

### Editorial

En quoi est-il utile de recourir aux compétences de GeoMod ? Notre force est de pouvoir intervenir de façon rapide à tous les stades de projet pour nos clients, en recourant à notre longue expérience de l'utilisation des éléments finis pour les problèmes d'interactions sols-structures.

Ainsi, en stade d'avant-projet, nous pouvons contribuer à comparer et évaluer des variantes (faisabilité, impact en termes de déformations pour les ouvrages existants, etc.), en recourant à des modèles simples et peu onéreux, avec la possibilité de visualiser rapidement les résultats.

Une fois la variante retenue, plus classiquement, GeoMod peut vérifier la solution retenue, effectuer des études paramétriques et dimensionner la variante en recourant à la méthode des éléments finis. Les concepts d'état limite de service et d'utilisation sont intégrables à ces calculs, soit en considérant un facteur global, soit par exemple en recourant à des approches s'apparentant à celle proposé dans la directive de l'OFROU pour les tranchées couvertes. A ce stade, comme le montre l'exemple de la grande fouille en milieu urbain décrit ci-dessous, notre approche permet également de tester de possibles optimisations de projet.

Enfin, nous pouvons également intervenir comme appui au stade d'expertises, pour permettre à l'expert spécialiste de valider ou non ses hypothèses, d'illustrer d'éventuels mécanismes de rupture, etc.



### Optimisation d'une grande fouille en milieu urbain à l'aide d'un modèle tridimensionnel

*En collaboration avec Karakas & Français SA*

Le projet SOVALP vise à valoriser des terrains appartenant aux CFF dans le quartier de la Praille, à Genève. Dans ce cadre, Geomod a été mandaté par le bureau Karakas & Français afin de modéliser la construction des fondations de trois tours de 16 étages. Le périmètre pris en considération dans le modèle aux éléments finis est indiqué en rouge à la Figure 1.

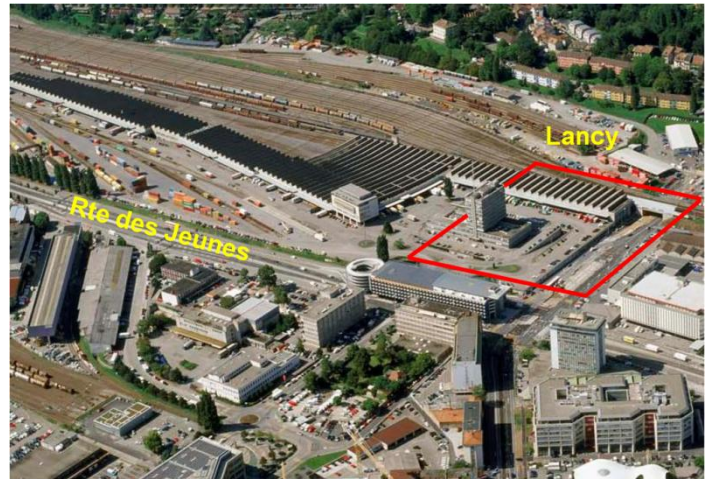


Figure 1. Vue aérienne de la zone autour de la halte CFF Lancy-Pont Rouge à Genève

Ce modèle a permis d'orienter le choix du système de soutènement optimal en respectant les exigences en matière d'aptitude au service, et d'optimiser le système de soutènement localement par adaptation des ancrages, butons et autres mesures constructives.

La Figure 2 illustre le modèle aux éléments finis utilisé, avec indication des principaux éléments constructifs et des structures avoisinantes.

