

Bilan des dix dernières années

• Introduction

L'idée d'une société indépendante, entièrement consacrée à la modélisation numérique de pointe de problèmes géomécaniques, a germé dans l'esprit des dirigeants de deux sociétés lausannoises de géotechnique et d'ingénierie (De Cérenville Géotechnique SA et Stucky SA) dans le courant de l'année 2002.

Cette société a vu le jour en septembre de cette même année, et a pris le nom de GeoMod dès octobre 2003. Depuis, la structure de la société a évolué, avec l'appui de quatre sociétés actionnaires : De Cérenville Géotechnique SA, SRP AG, Bureau Technique Norbert SA et BG ingénieurs conseils SA. La majorité des actions est toujours restée entre les mains des employés de GeoMod.

Au cours des dix dernières années, la modélisation numérique au sein de GeoMod a passablement évolué, parallèlement au développement de l'informatique et plus particulièrement de ZSOIL, logiciel basé sur la méthode des éléments finis que nous utilisons de manière intensive.

Aujourd'hui, pour de nombreux mandats auxquels l'ingénieur projeteur est confronté, la problématique déterminante lors de la conception ou la vérification d'un ouvrage est liée aux déformations engendrées par la construction ou la réfection de celui-ci: les nuisances liées à ces déformations ne sont plus admises par les collectivités publiques ou les riverains du projet.

La modélisation numérique par éléments finis – à l'aide de lois constitutives adaptées – est l'une des solutions les plus élégantes permettant d'évaluer ces déformations. Elle apporte ainsi une valeur ajoutée essentielle au calcul d'ouvrages complexes construits en milieu urbain (tunnels, fouilles profondes, tranchées couvertes, ...).

• Evolution de la modélisation numérique

Le nombre d'éléments finis dans les maillages tridimensionnels que nous élaborions dans le passé était passablement restreint (Figures 1 et 2). Aujourd'hui, il n'y a quasiment plus de limite autre que celle en relation avec la puissance de calcul disponible dans les ordinateurs (Figures 3 et 4).

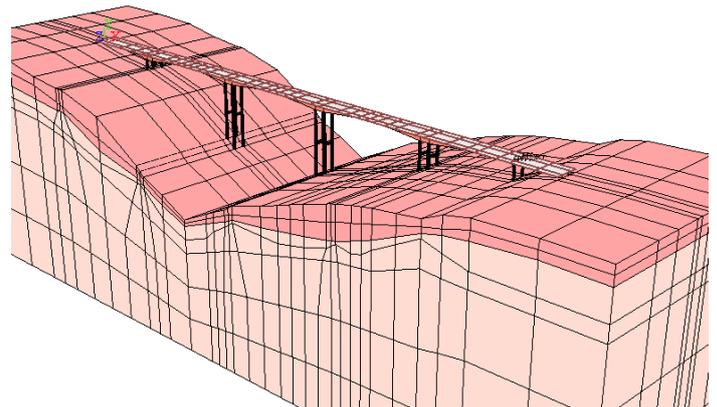


Figure 1. Vérification au séisme d'un viaduc (2004).
Le maillage comporte environ 1'000 éléments

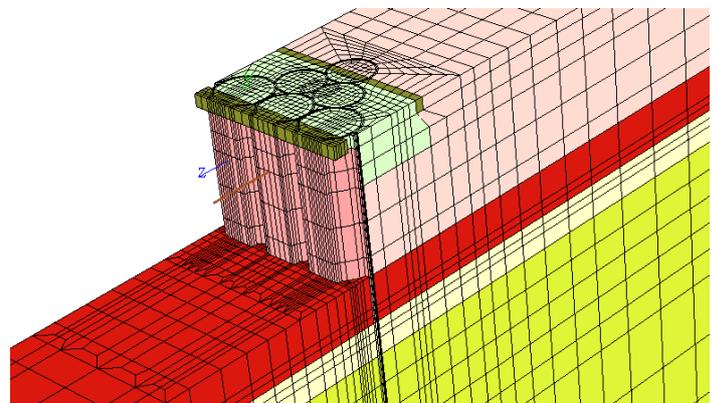


Figure 2. Modélisation de caissons portuaires (2004).
Le maillage est composé de 26'500 éléments

