire reposant sur un massif de kaolin surconsolidé (figure 3a), un soulèvement de la surface du sol a été observé à proximité de la fondation pratiquement dès le début de la sollicitation (les losanges de la figure 3b correspondent à la situation mesurée pour la moitié de la charge de poinçonnement). Alors qu'un calcul aux éléments finis avec un modèle de comportement conventionnel du type Cam-clay (et donc a fortiori un Mohr-Coulomb élastique-linéaire parfaitement-plastique) prédit une cuvette de tassement élastique pour un tel niveau de sollicitation, le calcul avec un modèle de comportement à écrouissage cinématique (3SKH) permet de reproduire le soulèvement observé.

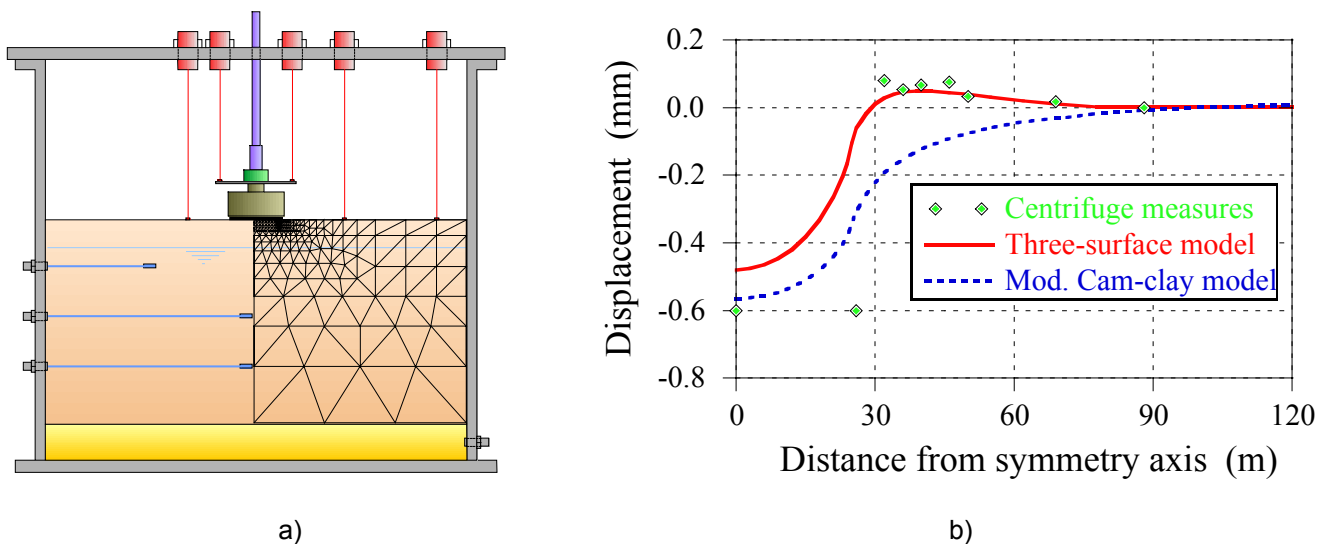


Figure 3 : Chargement en centrifugeuse d'un modèle de fondation superficielle circulaire. Estimation par deux modèles de comportement du soulèvement observé en surface [3].

Traiter des principes de modélisation numérique en géotechnique est un sujet très vaste qui fait l'objet de plusieurs ouvrages volumineux [1, 2, 4, 5], raison pour laquelle on ne traitera ci-après que le cas des fouilles en terrain meuble.

3 Fouilles en terrain meuble

A côté des méthodes de calcul « à la main » (solutions analytiques et/ou méthodes empiriques, fruits de l'expérience acquise sur des ouvrages analogues), les modélisations numériques les plus couramment utilisées pour étudier les fouilles en terrain meuble et les écrans de soutènement sont la méthode aux modules de réaction (logiciels Denebola, Rido, SPW-Delft...), les méthodes des éléments finis (logiciels Z_Soil, Plaxis, Crisp, Abaqus, César...) et des différences finies (Logiciel Flac).

3.1 Méthode aux modules de réaction

Actuellement, le calcul des écrans de soutènement de fouilles fait encore largement appel à la méthode aux modules de réaction qui schématise l'action du sol par un ensemble de ressorts horizontaux indépendants. L'expérience montre en effet que moyennant le choix judicieux de la loi de réaction et de quelques paramètres, il est possible d'obtenir une estimation raisonnable des sollicitations et déformations d'un écran, pour les différentes phases de travaux et d'exploitation. De plus, de par sa simplicité et sa rapidité, cette méthode s'avère très intéressante pour comparer des variantes lors de la conception d'un ouvrage, mais aussi comme outil d'analyse dans le cadre de l'application de la méthode observationnelle.

Sur base de divers travaux de recherches et d'expérimentations sur ouvrages réels, des recommandations d'utilisation ont été proposées par Josseaume [6], Balay [7], Josseaume & al. [8]. Elles portent notamment sur :

- Le choix du module de réaction, ce paramètre dépendant non seulement de la déformabilité du terrain et de sa nature (pulvérulent, cohérent), mais aussi de la rapidité de la sollicitation (valeurs court et long terme différentes pour les sols peu perméables) ainsi que des dimensions et de la rigidité de l'écran.
- Le choix du type de comportement du sol sollicité en déchargement (schémas extrêmes réversible ou parfaitement irréversible, ou autres) le mieux adapté pour décrire la réaction du terrain situé à l'intérieur de la fouille lors du terrassement de celle-ci.
- L'influence sensible de l'état de pression initiale du sol sur les résultats des calculs. Toutes autres choses étant égales, une contrainte horizontale préexistante élevée augmente la pression du sol derrière l'écran ainsi que la réaction sous le fond de fouille, le sol se rapprochant dès lors de l'état limite passif.
- L'importance du respect de la séquence de construction dans les calculs. Une nouvelle phase de calcul peut être associée à la modification de plusieurs données : produit d'inertie de l'écran, niveaux de sol et de nappe de part et d'autre de l'écran, surcharges à la surface du sol ou efforts appliqués sur l'écran, introduction d'appuis (étais, tirants, dalles) ou de nouvelles conditions aux limites...

