

**Zeitschrift:** Tracés : bulletin technique de la Suisse romande  
**Herausgeber:** Société suisse des ingénieurs et des architectes  
**Band:** 129 (2003)  
**Heft:** 08: Fondations d'horloger

**Artikel:** Simulation numérique tridimensionnelle de la fouille et instrumentation  
**Autor:** Geiser, Françoise / Vurpillot, Samuel / Command, Stéphane  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-99202>

#### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 09.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Simulation numérique tridimensionnelle de la fouille et instrumentation

Etant donné ses dimensions et le choix d'une variante de soutènement audacieuse dans son contexte géologique, la fouille à réaliser pour le chantier *Rolex* à Plan-les-Ouates plaçait les mandataires face à des problèmes peu communs.

L'ensemble de la fouille a été vérifié au moyen d'une modélisation par éléments finis pour

- apporter aux projeteurs, par une modélisation tridimensionnelle englobant l'ensemble des paramètres du problème, les compléments d'informations que les approches classiques 2D ne permettaient pas d'obtenir;
- définir l'influence des différents éléments structuraux sur le comportement de la fouille;
- évaluer les efforts dans les structures ainsi que les déplacements liés à l'excavation.

Pour surveiller le comportement effectif du dispositif de soutènement en cours d'excavation, une importante instrumentation a par ailleurs été mise en place afin

- de vérifier l'exactitude des hypothèses des projeteurs (concernant les sols et les structures);
- de contrôler la réponse des structures à la mise en pré-contrainte de l'anneau;
- d'appliquer une méthode de type observationnelle, permettant de réagir immédiatement en cas de divergence entre le comportement réel du système de soutènement et les prédictions.

Ce système permet aussi de valider la modélisation numérique et, en cas de divergence, d'adapter les hypothèses de calcul pour anticiper le comportement de l'ensemble sol-structure.

Le présent article expose d'abord les hypothèses et résultats de la modélisation numérique 3D par éléments finis (voir

encadré p. 33). Il apporte ensuite quelques précisions sur le système d'instrumentation, avant de comparer certaines observations effectuées pendant les travaux aux prédictions numériques.

## Modélisation

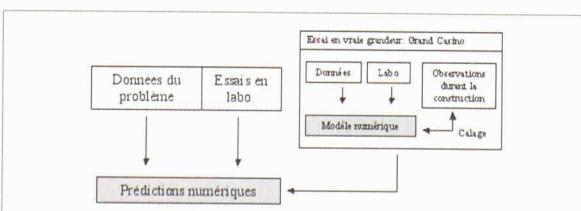
La modélisation numérique a été menée à l'aide de *Z\_Soil 3D* [1]<sup>1</sup>, logiciel d'éléments finis qui permet de reproduire le comportement non linéaire des sols, l'interaction sol-structure et le couplage hydromécanique. La méthodologie adoptée pour le projet est résumée à la figure 1. De façon classique, l'étude s'est basée sur les données existantes et les essais en laboratoire pour déterminer tous les composants du problème. Les auteurs ont en outre bénéficié de l'expérience acquise sur un projet mené dans des conditions géotechniques et avec un dispositif d'étayage similaires: le «Grand Casino», construit à Genève dans les années 1970 [2,3]. Dans un premier temps, l'étude de modélisation 3D a ainsi consisté à «caler» un modèle numérique sur les résultats de mesure obtenus pour le Grand Casino, opération qui a permis de fixer les hypothèses du calcul pour le chantier *Rolex*.

## Conditions géologiques et géotechniques

Le contexte géotechnique [4] se caractérise essentiellement par la présence de formations supraglaciaires du retrait würmien, constituées d'argiles et limons argileux, puis plus en profondeur de terrains morainiques. Cinq couches principales de sols ont été considérées dans le modèle. Des conditions de bord fixes ont été définies à -39,7 m, niveau correspondant au haut de la couche de moraine, considérée comme très rigide par rapport aux sols argilo-limoneux des formations supérieures.

Le comportement mécanique des sols a été modélisé à l'aide d'un modèle constitutif élastoplastique avec écrouissage de type «Cap» (modèle proche du «Cam-Clay»), sauf pour la première couche, plus sableuse, où un critère de plasticité parfaite de Drucker-Prager a été retenu (voir encadré p. 30).

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets renvoient aux références en fin d'article.



Description	Limon sableux	Limon argileux ou argile limoneuse	Argile limoneuse 6e2tm	Argile limoneuse 6e2n	Limon argileux à très argileux
Profondeur (m)	0,50-3,05	3,05-8,00	8,00-21,75	21,75-28,80	28,8-39,7
Module d'élasticité $E$ (MPa)	80	60	45	55	70
Coefficient de Poisson $\nu$ (-)	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
Cohésion $c$ (kPa)	2	5	4	6	6
Angle de frottement $\varnothing'$ (°)	27	22	21	21	23
Poids volumique $g$ (kN/m <sup>3</sup> )	20,9	21,0	21,0	21,0	21,0
Indice des vides initial $e_0$ (-)	0,5	0,73	0,99	0,82	0,66
Perméabilité $k$ (m/s)	1e-06	1e-03	8e-06	6e-06	8e-06
Compressibilité $\lambda$	-	0,15	0,15	0,10	0,10
Pression de préconsolidation initiale $p_{co}$ (kPa)	-	110	165-250	330	450
Facteur de forme $R$	-	1,8	1,8	1,8	1,8

Les caractéristiques des sols, définies sur la base d'essais en laboratoire et de l'expérience de la fouille du Grand-Casino (voir encadré p. 29), sont résumées dans le tableau I.