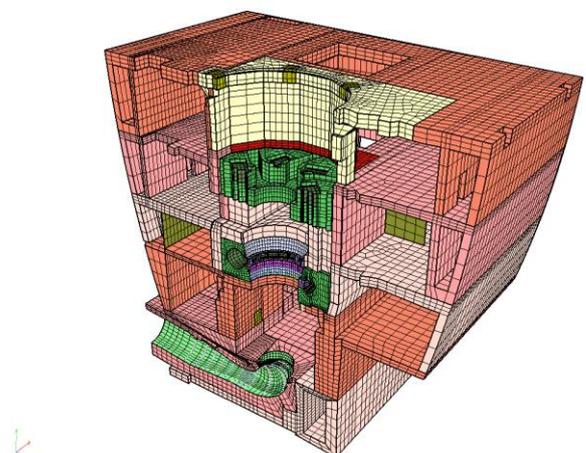


Figure 3. Massif de fondation pour une turbine (2011).
Le maillage comporte plus de 73'000 éléments

L'évolution de la convivialité du logiciel avec lequel nous travaillons nous permet également de réduire les temps de construction du maillage, et d'être plus efficaces.

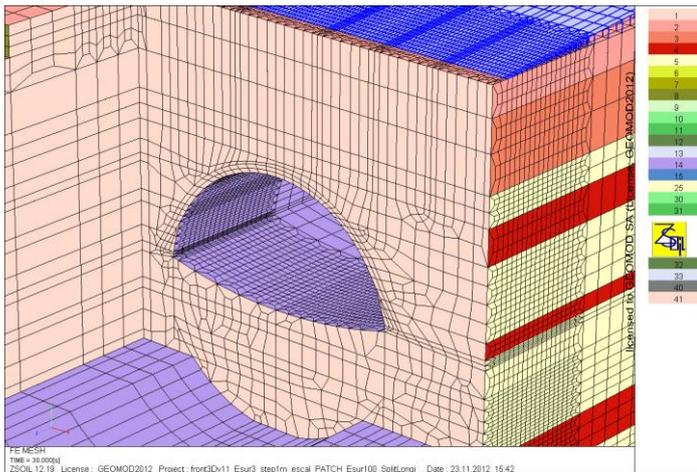


Figure 4. Excavation d'un tunnel en molasse (2011).
Le nombre d'éléments dépasse les 260'000

- *Evolution des lois constitutives*

Du point de vue constitutif, la modélisation des sols et des roches a énormément évolué au niveau des logiciels d'éléments finis au cours de ces dernières années, et permet de prédire avec plus de finesse le comportement de différents types de sols et de roches, autant à l'état de service qu'à la ruine. Par exemple, la capacité du modèle « Hardening Soil with Small Strain extension » (ou HSS) à reproduire les phénomènes suivants, observés tant in situ qu'en laboratoire, permet de modéliser au mieux le comportement d'une large variété de sols (cohésifs ou granulaires), et ce sans devoir recourir à des artifices de calcul liés aux limites de modèles constitutifs plus simples:

- *Distinction de la rigidité du sol selon les modes de charge ou de décharge* : sans cette caractéristique, il est difficile d'effectuer une modélisation correcte de certains problèmes typiques d'interaction sol-structure, comme les excavations profondes, les tranchées couvertes, ou le creusement des tunnels. La distinction entre les modules de charge et de décharge permet de prédire au mieux les déformations des soutènements, la convergence des tunnels et les tassements à l'arrière des parois.

- *Rigidité du sol dépendant de l'état de contrainte (et donc de la profondeur)* : d'après les observations et la littérature, la rigidité du sol dépend de l'état de contrainte. Cette rigidité varie ainsi selon la profondeur, mais aussi en fonction des charges appliquées.

- *Grande rigidité (rigidité « dynamique ») dans le domaine des petites déformations* : le domaine de déformation dans lequel le sol peut être considéré véritablement comme matériau élastique est très petit. Une fois un certain seuil dépassé, une forte dégradation de la rigidité est observée (élasticité non-linéaire), et des déformations plastiques peuvent se produire.