3.2 Méthode aux éléments finis

Les méthodes qui analysent le sol comme un milieu continu (éléments finis, différences finies, voire intégrales frontières ou couplage de ces méthodes) sont théoriquement plus complètes et plus correctes que les autres modélisations. Cependant, malgré des résultats encourageants, ces calculs n'ont pas encore véritablement fait leurs preuves pour les écrans de soutènement. La pratique montre notamment que la qualité - et même la pertinence - des résultats dépend de très nombreux choix et facteurs, tels que : maillage, conditions aux limites, modélisation de la structure et de l'interface, séquences de construction, état initial des contraintes, type de calcul et surtout modèle constitutif.

3.2.1 Maillage

Un maillage d'éléments finis doit représenter correctement la géométrie de la structure et des couches de sol mises en évidence par les reconnaissances. Il doit être construit en considérant les points suivants [1] :

- Le maillage doit être suffisamment fin dans les zones les plus sollicitées, c'est-à-dire dans les zones où les plus fortes variations de déplacements et de contraintes sont attendues. Ces variations sont occasionnées soit par un chargement important, soit par la présence de singularités géométriques (paroi, fondation, angle vif, changement d'épaisseur), soit encore par des caractéristiques mécaniques localement déficientes ou renforcées par rapport à celles du milieu environnant (inclusion, renforcement).
- Le rapport « grande dimension sur petite dimension » des éléments doit rester proche de l'unité, en particulier dans les zones de forts gradients. Pour ne pas perturber les calculs, les triangles doivent ressembler le plus possible à des triangles équilatéraux, les quadrilatères à des carrés.

Les termes de maillage grossier et de maillage fin sont relatifs et il n'est possible d'affirmer qu'un maillage est suffisamment fin pour traiter un problème que lorsque l'ingénieur possède déjà l'expérience de ce type de calcul ou qu'il a effectué une autre modélisation avec un maillage plus raffiné. Si la différence entre les résultats est faible, le raffinement n'est pas nécessaire. En revanche, si des différences significatives apparaissent, le raffinement est indispensable et l'étude doit être poursuivie avec un maillage plus raffiné [1]. Le temps calcul croissant très rapidement avec le nombre d'éléments, il est généralement nécessaire de trouver un compromis précision/coût numérique pour la modélisation.

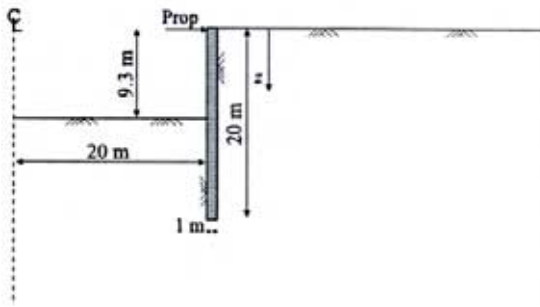
3.2.2 Conditions aux limites

Le type de conditions aux limites du maillage (déplacement imposé ou force imposée) ainsi que la distance à laquelle ces conditions sont prescrites sont susceptibles d'influencer les résultats des calculs aux éléments finis. En ce qui concerne la nature des conditions imposées aux frontières du maillage, celle-ci a relativement peu d'influence sur les résultats à proximité de la fouille pour autant que l'extension verticale et latérale du modèle soit suffisante. A titre d'exemple, l'utilisation d'appuis fixes aux limites inférieure et latérales d'un maillage (déplacements vertical et horizontal empêchés) en lieu et place d'appuis à rouleau porte très peu à conséquence sur les déplacements et contraintes calculés dans le voisinage de la fouille, tant que les frontières sont choisies suffisamment éloignées de celle-ci.

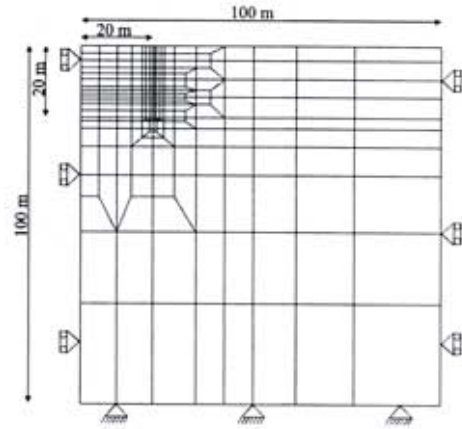
L'influence de l'extension verticale et latérale du maillage sur les résultats des modélisations est nettement plus significative. Cependant, vu qu'elle dépend du type de problème étudié, de la stratigraphie (horizon dur ou rocher en profondeur), du modèle de comportement retenu pour le sol et du type de résultats attendus (efforts internes dans la paroi, déplacements horizontaux, cuvette de tassement...), il n'existe pas de critère unique permettant d'assurer un bon compromis précision/coût numérique. Pour cette raison, comme il a été suggéré précédemment pour la taille des éléments du maillage, il est recommandé d'effectuer une rapide étude paramétrique afin de déterminer si une extension verticale et/ou latérale du modèle est nécessaire ou superflue.