Le niveau de saturation a été mesuré à 2,45 m de profondeur sous le terrain naturel et modélisé par une nappe phréatique, le calcul numérique effectué prenant en considération le couplage hydromécanique. L'aspect transitoire<sup>2</sup> du problème a été appréhendé de façon similaire au cas du « Grand Casino », les perméabilités indiquées au tableau I étant des perméabilités modifiées en vue d'un calcul simplifié « pseudo-transitoire ».

### Géométrie

Un maillage 3D d'environ dix mille éléments a été établi. Illustrés par la figure 2, ses composants se caractérisent comme suit :

- des éléments « briques » continus à huit noeuds modélisant le sol ;
- des éléments de coque mince à quatre noeuds pour simuler les parois, les palplanches, les radiers ;
- des éléments de barre à deux noeuds pour modéliser les butons, les étais et les chandelles ;
- des éléments de poutre à deux noeuds simulant le sommier raidisseur et l'anneau circulaire en béton.

Afin d'intégrer les phases de construction, le calcul est effectué en douze étapes de temps fictif.

Dans un premier temps, toute la zone de la fouille est excavée jusqu'à -3,00 m, après quoi les parois moulées et le sys-

tème d'étayage sont activés et la précontrainte introduite dans les butons.

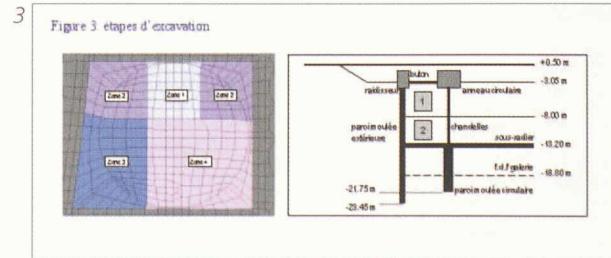
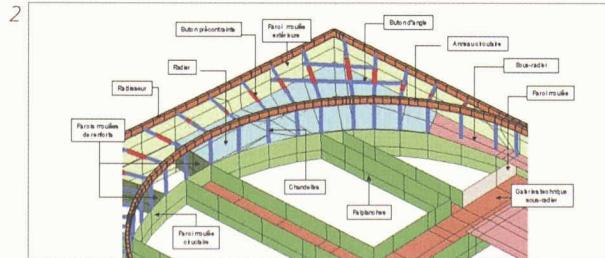
Ensuite, on a considéré, dans l'ordre d'exécution, quatre zones principales d'excavation (fig. 3). De manière générale, les étapes par zone s'articulent comme suit : excavation jusqu'à -8,00 m, la paroi se déformant librement, puis excavation jusqu'au fond de fouille avec pose simultanée du sous-radier de blocage et creuse des galeries techniques. La zone 1 a en outre fait l'objet d'un traitement particulier (excavation en taupe des galeries techniques près de la paroi moulée extérieure).

### Modèle auxiliaire - contreforts

La paroi moulée extérieure est renforcée par des contreforts. Or l'incorporation de chacun de ces éléments dans le maillage 3D aurait compliqué la tâche et entraîné une augmentation importante du nombre d'éléments, donc des temps de calcul. La paroi moulée a donc été modélisée par une coque mince dont l'épaisseur varie entre deux valeurs limites : 1 m (sans contreforts) et 3 m (contreforts continus).

Afin d'estimer l'influence réelle des contreforts sur le comportement de la fouille, une analyse auxiliaire d'une portion de paroi moulée les reproduisant exactement a été menée (fig. 4). Les résultats ont indiqué des tassemements surestimés de 20% dans le maillage global en parois minces sans contreforts. Une fois ce pourcentage connu et intégré dans l'analyse ultérieure des résultats, le comportement général s'avère correctement reproduit.

<sup>2</sup> Conditions hydrauliques évoluant au cours du temps



4

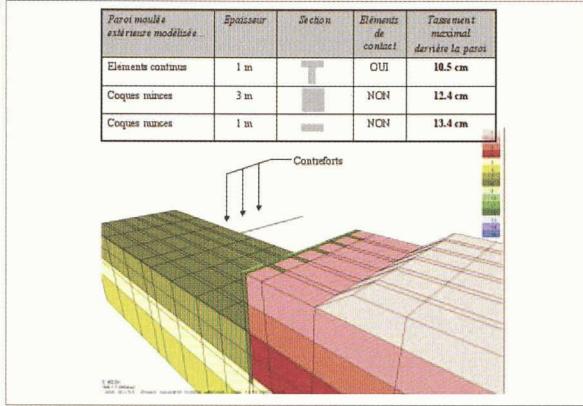


Tableau I : Propriétés des sols

Fig. 1 : Méthodologie adoptée pour la modélisation numérique

Fig. 2 : Description des éléments structuraux

Fig. 3 : Etapes d'excavation admises pour la modélisation

Fig. 4 : Modèle auxiliaire 3D des contreforts

Fig. 5 : Déplacements verticaux prédicts en cours d'excavation de la zone 1

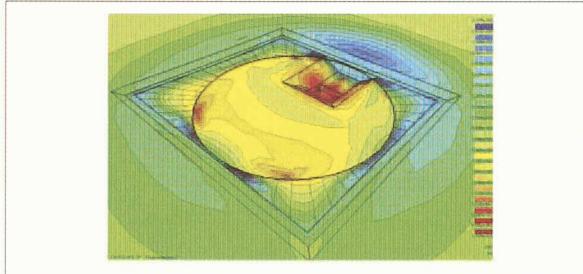
Fig. 6 : Déplacements verticaux en fin d'excavation

Fig. 7 : Mécanisme de mouvement de l'enceinte de fouille

Fig. 8 : Evolution de l'effort de compression (kN) en cours d'excavation pour quelques butons

Fig. 9 : Déformations de l'enceinte de fouille avec ou sans parois auxiliaires à -18 m

5

Résultats de la modélisation<sup>3</sup>

La figure 5 montre les déplacements verticaux après excavation de la première étape de la zone 1 : le tassement maximal est de 4 cm. Une vue en situation (fig. 6) illustre les tassements et gonflements en fin d'excavation, avec un tassement maximal de 7 cm.