- *Préconsolidation* : les phénomènes de surconsolidation des couches de sols superficielles, dus tant à l'histoire des contraintes qu'à différents phénomènes naturels, peuvent être pris en compte par ce modèle.

- *Occurrence de déformations plastiques avant l'état limite* : ce phénomène est par exemple observé en laboratoire sous conditions triaxiales, avec une relation fortement non-linéaire entre la contrainte et la déformation. Ce type de comportement est observé bien avant l'état ultime et commence tout au début du chargement. L'introduction d'un mécanisme d'écroûissage déviatoire dans le modèle permet de reproduire correctement cette courbe non-linéaire.

De nombreuses modélisations traitées aujourd'hui par GeoMod s'effectue à l'aide de ce modèle HSS pour les sols. A titre d'illustration, les tassements observés sous une fondation superficielle reposant sur un sable surconsolidé du Texas lors de cycles de charge et de décharge appliqués sur la fondation sont illustrés en Figures 5 et 6.

Les prédictions du modèle HSS (courbe verte) sont plus proches de la réalité (mesure in situ, en rouge) que celles du modèle élastiquement parfaitement plastique de Mohr-Coulomb (courbe bleue), grâce à la prise en compte des phénomènes mentionnés plus haut.

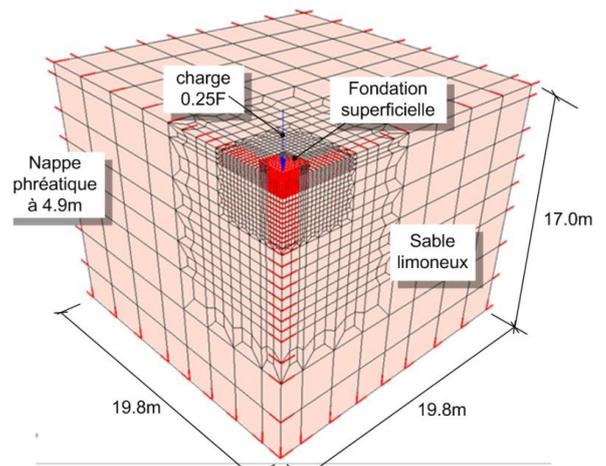


Figure 5. Benchmark « fondation superficielle ». Maillage tridimensionnel d'un quart du problème

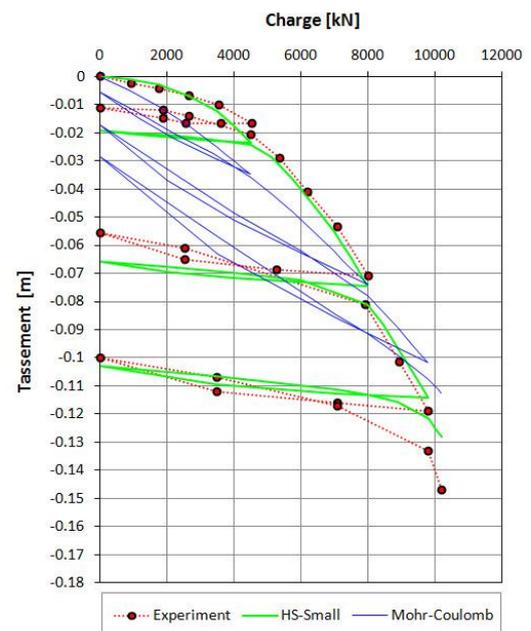


Figure 6. Benchmark « fondation superficielle ». Comparaison des tassements obtenus

En présence d'essais en laboratoire (essai triaxial et oedomètre), les paramètres du modèle HSS peuvent être déterminés de manière précise. Malheureusement, de tels essais ne sont pas toujours disponibles, et l'expérience du géotechnicien du projet est prépondérante au moment de définir les paramètres de déformabilité et de résistance qui vont constituer la base d'une prédiction fiable. En parallèle, GeoMod participe activement à l'élaboration d'une boîte à outils interactive pour le logiciel ZSOIL, basée sur de nombreuses corrélations issues de la littérature, afin de fournir une première estimation des paramètres du modèle HSS.