A titre illustratif, on évoquera une étude paramétrique faite par Potts & Zdravkovic [5] pour évaluer l'influence de l'extension verticale et latérale d'un modèle d'éléments finis sur la prédiction des tassements générés lors de la réalisation d'une fouille. La géométrie du problème considéré est illustrée à la figure 4-a : fouille de 40 m de largeur et 9.3 m de profondeur soutenue par une paroi rigide de 1 m d'épaisseur, 20 m de profondeur et étayée en tête. La figure 4-b représente le modèle de base retenu pour l'analyse, avec un axe de symétrie au centre de la fouille (appuis à rouleau), une frontière latérale (appuis à rouleau) à 100 m de cet axe et une frontière inférieure (appuis fixes) à 100 m sous la surface. L'étude paramétrique a consisté, pour deux modèles de comportement du sol - modèle élastique-linéaire parfaitement plastique de Mohr-Coulomb et modèle hautement non-linéaire proposé par Jardine & al. [9] - à analyser l'influence sur la cuvette de tassement en surface d'une réduction de la profondeur et d'une augmentation de la largeur du maillage :

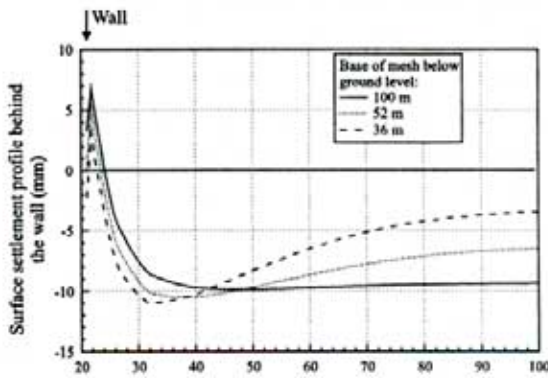
- Fig. 4-c : influence de la profondeur (100, 52, 36 m) pour le modèle de Mohr-Coulomb ;
- Fig. 4-d : influence de la largeur (100, 180, 340 m) pour le modèle de Mohr-Coulomb ;
- Fig. 4-e : influence de la profondeur (100, 52, 36 m) pour le modèle de Jardine & al. ;
- Fig. 4-f : influence de la largeur (100, 180, 340 m) pour le modèle de Jardine & al..



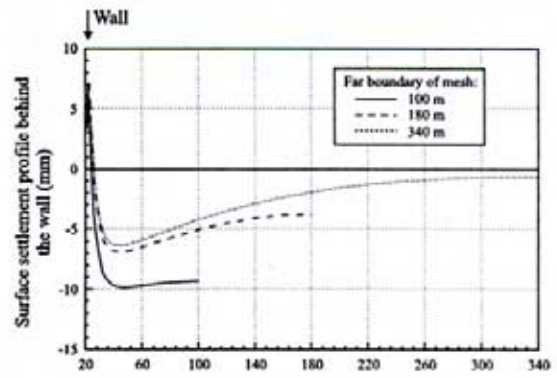
a) géométrie de la fouille étudiée



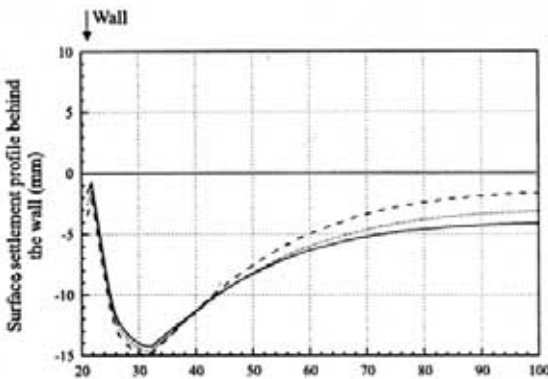
b) maillage retenu pour l'analyse



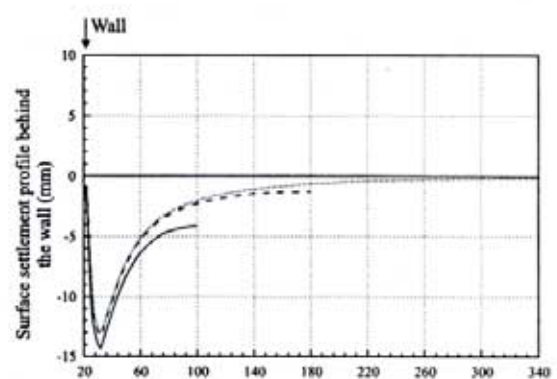
c) influence de la profondeur pour le modèle de Mohr-Coulomb



d) influence de la largeur pour le modèle de Mohr-Coulomb



e) influence de la profondeur pour le modèle de Jardine & al.



f) influence de la largeur pour le modèle de Jardine & al.

Figure 4 : Etude pour deux modèles de comportement du sol de l'influence sur la cuvette de tassement d'une réduction de la profondeur et d'une augmentation de la largeur du maillage [5].

Outre l'importance considérable du modèle de comportement sur la prédiction de la cuvette de tassement en surface (cf. point 3.2.7), il ressort de ces analyses que :

- la profondeur du maillage a moins d'influence que sa largeur ;
- le choix de l'extension verticale et latérale à donner au maillage est fortement tributaire du modèle de comportement retenu pour le sol.