Une coupe passant par le milieu de la fouille (fig. 7) montre le mécanisme de déplacement de l'enceinte à la fin des travaux d'excavation, avec un déplacement horizontal de 5 cm prédict en pied de la paroi moulée extérieure.

Les efforts intérieurs ont également été estimés pour les éléments structuraux. La figure 8 exprime l'évolution des efforts dans quelques butons après la mise en tension initiale.

Pour optimiser le projet et évaluer la contribution de chaque élément structurel à l'équilibre de l'enceinte de fouille, une étude paramétrique a exploré les conditions ci-après :

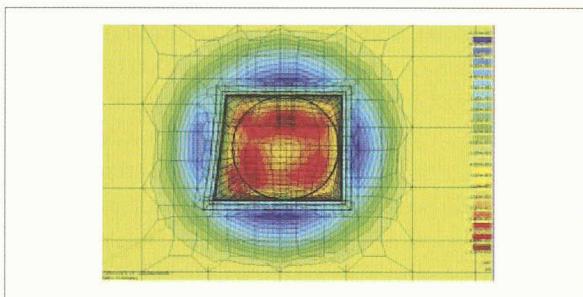
- calcul sans les parois moulées auxiliaires,
- abaissement de l'anneau circulaire de 2 m,
- mise en place différée du sous-radier,
- absence de précontrainte dans les butons,
- influence d'un béton de plus mauvaise qualité que souhaité initialement,
- influence de la longueur de la paroi moulée extérieure sur le comportement.

Cette étude a notamment montré que l'influence des parois auxiliaires est faible, tant du point de vue des déformations (fig. 9) que des efforts, et qu'un abaissement de 2 m du niveau des butons n'apportait qu'une amélioration minime du comportement global.

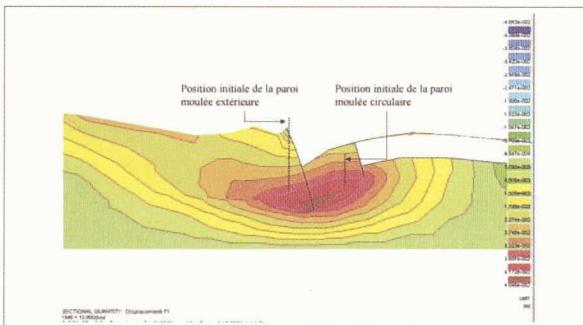
Une des études a encore précisé comment se répartissaient les efforts dus à la poussée des sols si l'on ne bloquait pas le pied de paroi au fur et à mesure avec un sous-radier. Dans ce cas, les tassements à l'arrière de la paroi étaient 1,5 à 2 fois plus importants que pour le cas de base. Différents niveaux de précontrainte dans les butons ont également été appliqués afin de mieux appréhender leur influence.

<sup>3</sup> Les représentations graphiques des résultats utilisent des échelles déformées.