- *Domaines d'activité*

Les domaines d'activités touchés par GeoMod au cours des dix dernières années sont assez divers. A côté de mandats « classiques » de dimensionnement ou de vérification de géostructures telles que tunnels, tranchées couvertes, fouilles ancrées ou étayées, fondations superficielles et profondes (pieux), stabilité de talus et de pentes, barrages et digues, ouvrages portuaires, etc., sont venus petit-à-petit se greffer d'autres domaines connexes, à savoir : l'assainissement de glissements de terrain (Fig. 7), la géothermie et l'hydrogéologie, en collaboration avec la société Terre+ ou la vérification au séisme de structures complexes (viaducs et échangeurs autoroutiers, barrages en remblai ou en béton armé).

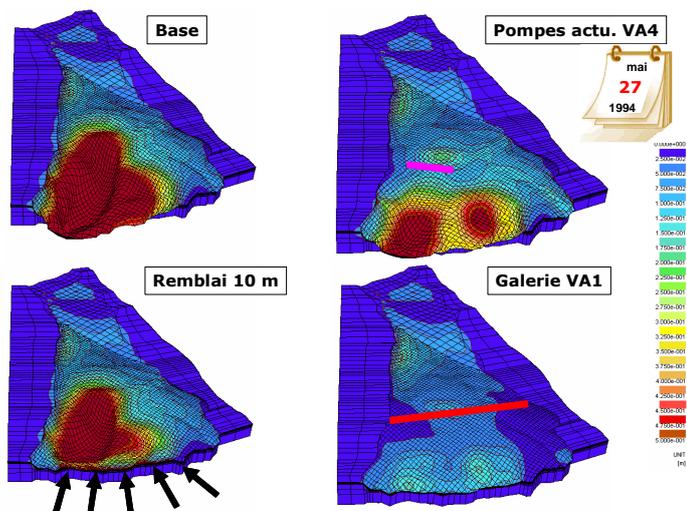


Figure 7. Glissement de la Frasse. Comparaison de différentes solutions d'assainissement

En ce qui concerne les problèmes complexes en dynamique des sols et des structures, GeoMod s'est aujourd'hui spécialisé dans les vérifications basées sur la méthode des déformations (push-over), ainsi que dans la résolution explicite de l'équation du mouvement dans le temps, grâce à l'introduction de conditions de bord absorbantes et de lois constitutives adéquates dans ZSOIL (rigidité dynamique, densification, liquéfaction). Il est ainsi possible de suivre l'évolution des déplacements et des contraintes à l'intérieur d'une structure durant un tremblement de terre, ou de prédire la propagation d'ondes dans des milieux continus sous l'effet de vibrations (Figure 8).

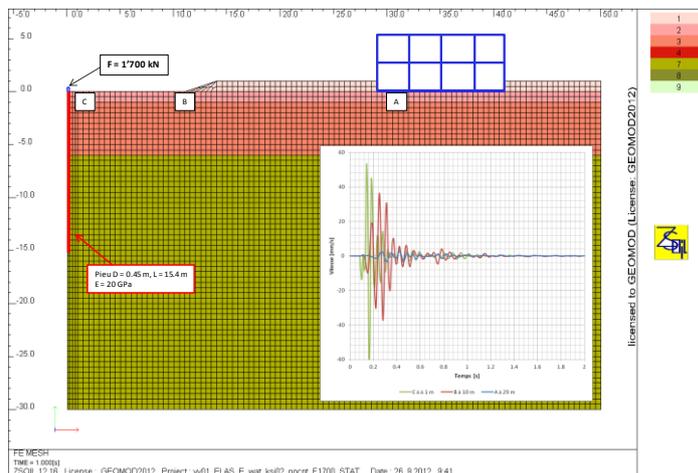


Figure 8. Vitesses horizontales prédites en trois points après battage d'un pieu d'essai

- *Collaborateurs*

Aujourd'hui, l'équipe de GeoMod est composée de quatre ingénieurs civils, à savoir Stéphane Commend, Françoise Geiser, Rafal Obrzud et Matthias Preisig, tous quatre titulaires d'un doctorat en sciences techniques délivré par l'EPFL. Si l'on regarde en arrière, on constate qu'en dix ans le volume d'affaires et le nombre de collaborateurs ont quasiment doublé (Figure 9).