3.2.3 Modélisation de la structure et de l'interface

Schweiger [10] et Carter & *al.* [11] décrivent un exercice de comparaison de programmes de calcul effectué sur un problème de fouille, certes factice, mais parfaitement défini en terme de géométrie, séquence de construction (terrassément et étayage), modèle constitutif (élastique-linéaire parfaitement plastique avec un critère de rupture de Mohr-Coulomb) et propriétés mécaniques. Bien que toutes ces caractéristiques du problème étaient clairement stipulées et que par conséquent les résultats des calculs auraient dû être consistants, une large dispersion de ceux-ci a été constatée, et ce déjà pour la première étape de construction où la paroi était simplement fichée (terrassément de 4 m et aucun étayage). A côté d'une probable mauvaise interprétation par certains modélisateurs des données spécifiées, Schweiger [10] explique les écarts de prédictions par des modélisations différentes de la structure et par l'utilisation ou non d'éléments de contact entre la paroi et le sol.

Les sources de divergence des résultats peuvent effectivement être nombreuses :

- Une paroi de soutènement peut être modélisée au moyen d'éléments de poutre ou d'éléments de massif. Le premier type est conseillé pour des parois de faible épaisseur ; il conduit à des résultats extrêmement proches des solutions théoriques de la résistance des matériaux et fournit des efforts internes nécessaires à la justification des projets. En revanche, les éléments de massif sont plutôt à utiliser pour des sections plus massives (p. ex parois moulées) ; ils conduisent également à des résultats proches des solutions de référence en résistance des matériaux, quoique variables avec le coefficient de Poisson, mais fournissent des champs de contraintes qu'il n'est pas toujours aisé de transformer en efforts internes.
- Les autres éléments structuraux tels qu'étais, tirants d'ancrage ou dalles de l'ouvrage, peuvent être représentés de diverses manières (Fig. 5) : force imposée, déplacement imposé, appui élastique ou encore poutre. Le choix de la modélisation dépend de la rigidité de l'élément, de sa mise en place et de son fonctionnement. Une attention particulière doit être portée à la liaison entre les divers éléments structuraux car elle conditionne la transmission des efforts internes.
- Une autre difficulté peut venir de la troisième dimension du problème. Certains éléments de structure présentant une géométrie et des propriétés constantes sur la longueur de la fouille (parois moulées, dalles continues) satisfont l'hypothèse d'état plan de déformation et ne posent dès lors aucune difficulté de modélisation en 2D. Par contre, la réalisation de tels calculs en état plan de déformation pour des éléments dont la géométrie et/ou les propriétés varient dans la troisième dimension (parois clouées, berlinoises ou de pieux ; butons, tirants d'ancrage) nécessite l'estimation préalable de rigidités axiale EA et flexionnelle EI moyennes par mètre courant de paroi. Selon que des éléments de poutre ou de massif sont utilisés pour modéliser la paroi, ces rigidités peuvent être directement introduites comme caractéristiques ou doivent être converties en une épaisseur et un module d'élasticité équivalents (éléments de massif).
- L'absence d'éléments particuliers dits de contact ou d'interface entre le massif de sol et la structure de soutènement revient à considérer une adhérence parfaite entre les matériaux. Cette hypothèse, tout à fait inexacte, peut conduire à des efforts internes et déplacements de l'ouvrage complètement erronés, comme des parois simplement fichées retenues vers l'arrière par le massif de sol (déplacements vers le terrain et non vers la fouille) ! Par contre, l'interaction sol-structure sera correctement modélisée moyennant l'introduction d'éléments de contact (ou interface) dont le comportement est décrit par un critère de frottement du type Mohr-Coulomb (pour permettre le glissement), combiné avec un critère de résistance à la traction (pour autoriser ou non le décollement) et un critère de non-pénétration (pour respecter la mécanique des solides). Les figures 6-a et 6-b, tracées avec le même facteur de majoration des déplacements et obtenues par des calculs respectivement sans et avec interface, permettent de se rendre compte de l'influence significative des éléments de contact sur les mouvements prédits à proximité d'une fouille (et dès lors sur les efforts internes dans la paroi).