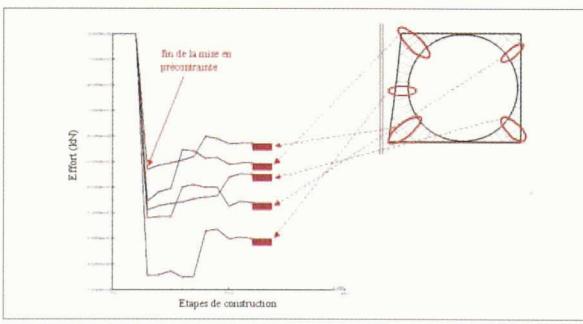
6



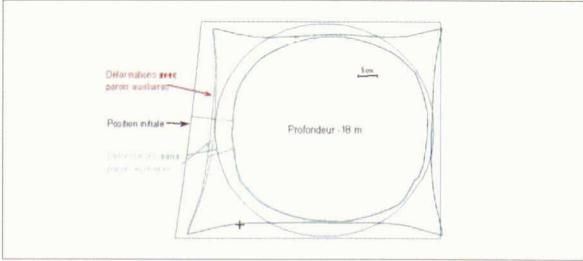
7



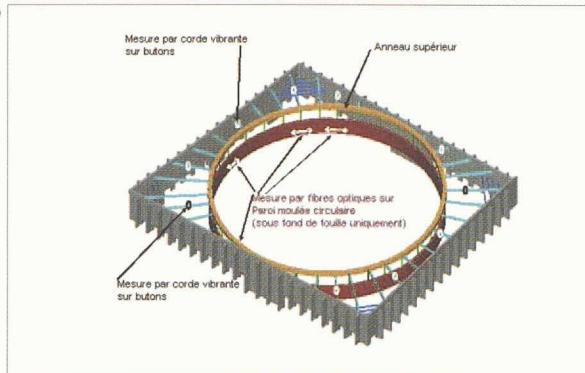
8



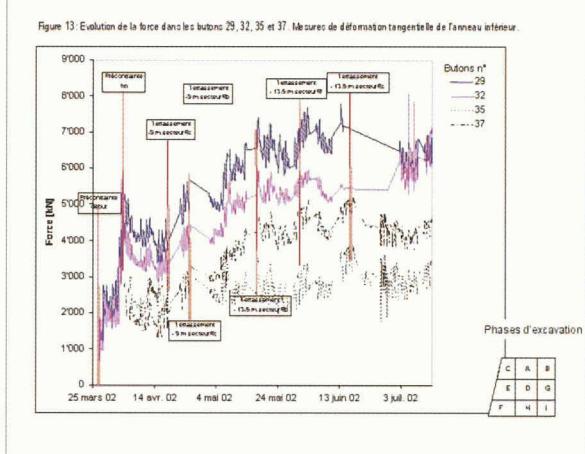
9



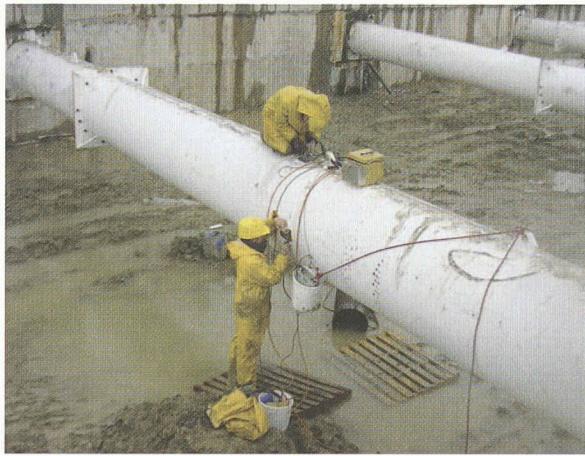
10



11



12



13



## Instrumentation

L'évolution des pressions d'eau à l'extérieur de la fouille a été mesurée par des piézomètres et des cellules de type Glötzl. Les déplacements de la paroi moulée extérieure - important critère de stabilité de la fouille - et ceux de l'anneau supérieur ont été relevés à l'aide d'inclinomètres et de mesures topographiques. Une station de mesure équipée d'un théodolite motorisé effectuait un contrôle automatique et régulier de ces deux éléments. De plus, le système « anneau - butons - sous-radier » a fait l'objet d'une instrumentation spécifique.

Pour l'anneau supérieur, le contrôle des déplacements dans les trois directions ainsi que celui des efforts dans les butons permettaient de régler la circularité de cette « roue de vélo ». Les déformations axiales des butons ont été mesurées par des jauge de contrainte<sup>4</sup>, permettant l'évaluation des forces qui les traversent. L'inaccessibilité de la paroi moulée circulaire imposait des capteurs robustes et fiables, pouvant être bétonnés et résistant aux contraintes imposées par les travaux spéciaux: des capteurs à fibres optiques de type SOFO® - à base de mesure de 4 m - ont été choisis pour satisfaire à ces exigences (voir encadré p. 32). Enfin, l'effort dans le radier et sous-radier a lui aussi été déterminé à l'aide de capteurs à fibres optiques et de capteurs de pression totale.

<sup>4</sup> Ou jauge de déformation à corde vibrante

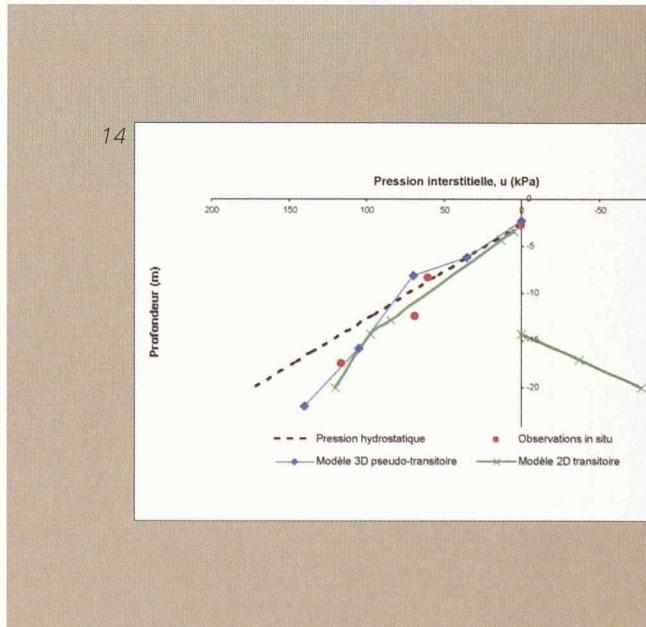


Fig. 10 : Situation globale des capteurs à fibres optiques et des cordes vibrantes

Fig. 11 : Evolution de la force dans les butons ; mesures de déformation tangentielle de l'anneau inférieur

Fig. 12 : Mise en place in situ de jauge de contrainte sur un buton

Fig. 13 : Cage d'armature équipée de capteurs à fibre optique

Fig. 14 : Comparaison des pressions dans le cas du Grand Casino

La mise en place de fibres optiques [5][6] et de jauge de contraintes étant peu commune dans les travaux spéciaux, seule l'instrumentation des butons et de la paroi moulée circulaire est décrite dans cet article.

#### Equipement des butons et de la paroi moulée circulaire

Seize butons ont été instrumentés (fig. 12), chacun étant équipé de quatre jauge de contrainte placées en une section selon des axes verticaux et horizontaux. Un système d'acquisition permettait de mesurer en continu l'évolution des déformations, instrumentation qui a nécessité la pose de 68 jauge et de plus de 2 km de câblage.

Les quatre sections représentées à la figure 10 ont été choisies pour mesurer la déformation tangentielle de la paroi moulée circulaire. Deux d'entre elles ont été équipées de six capteurs - répartis sur la hauteur en trois groupes de deux - tandis que les deux autres en recevaient trois répartis sur la hauteur. Chaque capteur a été placé sur la cage d'armature avant que celle-ci ne soit placée dans son logement final (fig. 13). La partie passive des capteurs a été protégée par un tube métallique, ce qui a permis aux entreprises de terrassement de progresser à vitesse normale dans les zones de mesure.