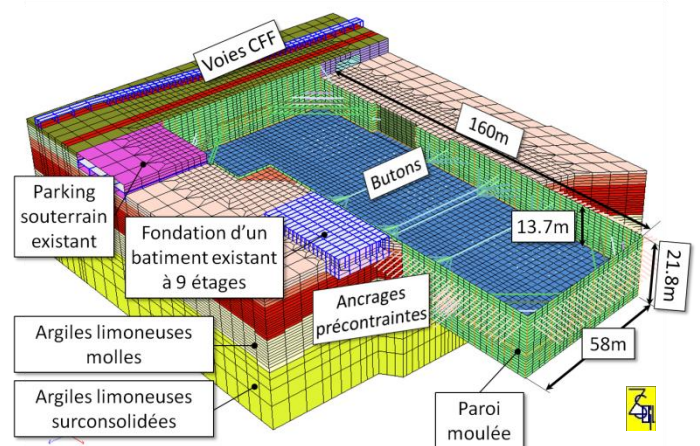


Figure 2. Modèle EF tridimensionnel

Les exigences auxquelles le système de soutènement doit répondre concernent en particulier les déplacements au droit du bâtiment existant de 9 étages, ainsi qu'au droit des voies CFF. Afin de reproduire au mieux le

comportement des sols en présence, une loi constitutive avancée a été utilisée : la loi Hardening-Soil with Small strain extension (ou HSS), aujourd'hui largement répandue en modélisation de problèmes d'interaction sol-structure. L'expérience montre en effet que grâce à la possibilité de spécifier un module d'élasticité pour les très petites déformations ( $E_0$ ), la loi HSS permet de calculer des cuvettes de tassement plus réalistes que d'autres modèles constitutifs plus simples.

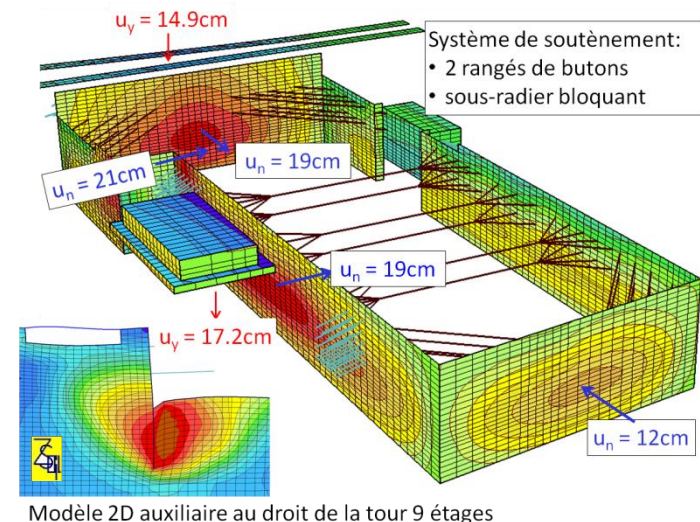


Figure 3. Déplacements du système de soutènement initial

Le choix de la variante de soutènement définitive s'est fait en trois étapes. La modélisation du concept initialement imaginé a permis de mettre en évidence la difficulté qu'induit la présence de couches d'argiles limoneuses molles au niveau de la fiche de la paroi moulée. Ces argiles ne permettent pas de mobiliser suffisamment de butée, et par conséquent les déplacements horizontaux de la paroi étaient particulièrement élevés, comme le montre la Figure 3. Il a donc été décidé d'améliorer le sol sous le fond de fouille par une maille composée de colonnes jet qui aident à la reprise de la butée de la paroi moulée sous le fond de fouille (voir Figure 4, espacement entre les colonnes = 10 m). Ces parois ont été introduites dans le modèle à l'aide d'éléments coque.

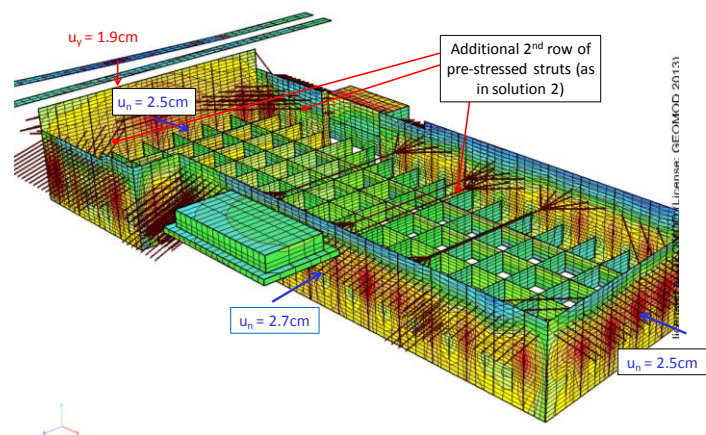


Figure 4. Déplacements du système de soutènement final, avec optimisations

Pour arriver au système de soutènement final illustré à la Figure 4, il a été également nécessaire de précontraindre une rangée de butons, afin de réduire encore les déplacements des parois.