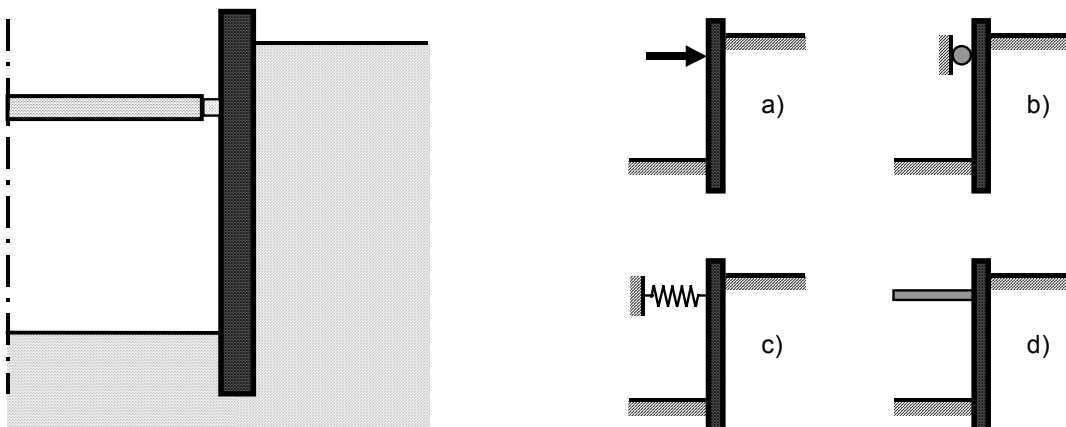


Figure 5 : Diverses représentations possibles d'un étai

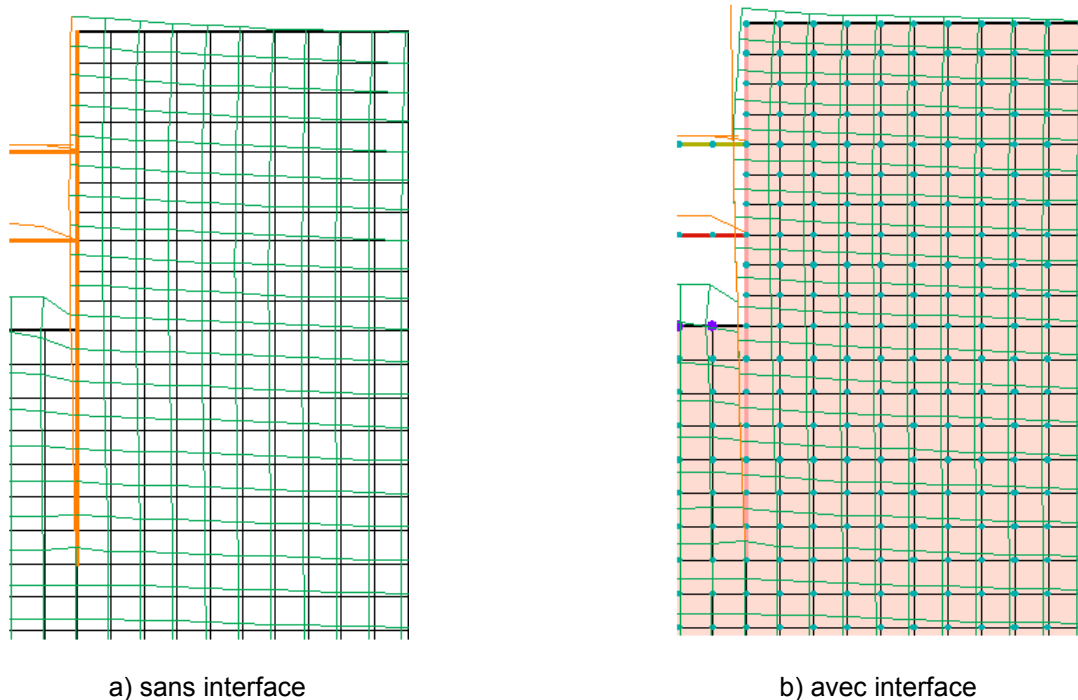


Figure 6 : Influence d'un élément interface sur les mouvements autour d'une fouille (calcul Z_Soil)

3.2.4 Modélisation de la séquence de construction

Dans des conditions de terrain et d'eau données, les sollicitations d'une paroi de fouille et des autres éléments structuraux (étais, tirants d'ancrage, dalles de l'ouvrage) sont fonction de la méthode de construction (cut and cover, en taube...), de la séquence de réalisation (terrassment, étayage...) ainsi que de la durée des phases [12]. Il en est de même pour l'étendue et l'amplitude des mouvements se développant autour de la fouille.

Comme dans la réalité, la modélisation de l'interaction d'une paroi avec un massif de sol est un problème hyperstatique et non-linéaire. Les résultats des calculs dépendant des diverses étapes intermédiaires et de leur modélisation plus ou moins fine (surtout si l'on utilise des modèles de comportement tenant compte de la haute non-linéarité des sols), il est important de reproduire au mieux la séquence de réalisation de l'ouvrage. Ceci devient même essentiel lorsque les modélisations numériques sont utilisées pour examiner diverses variantes constructives (optimisation d'un projet).

3.2.5 Etat initial des contraintes

L'état naturel des contraintes dans un massif de sol dépend de l'histoire géologique qu'il a subie et est extrêmement difficile à quantifier. Cependant, il convient d'estimer au mieux la grandeur et la direction des contraintes principales préexistantes car celles-ci sont susceptibles d'influencer de façon considérable le comportement de la fouille et de la paroi de soutènement [13].

Ainsi, à conditions de sol équivalentes, des contraintes horizontales préexistantes élevées vont induire une plus grande poussée du sol derrière l'écran ainsi qu'un état de contraintes sous le fond de fouille plus proche de l'état limite de butée. Cette sollicitation affecte les efforts internes dans la paroi, génère des déplacements horizontaux plus importants, notamment sous le fond de fouille, et augmente tant l'amplitude que l'étendue des tassements induits par la fouille.

La modélisation correcte de la réponse d'un massif de sol et d'une paroi de soutènement lors de la réalisation d'une fouille nécessite donc une connaissance adéquate de l'état de contraintes initiales dans le terrain (y compris les conditions hydrauliques). De plus, en cas d'utilisation de modèles de comportement permettant de tenir compte de l'historique des contraintes subies par le sol, il est nécessaire de spécifier le(s) paramètre(s) représentant cette influence (p. ex pression de consolidation dans le modèle de Cam-clay).

3.2.6 Type de calcul

Comme signalé dans l'introduction, préalablement à la réalisation d'un calcul numérique, il est fondamental de se poser un certain nombre de questions qui vont orienter la modélisation. Relevons-en trois plus spécifiques à la géotechnique :

- Quelle échelle temporelle dois-je choisir pour étudier le problème ? L'analyse peut ainsi porter uniquement sur le comportement à court terme ou à long terme de l'ouvrage, ou s'intéresser à son évolution au cours du temps. Un des critères guidant ce choix consiste à comparer la vitesse de sollicitation (durée d'exécution de la fouille) à la vitesse de consolidation du sol.
- Quelles contraintes et quelles caractéristiques des matériaux dois-je utiliser ? Un calcul peut en effet être réalisé en contraintes totales et avec des caractéristiques non drainées du sol ou bien en contraintes effectives et avec des caractéristiques drainées.
- Quel type de calcul dois-je réaliser ? Celui-ci peut être uniquement mécanique, uniquement hydraulique, hydraulique (pour déterminer les pressions interstitielles) puis mécanique (en contraintes effectives) ou encore hydraulique et mécanique simultanément. Cette dernière possibilité présente l'avantage de prendre en compte les modifications de pressions interstitielles à l'intérieur et à l'extérieur de la fouille dues au couplage hydro-mécanique et à l'écoulement de l'eau ; ce qui permet d'estimer l'évolution au cours du temps des contraintes et mouvements dans l'ouvrage et le massif environnant.