#### Mesures de forces dans les butons

Les jauge de contrainte mesurent l'allongement du buton sur une longueur de 62 mm. La force effective peut en être

déduite à partir du module d'élasticité de l'acier des butons et en tenant compte des effets de température. La force transversant le buton est donnée par :

$$F = \varepsilon_t^1 \cdot E \cdot A + T_t^1 \cdot \alpha \cdot E \cdot A$$

avec :  $F$  variation de la force dans le buton entre le temps

$t_1$  et  $t_0$

$\varepsilon_t^1$  variation mesurée de la déformation entre le temps  $t_1$  et  $t_0$

$E$  module de Young du matériau composant le buton

$A$  surface de la section du buton

$T_t^1$  variation de la température du buton entre le temps  $t_1$  et  $t_0$

$\alpha$  coefficient de dilatation thermique du buton.

L'évolution de la force dans quatre des butons est reproduite à la figure 11 : on y distingue la phase de mise en tension, la fluctuation journalière de la mesure et les augmentations des efforts lors du terrassement de la zone se situant à proximité du buton.

#### Mesures des efforts dans la paroi moulée circulaire

Les capteurs à fibres optiques mesurent les déformations tangentielles de la paroi moulée circulaire sur une base de mesure de 4 m, les efforts pouvant être évalués et vérifiés en cours de travaux à partir du module d'élasticité et du retrait du béton.

#### Grand Casino : analyse rétro d'un cas similaire

En préambule aux calculs de la fouille *Rolex* à Plans-les-Ouates, les données concernant le comportement de la fouille du Grand Casino construit à Genève dans les années 1970 ont été analysées. Le cas était similaire du point de vue des conditions hydrogéologiques, du système d'étayage et de la durée des travaux. L'importance des différents paramètres du modèle a pu être évaluée par un calcul à rebours sur un cas réel, pouvant être considéré comme un « essai en vraie grandeur ». Il en est ressorti que le comportement de la fouille était principalement influencé par l'évolution des pressions interstitielles. Les perméabilités des sols étant faibles, les phénomènes hydrauliques et leurs conséquences dépendent du facteur temps. Etant donné qu'un calcul transitoire implique des durées de calculs importantes en 3D, un modèle pseudo-transitoire a été développé en tenant compte d'une durée d'excavation d'environ une année. Ce modèle consiste essentiellement à modifier artificiellement les perméabilités des sols, afin de simuler, par un calcul en conditions permanentes, la répartition des pressions interstitielles observée. La figure 14 compare les pressions d'eau mesurées derrière la paroi à un calcul 2D transitoire avec les perméabilités réelles et au calcul 3D pseudo-transitoire avec des perméabilités adaptées.

Tous les autres paramètres sont basés sur des données et des essais géotechniques existants, sans autre adaptation qu'une légère diminution des angles de frottement internes. Le calcul du Grand Casino a permis de confirmer la nécessité de recourir à une relation constitutive « avancée » (modèle de « Cap »), pour simuler le comportement des sols limono-argileux. Cette étude paramétrique a ainsi mis en évidence l'influence du paramètre de compressibilité sur les déplacements et, partant, la prise en compte de la plasticité dans les calculs avec le type de sols en place. Finalement, il a encore été observé que le recours à des éléments d'interface entre la paroi et les sols n'était pas essentiel.

Fig. 15 : Prédiction et observation à l'arrière de la paroi moulée de la répartition des pressions interstitielles et des différences de pressions interstitielles par rapport à l'état hydrostatique (mesures in situ effectuées par GADZ)

Fig. 16 : Evolution de la force dans un panneau de la paroi moulée inférieure

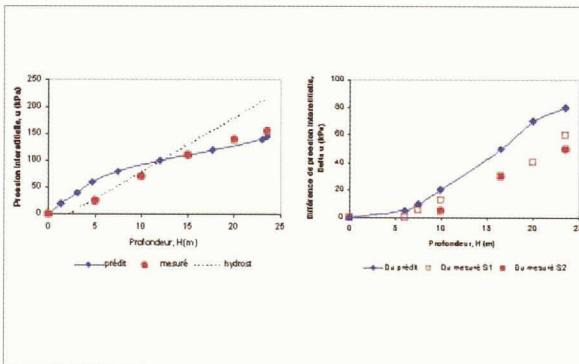
Fig. 17 : Représentation du critère de rupture de Drucker-Prager et de Mohr-Coulomb dans l'espace des contraintes

Fig. 18 : Critère de rupture de Drucker-Prager et de Cap

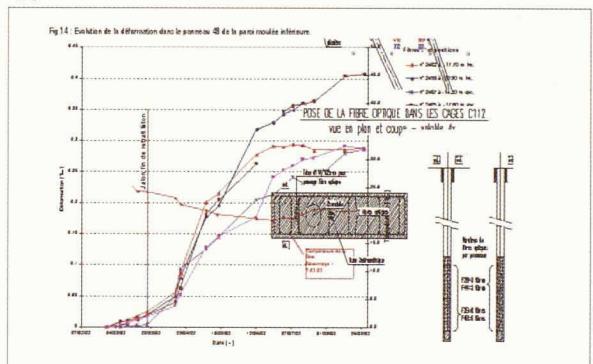
Fig. 19 : Réponses caractéristiques obtenues sur des chemins déviatoires et volumiques en fonction du type de relation constitutive choisie

Fig. 20 : Déplacements horizontaux de la paroi moulée extérieure à trois profondeurs et au droit d'un inclinomètre

15



16



### Lois constitutives

Les lois constitutives sont choisies de façon à représenter au mieux le comportement des sols. Deux types de relations contraintes-déformations ont été utilisées.