Une fois le choix du système validé par les ingénieurs projeteurs, quelques éléments ont encore été améliorés dans le modèle aux éléments finis afin de coller au mieux à la réalité. Ces détails avaient dans un premier temps été modélisés de manière simplifiée, afin non seulement de réduire le temps de création du modèle mais encore de limiter les temps de calcul dans les phases initiales d'études de variantes. Ces modifications, visant à mieux reproduire certains aspects non-linéaires de l'ouvrage, sont :

- l'introduction de rotules au droit des joints des panneaux de la paroi moulée, afin de ne pas sous-estimer les déplacements horizontaux dus au comportement longitudinal,
- la modélisation non-linéaire (élasto-plastique) des parois en jetting,
- l'introduction de joints non-linéaires entre les parois en jetting et la paroi moulée, afin d'éviter une transmission d'efforts de traction, comme l'indique la Figure 5.

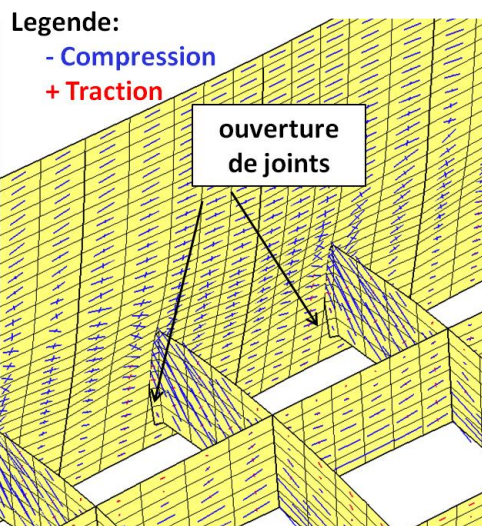


Figure 5. Introduction de joints non-linéaires entre la paroi moulée et les parois en jetting.

Enfin, les futurs bâtiments fondés sur pieux ont été introduits dans le modèle, de manière explicite en ce qui concerne les 3 étages souterrains, et à l'aide de charges pour les étages supérieurs. La Figure 6 montre les déplacements absolus subis par le bâtiment au final.

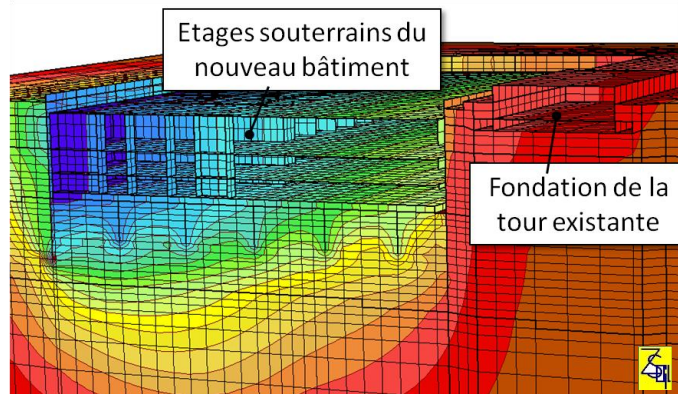


Figure 6. Déplacements verticaux (ouvrage final)

En conclusion, pour contribuer au mieux à l'optimisation d'un projet tel que celui-ci à l'aide de l'outil « modélisation numérique », il faut :

- une étroite collaboration avec les ingénieurs projeteurs permettant de tirer au mieux profit des différents résultats que le modèle peut fournir,
- un logiciel fiable et flexible, intégrant des lois constitutives avancées,
- que tous les inputs du modèle numérique soient validés par les concepteurs (ici un géotechnicien et un ingénieur structure) en cours de projet,
- au vu de la taille du modèle (plusieurs centaines de milliers d'équations), vérifier certains aspects du problème à l'aide de calculs à la main, ou au moyen de modèles auxiliaires simplifiés.