3.2.7 Choix du modèle constitutif

« Last, but not least », le modèle constitutif idéalisant le comportement du sol ainsi que les paramètres mécaniques utilisés influencent considérablement les résultats des modélisations et conditionnent même leur pertinence ! A titre d'exemple et comme illustré à la figure 6, des modèles de comportement simples tels les modèles élastique-linéaire parfaitement plastique avec des critères de rupture de Mohr-Coulomb, Tresca et Von Mises, sont inadéquats pour prédire les mouvements ; ils surestiment fortement les gonflements en fond de fouille, mais surtout prédisent un soulèvement du sol derrière la paroi (suite à une décharge élastique du massif). Avec de tels modèles, ce n'est que lorsqu'une plastification du sol se développe derrière l'écran que des tassements apparaissent.

Une réduction des soulèvements calculés peut facilement être obtenue en spécifiant des modules de déformation K' et G (ou E') croissants avec la profondeur, ou en utilisant des modèles de comportement du type Cam-clay pour lesquels les modules K' et G sont fonction de la contrainte moyenne effective p' (et donc de la profondeur) et sont différents en charge et en décharge.

En ce qui concerne les tassements induits à l'extérieur de la fouille, seule l'utilisation de modèles constitutifs permettant de simuler le comportement hautement non-linéaire des sols (élasticité non-linéaire ou écrouissage cinématique) permet de les décrire de manière satisfaisante. Ceci ressort clairement des résultats présentés à la figure 4 où le modèle élastique-linéaire parfaitement plastique de Mohr-Coulomb prédit un soulèvement derrière la paroi tandis que le modèle hautement non-linéaire proposé par Jardine & al. [9] fournit une cuvette de tassements dont l'allure est plus conforme à la réalité.

3.3 Fouille expérimentale de Hochstetten

Afin d'améliorer la compréhension du fonctionnement des écrans de soutènement et dès lors la modélisation de ces ouvrages, diverses expérimentations peuvent être réalisées : essais sur modèles en laboratoire (centrifugés ou non), essais sur ouvrages reconstitués (à échelle légèrement réduite ou en vraie grandeur), essais en vraie grandeur et en conditions réelles. Parmi les essais de la dernière catégorie répertoriés par Mestat & Arafati [14], l'expérimentation menée par l'Université de Karlsruhe en 1993 fut accompagnée d'un concours international de prévision.

Cette expérimentation sur le site de Hochstetten comportait le creusement d'une fouille devant un rideau de palplanches butonné dans un milieu sableux et la sollicitation ultérieure de ce rideau jusqu'à l'équilibre limite (figure 7). L'instrumentation a consisté à mesurer la déformée du rideau, les efforts dans les butons, les tassements à la surface du sol et la pression des terres appliquée sur les deux côtés du rideau [14]. Un dossier géotechnique très complet avait été envoyé à divers organismes européens spécialisés en génie civil et en géotechnique et quarante-trois calculs de prévision furent réalisés, dont 18 par éléments finis, 23 par la méthode aux modules de réaction et 2 par utilisation de méthodes semi-empiriques.

Les résultats des calculs et leur confrontation avec les mesures ont été dévoilés en octobre 1994 au cours d'un colloque organisé à Delft [15, 16]. Une très grande dispersion entre les prévisions a pu être constatée (par exemple dans la figure 8 correspondant à la dernière étape de l'expérimentation), non seulement d'une méthode de calcul à une autre, mais aussi d'une utilisation à une autre de la même méthode de calcul. Une majorité des modélisations par éléments finis ayant été réalisées avec le modèle simple élastique-linéaire parfaitement-plastique de Mohr-Coulomb, il est aussi apparu que les dispersions dans les résultats des calculs provenaient pour une large part de la manière dont chaque participant avait déterminé les paramètres de calcul (module de Young, angle de frottement, angle de dilatance, cohésion, état initial du sol, etc.). Comme souligné par Mestat & Arafati [14], ce qui est inquiétant, c'est que ces valeurs ont été déterminées par des professionnels compétents à partir du même dossier géotechnique !

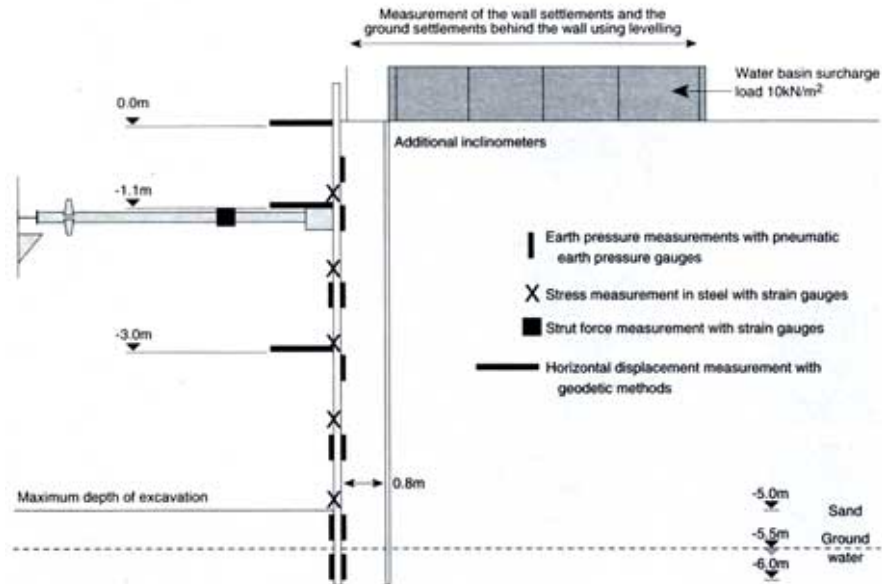


Figure 7 : Fouille expérimentale de Hochstetten [16]