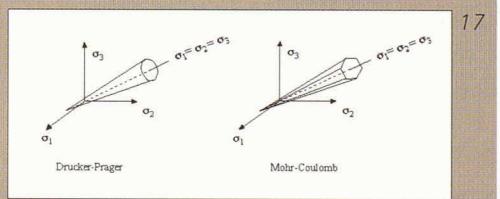
#### Drucker-Prager

Il s'agit du type de loi le plus utilisé, soit une loi élasto-plastique parfaitement plastique. Par rapport à la relation bien connue de Mohr-Coulomb, les critères de rupture sont proches. Contrairement à la représentation angulaire dans l'espace des contraintes du Mohr-Coulomb, la représentation du Drucker-Prager est continue et lisse, ce qui en rend l'implémentation plus aisée (fig. 17). La simplicité de ce type de loi entraîne en revanche certains désavantages : en particulier, la relation constitutive de Drucker-Prager ne permet pas de distinguer, sur les chemins volumiques, les chargements primaires, déchargements et recharges dans le domaine élastique (fig. 19), d'où des surestimations généralement importantes des gonflements.

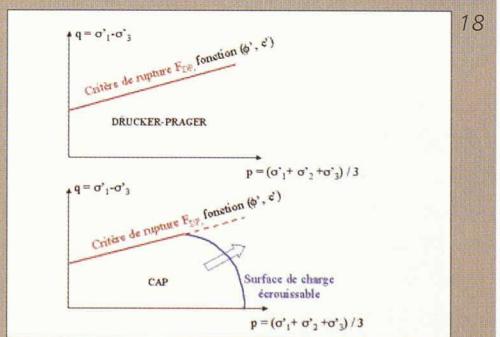
#### Cap

Afin de pallier les désavantages mentionnés des modèles élasto-plastiques parfaitement plastiques, il est possible de fermer le cône représentant le critère de rupture par une surface de charge qui introduit un écrouissage volumique dans le modèle (fig. 18 et 19). Ce type de loi permet de reproduire de manière plus réaliste des déformations volumiques et déviatoires irréversibles et de faire la distinction entre un chargement primaire et une recharge.

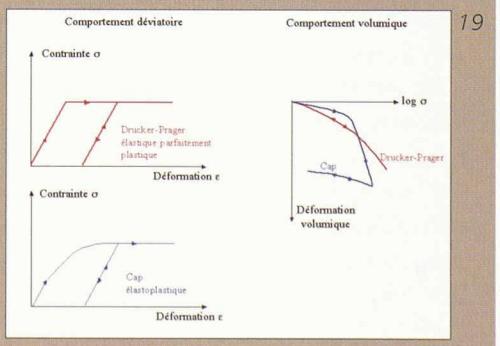
17



18



19



La figure 16 indique l'évolution du comportement durant la phase du chantier, la mesure initiale étant prise deux jours après le bétonnage. On distingue d'abord le retrait du béton et de la déformation thermique sur les deux premiers mois, une brusque mise en compression de l'anneau apparaissant au début de l'excavation suivie par une stabilisation de la compression. La stabilisation de la force a permis de vérifier l'hypothèse de tenue du bas de la fouille par le radier général. Avec un module d'élasticité de 20 000 N/mm<sup>2</sup>, les mesures ont montré une compression moyenne de l'ordre de 7,5 N/mm<sup>2</sup>.

#### Comparaison prédictions numériques - mesures *in situ*

Les prédictions du modèle numérique et les observations *in situ* ont été comparées au cours de travaux. Des modifications du projet, portant notamment sur les étapes d'excavation, sont toutefois intervenues entre la phase de calcul et celle de construction. Ainsi, la zone 1 (fig. 3) a été exécutée différemment et la valeur réelle de mise en tension des butons s'est révélée plus faible que prévue.

Les mesures et la répartition des pressions interstitielles derrière la paroi moulée extérieure se sont avérées assez proches des prédictions par calcul (fig. 15). C'est en particulier le cas des différences de pressions interstitielles - qui induisent les modifications de l'état de contrainte effectif dans le sol - ce qui valide le choix du modèle pseudo-transitoire.

La figure 20 compare les déplacements théoriques et *in situ* de la paroi moulée extérieure et confirme la valeur des prédictions numériques. A titre d'exemple, le résultat des inclinomètres indique un déplacement du pied de la paroi de 6 cm pour une prédition de 5 cm.

Les divergences observées s'expliquent comme suit :

- le déplacement calculé en milieu de paroi est environ deux fois trop faible : dans la modélisation toutefois, cette zone devait être complètement bloquée par la mise en place non seulement du sous-radier, mais également du radier définitif ; or ce dernier n'ayant été réalisé que plus tard, toute la zone s'est révélée moins rigide que prévu ;
- le déplacement calculé au niveau des butons (3,1 m) est quasiment nul alors que des déplacements moyens de 2 cm vers l'intérieur de la fouille ont été observés : la pré-contrainte réellement appliquée était plus faible que celle retenue pour les calculs.

Pour ce qui est des déplacements verticaux en tête de paroi moulée, les prédictions indiquaient des tassements variant entre 1,9 et 4,8 cm et les dernières mesures varient entre 1,5 et 4,8 cm.