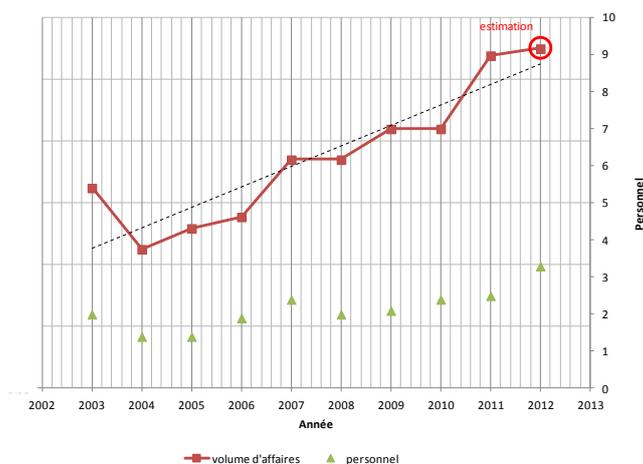


Figure 9. Evolution du volume d'affaires et du nombre de collaborateurs

- *Et demain ?*

La collaboration avec les développeurs du logiciel ZSOIL s'est intensifiée au cours des cinq dernières années, et GeoMod est aujourd'hui active tant au niveau du développement de nouveaux outils, qu'à celui de l'aide à l'apprentissage du logiciel grâce aux cours et séminaires donnés par ses collaborateurs.

GeoMod se positionne également en Suisse alémanique, y prospecte activement grâce à ses deux membres germanophones, et vient de remporter un mandat très intéressant portant sur l'assainissement du glissement de terrain de Braunwald, dans le canton de Glaris.

Nous remercions l'ensemble des sociétés qui nous ont confié l'un ou l'autre des 400 mandats traités par GeoMod. Nous nous réjouissons d'ores et déjà de continuer à travailler avec vous, dans le souci de tendre vers une ingénierie de plus en plus pointue, efficace et au service de notre société.

Modélisation et dimensionnement de massifs d'appuis pour une conduite hydraulique

En collaboration avec CETP ingénieurs conseils SA

Dans le cadre de l'aménagement hydroélectrique de la Vièze (Fig. 10), les massifs d'appui d'une conduite forcée de diamètre 1500 mm ont été dimensionnés à l'aide de plusieurs modèles tridimensionnels.

En particulier, la modélisation géométrique du massif d'appui PF7 (Fig. 11), situé en plaine à proximité de l'usine électrique, s'est avéré d'une grande complexité (bifurcation de conduites, interaction avec les canaux de fuite existants et avec le bâtiment de la centrale, etc.).



Figure 10. Nouveau massif d'appui PF7, photo en cours de construction

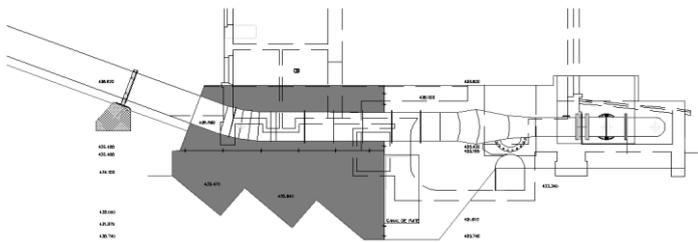


Figure 11. Nouveau massif d'appui PF7, plan en coupe

La Figure 12 illustre le maillage tridimensionnel utilisé. Différents cas de charge ont été calculés, tenant compte de la charge dans la conduite, des effets de bord, des variations de température, de l'ouverture ou la fermeture de certaines vannes. La Figure 13 illustre les contraintes principales de traction au droit de deux coupes pour l'un de ces cas de charge, permettant par la suite le dimensionnement de l'armature du massif d'appui. Enfin la Figure 14 illustre le déplacement du massif par rapport à la centrale électrique existante sous le cas de charge « vannes ouvertes ».