### Prédiction du comportement des fondations d'un pont sur l'autoroute A9

En collaboration avec IUB ingénieurs SA



Figure 7. Situation du pont à remplacer

Le remplacement d'un pont existant passant sur l'autoroute A9 à la sortie de Villeneuve (Figure 7) a fait l'objet d'une modélisation tridimensionnelle.

Le but était de valider le concept imaginé par l'ingénieur projeteur afin de réaliser les fondations du nouveau pont dans des terrains de qualité médiocre, avec un niveau de nappe proche de la surface.

Ce concept d'intervention (Figure 8) prévoyait tout d'abord la réalisation d'une paroi clouée à l'amont de l'ouvrage, puis la création d'un blindage - composé de pieux sécants - afin de pouvoir réaliser la fondation du pont, composée d'un massif en béton reposant sur neuf pieux flottants.

Le modèle numérique a permis de mettre en évidence l'apport d'un étai central lors de la réalisation du blindage (Figure 9), puis de vérifier le comportement de la fondation, en particulier les tassements et les efforts dans les pieux, sous différents cas de charge (Figure 10).

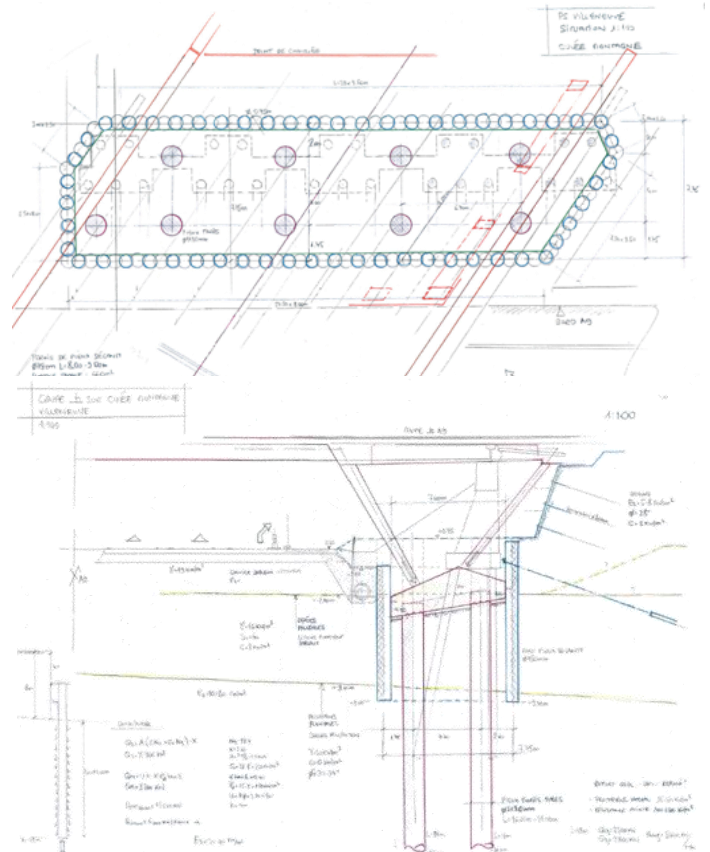


Figure 8. Concept de l'ingénieur projeteur (situation et coupe)

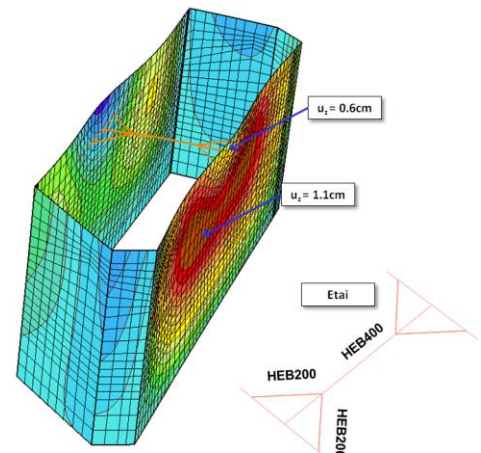


Figure 9. Déplacements horizontaux lors de l'excavation à l'intérieur du blindage