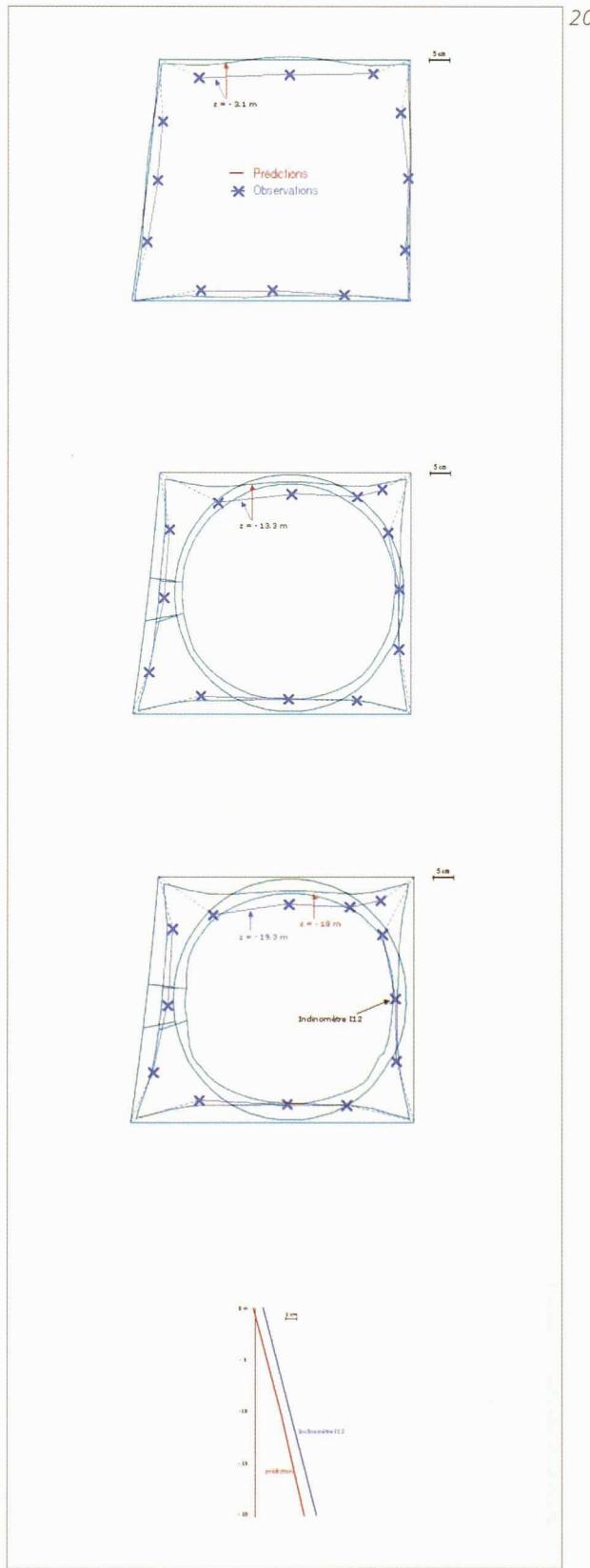


Fig. 21 : Efforts membranaires (kN/m) horizontaux à -18 m ;  $E_{bton} = 20\ 000\ N/mm^2$  (prédiction et valeur moyenne observée)

Fig. 22 : Vue générale de la fouille (Photo Gaston Kruger)

(Sauf mention, tous les documents illustrant cet article ont été fournis par les auteurs)

### Mesure de déformation par capteur à fibres optiques

Le système de mesure SOFO® (Surveillance d'Ouvrages par capteurs à fibres optiques) a été développé à l'EPFL il y a plus de dix ans. Il permet de mesurer l'allongement ou le raccourcissement d'un capteur sur des bases de mesure comprises entre 10 cm et 50 m avec une résolution de 2 microns (2 millièmes de millimètre) quelle que soit cette base de mesure. Les capteurs peuvent être noyés dans le béton ou fixés à la surface des structures.

La méthode de mesure fait appel au principe de l'interférométrie en basse cohérence. L'émission infrarouge d'une diode électroluminescente (LED) est injectée dans une fibre monomode de type télécom puis envoyée, à l'aide d'un coupleur, dans deux fibres installées dans la structure à observer. La première, dite fibre de mesure, est liée mécaniquement à la structure et en suit les déformations. La seconde, appelée fibre de référence, est placée librement dans un tube. Un miroir placé à l'extrémité de chaque fibre renvoie la lumière vers le coupleur qui recombine les deux faisceaux et les dirige vers l'analyseur. Celui-ci se compose également de deux fibres dont la différence de longueur est contrôlée avec précision à l'aide d'un miroir mobile. En déplaçant ce miroir, on obtient une modulation du signal détecté sur la photodiode lorsque la différence de longueur entre les fibres de l'analyseur compense celle des fibres installées dans la structure, avec une erreur inférieure à la longueur de cohérence de la source (dans notre cas quelques millièmes de mm). Pour chaque mesure, une nouvelle position de compensation est obtenue, traduisant la déformation de la structure par rapport aux points de mesure précédents.

La figure 21 montre la répartition des efforts membranaires prédits pour un module d'élasticité du béton  $20\ 000\ N/mm^2$  et une épaisseur de paroi moulée de 1,20 m (à 18 m de profondeur soit environ au milieu de la paroi moulée circulaire). Les efforts de compression moyen mesurés par l'intermédiaire des fibres optiques sont de l'ordre de 5000 kN/m avec un maximum de 7000 kN/m. Ces valeurs sont tout à fait comparables aux 5000 à 6000 kN/m prédits avec un maximum à 8400 kN/m.

### Conclusions

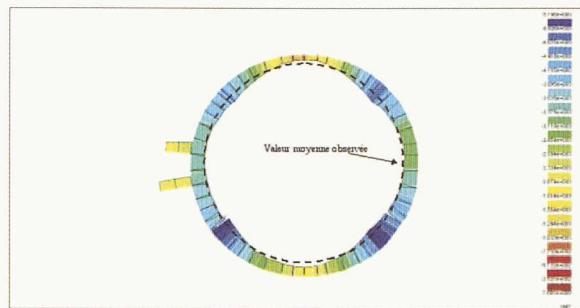
L'expérience et les observations en cours d'exécution ont validé l'adéquation de la méthodologie appliquée dans le cadre de ce projet. Il a ainsi été montré qu'une approche rigoureuse par éléments finis conduit à des prédictions valables, aussi bien en termes de déplacements que d'efforts dans les structures.