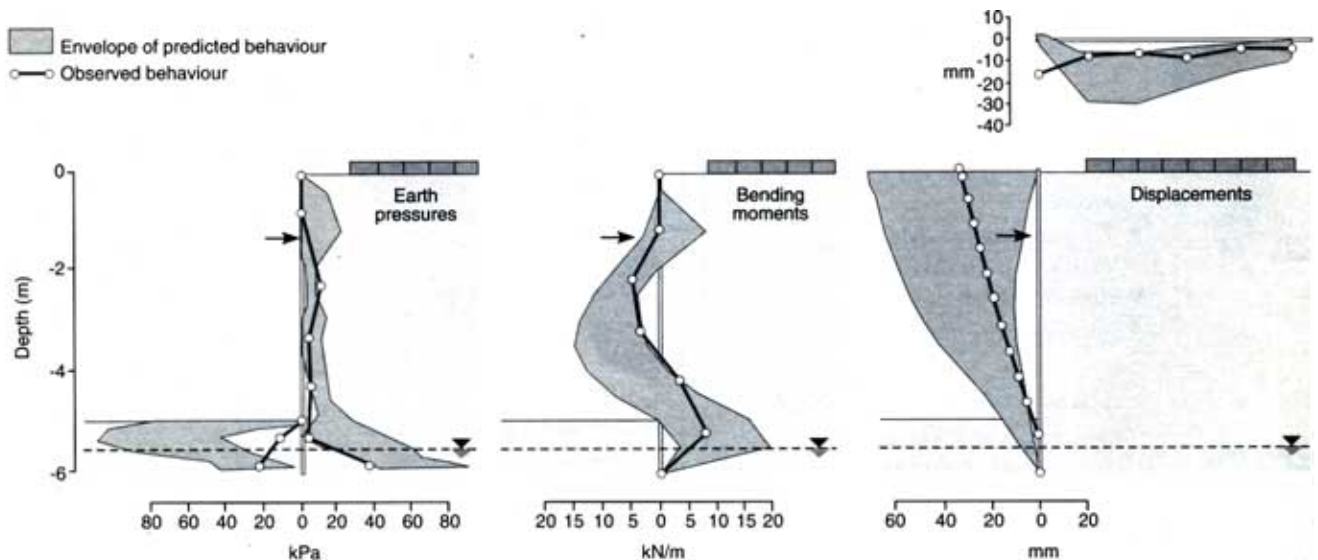


Figure 8 : Résultats de calculs pour la dernière étape de l'expérimentation de Hochstetten [16]

Notons pour terminer le constat par les participants des mauvais résultats concernant les tassements en surface, la plupart des modèles (dont notamment le Mohr-Coulomb) prédisant un soulèvement du sol derrière le rideau au cours des premières étapes de terrassement, alors que les mesures (et le bon sens) indiquent un tassement. Ce n'est que lors des deux dernières phases de l'expérimentation, lorsqu'une plastification du sol se développe derrière l'écran, que les calculs conduisent à des tassements (Fig. 8).

4 Compétences attendues des modélisateurs

Les apports que l'on peut attendre d'une modélisation numérique dépendent certes du type de calcul effectué et du programme utilisé, mais beaucoup plus encore des compétences « pratiques » du modélisateur, celles-ci ne se limitant pas à la connaissance du fonctionnement du logiciel. Un utilisateur professionnel de méthodes numériques devrait en effet être capable de (inspiré de [2]) :

- Maîtriser ses hypothèses de calcul (schématisation de la réalité) ;
- Définir les types d'étude et de modèle appropriés au problème à résoudre (modèle conceptuel, maillage, limites et conditions aux limites, interactions, cas de chargement, loi de comportement...) ;
- Justifier l'ensemble du modèle élaboré, en particulier la loi de comportement retenue pour le géomatériau ainsi que les paramètres mécaniques utilisés pour le calcul et déterminés à partir d'essais de caractérisation en laboratoire et in situ. Ces choix délicats peuvent être facilités par une analyse inverse de

mesures et observations faites sur des ouvrages construits dans des conditions analogues (lire à ce propos l'article rédigé par F. Geiser pour cette réunion de printemps de la Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches).

- Vérifier la cohérence des résultats de la modélisation en les comparant avec ceux obtenus à l'aide d'une méthode de calcul traditionnelle et en les confrontant avec les expériences et observations faites sur des ouvrages analogues ;
- Présenter les résultats de façon claire. Il s'agit de répondre aux questions et attentes du bureau d'études et/ou du maître de l'ouvrage en lui fournissant un rapport complet, bien rédigé et structuré, dans lequel figurent les hypothèses de modélisation, leur justification, des conclusions sur la validité du calcul, et les résultats sur le comportement de l'ouvrage.

Lors de l'apprentissage de certaines méthodes numériques utilisées en géotechnique, on note que les étudiants et jeunes ingénieurs sont souvent désarçonnés car ils éprouvent des difficultés à passer du problème réel au problème virtuel (modèle) qui est sensé reproduire le comportement. Comment simplifier le problème réel éminemment complexe ? Quels sont les paramètres importants à prendre en compte ? Comment interpréter les résultats ? Quelles conclusions en tirer ? Autant de questions auxquelles ils doivent apprendre à répondre... Il faut espérer qu'à l'instar de l'ingénieur qui acquière de la pratique avec le temps, le modélisateur gagne de l'expérience au fur et à mesure des cas traités.