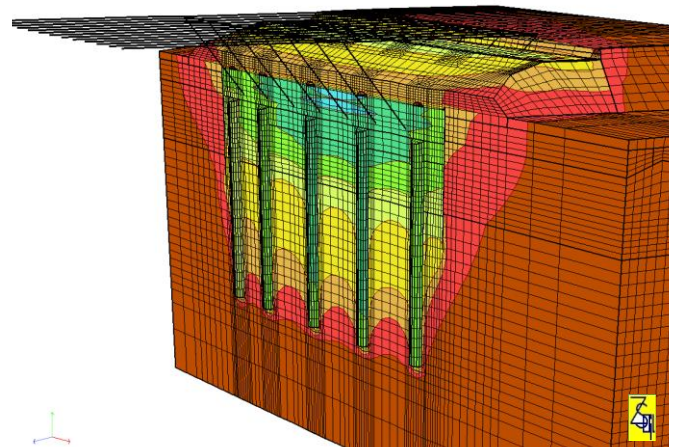


Figure 10. Déplacements verticaux sous charges de service

## Séisme : application de la méthode pushover en tenant compte du sol avoisinant

En collaboration avec Prof. Th. Zimmermann, Zace Services SA

Afin de vérifier les structures existantes au séisme, une méthode non linéaire alternative à la résolution de l'équation dynamique dans le temps a vu le jour à la fin des années 1990, et est aujourd'hui documentée dans les différentes normes en vigueur : la méthode pushover. Basée sur les déformations, elle permet de définir un déplacement cible en comparant un spectre de demande (fourni par les normes) et un spectre de capacité (obtenu en exprimant le déplacement de la structure en fonction de l'augmentation monotone d'une force horizontale).

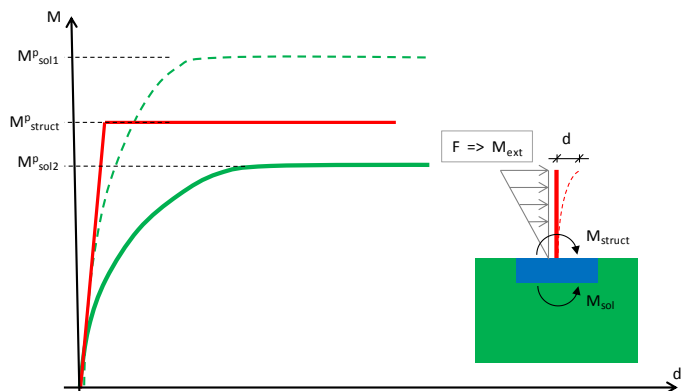


Figure 11. Prise en compte du sol dans la technique pushover

Cette méthode, aujourd'hui appliquée aux structures uniquement, peut être étendue au système structure-sol avoisinant. La prise en compte du sol permettrait ainsi de se rapprocher du comportement réel du système et, dans le cas d'un sol relativement peu résistant et donc peu « encastrant » (courbe verte « pleine », Fig. 11), de montrer que lors d'un séisme, la plastification dans le sol peut se produire avant celle de la structure. Il en découlerait certes des déplacements plus importants, mais surtout une réduction importante des efforts de flexion maximaux (exemple sur une structure à deux étages, Fig. 12), et ainsi un potentiel d'économie certain.