L'approche par éléments finis impliquait la formulation de nombreuses hypothèses pour limiter la lourdeur du calcul. En ce sens, le recours préalable à la simulation complète 3D d'un projet dont les données et les mesures étaient bien connues (Grand Casino) a permis de vérifier à priori la pertinence des hypothèses émises, ce qui s'est avéré être une étape décisive de la réussite de l'étude.

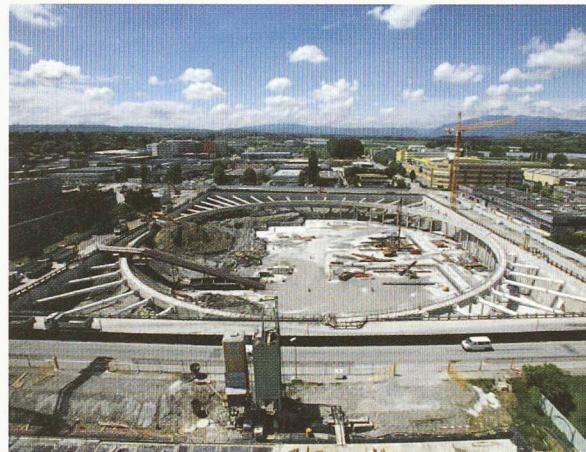
D'un point de vue pratique, les simplifications suivantes ont été admises pour la modélisation de la fouille Rolex :

- maillage relativement grossier afin de limiter le nombre d'éléments,
- recours à des pas de temps fictifs avec correction ultérieure des perméabilités afin d'intégrer le comportement transitoire du problème,
- omission du contact entre les parois moulées et les sols. Il s'est en revanche avéré indispensable :
  - d'utiliser des lois constitutives avancées pour les sols,
  - d'introduire un couplage hydromécanique,
  - d'effectuer une simulation 3D, afin d'intégrer - entre autres - les différentes étapes d'excavation.

Ces mesures ont permis de réduire sensiblement les temps de calcul et ont été accompagnées de modèles auxiliaires 2D



21



22

et 3D, afin de définir de façon ciblée l'influence des choix effectués sur les résultats finaux.

Cette approche s'est également avérée pertinente en phase de chantier. En effet, la modélisation par éléments finis intégrait le projet dans sa globalité. Lors de modifications ou d'adaptations du projet, il était possible de modifier très rapidement le modèle de base pour prédire les conséquences, principe même de la méthode observationnelle. Autrement dit, l'approche numérique constitue aussi bien un outil de conception, et de dimensionnement, que de vérification en cours de travaux.

Françoise Geiser, Samuel Vurpillot, Jérémie Crisinel  
De Cérenville Géotechnique SA, CH - 1024 Ecublens

Françoise Geiser, Stéphane Commend  
ComSA Ingénieurs Conseils, CH - 1020 Renens

Samuel Vurpillot  
Smartec SA, CH - 6928 Manno

#### Références

- [1] « Z\_Soil 2002 User manual », Zace Services Ltd, Elmepress International (Lausanne), 1985-2002
- [2] M. DYSU, A. FONTANA, J. RYBISAR : « Enceinte en paroi moulée dans des limons argileux: calculs et observations », 7<sup>e</sup> Conférence Européenne de Mécanique des Sols et de Travaux de Fondations (vol. 3), Brighton, 1979
- [3] M. DYSU, A. FONTANA : « Déformations autour des excavations en terrain compressible », *Ingénieurs et architectes suisses* N° 12/1988, pp. 179-185
- [4] « Etude géotechnique », Géotechnique Appliquée Dériaz SA, Genève, 2001
- [5] T. H. HANNA : « Field Instrumentation in Geotechnical Engineering », Trans Tech Publications, Series on Rock and Soil Mechanics Vol. 10 (1985)
- [6] D. INAUDI : « Application of fiber optic sensors to structural monitoring », Trends in optical nondestructive testing and inspection, P. K. Rastogi and D. Inaudi editors, Elsevier Science (2000), Chapter 30, pp. 459-472
- [7] D. INAUDI, S. VURPILLOT : « SOFO: Surveillance d'ouvrages par senseurs à fibres optiques », *Ingénieurs et architectes suisses* N° 26/1995, pp. 522-529

#### Eléments finis

Le principe de la méthode des éléments finis consiste à discréteriser la structure à calculer et le domaine avoisinant en petits éléments sur lesquels les équations gouvernant le problème (équilibre des forces par exemple) doivent être satisfaites de manière intégrale. Les contributions de ces éléments sont assemblées à l'intérieur d'un système linéaire dont la solution fournit la distribution des déplacements, contraintes, pressions interstitielles à l'intérieur du domaine considéré. L'avantage principal de cette méthode est de prendre en compte, dans un seul calcul, tous les paramètres affectant le problème: géométrie complexe, lois constitutives non linéaires, phases d'excavation ou de construction, état initial du terrain, interaction sol-structure, pressions dans l'eau, etc.

L'analyse tridimensionnelle permet en outre de s'affranchir des simplifications inévitables qu'entraînerait une modélisation dans le plan, et de présenter les résultats au maître de l'ouvrage sous une forme parlante et attractive. Toutefois, le nombre d'inconnues et donc la taille du système d'équations augmentent sensiblement dans le cas d'une modélisation 3D. Les temps de calcul d'une variante peuvent atteindre plusieurs jours suivant le nombre d'éléments, le degré de non-linéarité et le nombre d'étapes d'excavation considérées.