5 Conclusions

Les méthodes numériques sont des outils très intéressants pour la modélisation des ouvrages géotechniques. Cependant, par leurs nombreuses possibilités, elles donnent l'impression fallacieuse de « savoir tout faire », réduisant les actions de l'utilisateur à un simple rôle d'opérateur. De plus, leur complexité même conduit à se concentrer sur les manipulations et habiletés nécessaires à leur fonctionnement, au détriment de la réflexion accordée au problème traité [2].

Modéliser c'est idéaliser. Que l'on utilise un modèle simplifié tel la méthode aux modules de réaction (MMR) ou un modèle plus complexe et plus coûteux tel la méthode des éléments finis, on effectue un certain nombre d'hypothèses et de choix (en particulier sur le comportement du sol) qui conditionnent la qualité – et même la pertinence – des résultats. Il ne faut pas ignorer ces limites et il convient toujours de s'assurer du bon sens des résultats numériques obtenus en les confrontant à des solutions approchées, mais éprouvées, qu'elles soient analytiques ou empiriques.

Dans le domaine des fouilles en terrain meuble et des écrans de soutènement développé au chapitre 3, l'expérience montre que la méthode aux modules de réaction demeure intéressante et couramment employée pour obtenir rapidement une estimation raisonnable des sollicitations et déformations d'un écran. En comparaison, les méthodes des éléments finis et des différences finies sont beaucoup plus complexes et plus lourdes à mettre en œuvre. De plus, malgré des résultats encourageants, elles n'ont pas encore complètement fait leurs preuves. Rares sont en effet les modélisations donnant d'excellents résultats pour l'ensemble des mesures effectuées. Les comparaisons sont plutôt satisfaisantes, avec des concordances plus ou moins bonnes selon les types de modélisations, les paramètres adoptés et les phases de calcul analysées.

En conclusion, la réalisation d'une modélisation numérique ne devrait jamais remplacer le bon sens de l'ingénieur ainsi que l'utilisation de méthodes et d'outils simples éprouvés. Par contre, elle peut constituer un complément efficace, voire nécessaire, aux méthodes traditionnelles de calcul, notamment dans des projets complexes.

Adresse de l'auteur

V. Labiouse
Laboratoire de Mécanique des Roches LMR
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL
1015 Lausanne

6 Bibliographie

- [1] Prat M., Bisch P., Millard A., Mestat P., Pijaudier-Cabot G., 1995. La modélisation des ouvrages. Ed. Hermès. Paris. 770 pp.
- [2] Mestat P., Prat M., Riou Y., 2001. Modélisation et enseignement – enseignement de la modélisation par éléments finis dans les formations de génie civil. Hors série de la Revue Française de génie civil, Vol 5, 140 pp.
- [3] Labiouse V., 1995. Validation of constitutive models for soil using centrifuge tests. Rapport de recherche N° ERB 4050PL921946 de la Communauté Européenne. 48 pp.
- [4] Potts D. M., Zdravkovic L., 1999. Finite element analysis in geotechnical engineering – Theory. Ed. Thomas Telford. Londres. 440 pp.
- [5] Potts D. M., Zdravkovic L., 2001. Finite element analysis in geotechnical engineering – Application. Ed. Thomas Telford. Londres. 427 pp.
- [6] Josseume H., 1974. Méthode de calcul des rideaux de palplanches – Etude bibliographique. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N°72, pp. 177-212.
- [7] Balay J., 1985. Recommandations pour le choix des paramètres de calcul des écrans de soutènement par la méthode aux modules de réaction. Note d'information technique N°502664 du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. 24 pp.
- [8] Josseume H., Delattre L., Mespoulhé L., 1997. Interprétation par le calcul aux coefficients de réaction du comportement du rideau de palplanches expérimental de Hochstetten. Revue française de géotechnique, N°79, pp. 1-14.
- [9] Jardine R.J., Potts D. M., Fourie A.B., Burland J.B. 1986. Studies of the influence of nonlinear stress-strain characteristics in soil-structure interaction. Geotechnique, Vol. 36, No. 3, pp. 377-396.
- [10] Schweiger H.F., 1998. Results from two geotechnical benchmark problems. Proc. 4th European Conf. Num. Meth. Geotech. Eng., Ed. A. Cividini. pp. 645-654.
- [11] Carter J.P., Desai C.S., Potts D.M., Schweiger H.F., Sloan S.W., 2000. Computing and computer modeling in geotechnical engineering. GeoEng 2000, Melbourne, Technomic, Lancaster, Vol. 1, pp. 1157-1252.
- [12] Labiouse V., 2000. Travaux de fondations II. Service de reprographie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 72 pp.
- [13] Potts D. M., Fourie A.B., 1986. A numerical study of the effects of wall deformation on earth pressures. Int. Jnl. Num. Anal. Geomech., Vol 10, No. 4, pp. 383-405.
- [14] Mestat P., Arafati N., 1998. Modélisation par éléments finis du comportement du rideau de palplanches expérimental de Hochstetten. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Vol 216, pp 19-39.
- [15] Von Wolffersdorff P.A., 1994. Results of the field test and evaluation of the predictions and subsequent calculations. Workshop Sheet Pile Test Karlsruhe. Delft University. Holland.
- [16] Jonker F., 1995. Retaining facts. Ground Engineering, Vol 28, N°6, pp. 22-23.