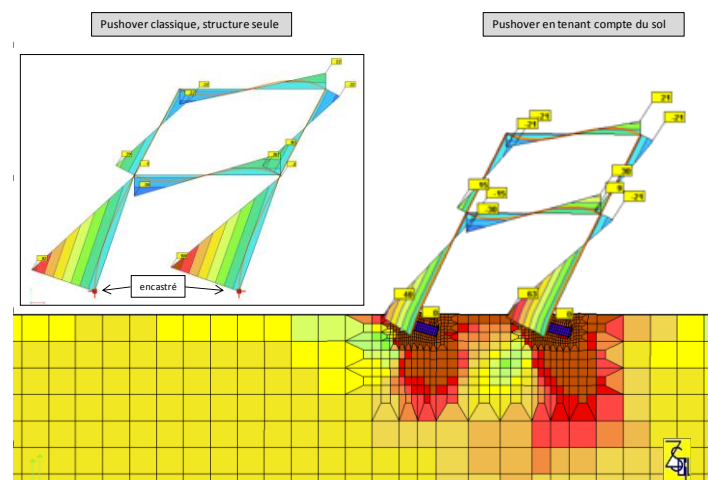


Figure 12. Pushover classique (gauche) et avec prise en compte du sol (droite). Déformée correspondante aux déplacements cibles, moments de flexion associés, et plastification du sol

Afin de pouvoir valider l'approche pushover, il est aujourd'hui possible de comparer l'ordre de grandeur des déplacements et des efforts avec ceux obtenus par une véritable analyse dynamique (\*) dans le temps.

Dans le cas de la structure à deux étages de la Figure 12, le déplacement cible obtenu par la méthode pushover avec prise en compte du sol atteint 7.3 cm pour le spectre de dimensionnement considéré (contre 6.0 cm en considérant la structure seule, encastree à sa base). Ces valeurs peuvent être comparées avec le déplacement horizontal maximal de l'étage supérieur obtenu par analyse non linéaire dans le temps, considérant une accélération au niveau de la base de la structure compatible avec le spectre de dimensionnement : -5/+8 cm (Figure 13).

Le moment de flexion correspondant à ce déplacement cible atteint 63 kNm dans le cas du pushover tenant compte du sol, au lieu de 100 kNm en ne considérant que la structure, encastree à sa base. L'enveloppe des moments obtenue par analyse non linéaire dans le temps indique quant à elle des valeurs maximales de l'ordre de 66 kNm (au lieu de 113 kNm pour le cas encastree).

En conclusion, la prise en compte du sol réduit de manière sensible les efforts de flexion dans les membres de la structure, et ce pour les deux approches considérées : l'analyse non linéaire dans le temps et la méthode pushover.

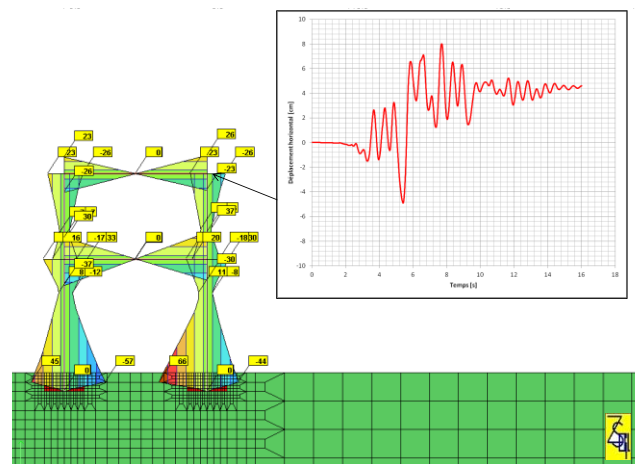


Figure 13. Analyse non linéaire dans le temps. Enveloppe des moments et déplacement horizontal de l'étage supérieur

(\*) Au début des années 2000, il paraissait encore improbable de pouvoir résoudre dans un futur proche un tel problème sur un PC. Une dizaine d'années plus tard, la résolution de l'équation de la dynamique sur un domaine non linéaire et biphase comportant de l'interaction sol-structure est pourtant possible, grâce entre autre à la méthode DRM (Domain Reduction Method), permettant de subdiviser le problème en deux modèles : l'un, linéaire, souvent essentiellement unidimensionnel, fournissant l'input sismique (free-field motion), l'autre, non linéaire, limité à la proximité de la structure analysée.



GeoMod ingénieurs conseils SA  
Ch. des Epinettes 32  
CH-1007 Lausanne  
[www.geomod.ch](http://www.geomod.ch)

Décembre 2013