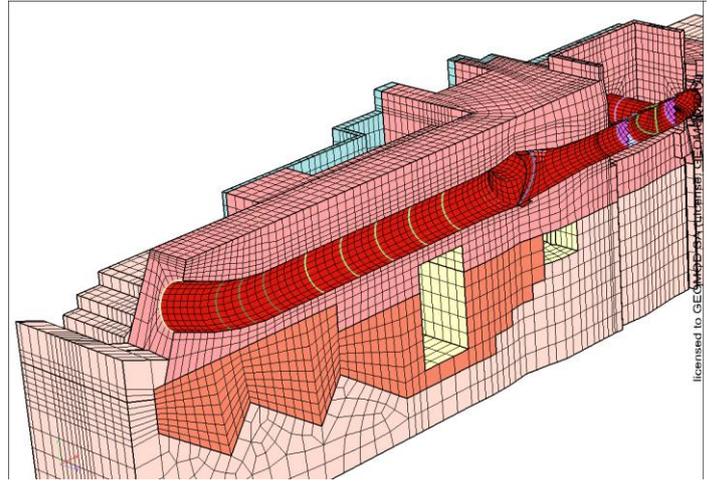


Figure 12. Une partie du maillage 3D du massif d'appui PF7

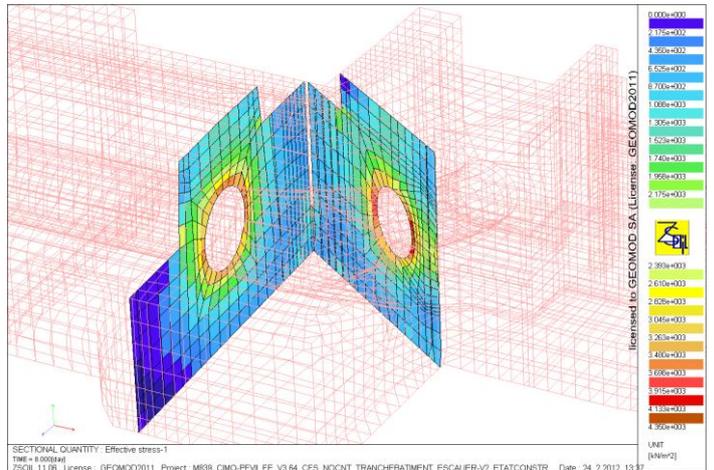


Figure 13. Contraintes principales de traction sur deux coupes

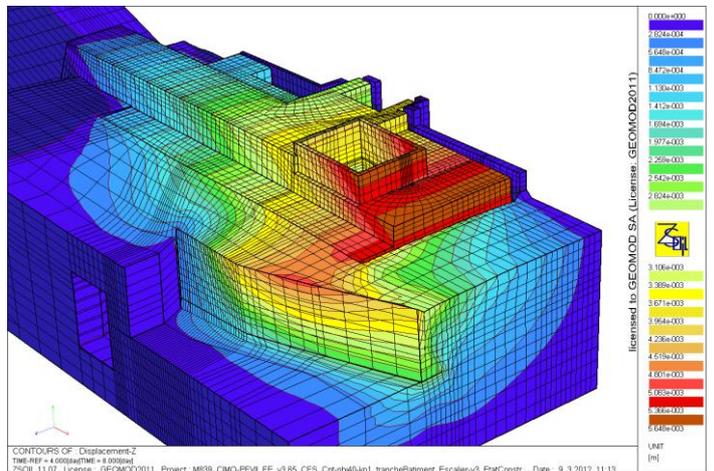


Figure 14. Déplacements absolus sous le cas de charge « vannes ouvertes »



GeoMod ingénieurs conseils SA
Ch. des Epinettes 32 – CH-1007 Lausanne
TN 10 ans / Lausanne, décembre 2012 / SC+FG+RO+MP
www.geomod.ch