GEOMOD

TECHNICAL NEWS

Editorial

Suite aux deux années que nous venons de passer dans notre structure indépendante dédiée à la modélisation numérique de pointe dans les domaines du génie civil et de la géotechnique, nous souhaitons partager un peu de notre expérience, à travers ce bulletin. Celui-ci se veut simple à lire, délaissant volontairement lois constitutives complexes et équations aux dérivées partielles pour se concentrer sur l'application de la modélisation numérique à des cas concrets.

Les activités de notre société durant cette période ont été variées. La figure 1 illustre la répartition par type d'objet des mandats traités par GeoMod. La durée consacrée à chacun de ces mandats peut varier de quelques jours à plus d'une année !

Notre bureau est principalement contacté en phase d'étude afin de valider numériquement la variante définitive. L'an prochain, GeoMod souhaiterait s'investir plus encore dans les phases initiales des projets (concours, avant-projet, étude de variantes), convaincus des avantages qu'une approche intégrée telle que celle que nous défendons peut apporter à ce stade.

After the last two years we have spent in an independent company dedicated to numerical modelling in the field of civil and geotechnical engineering, we would like to share some experience through this brochure, focused on simple "real life" problems. Figure 1 illustrates the type of projects that we have been working on. The smallest of these contracts occupied us for a couple of days. The most important lasted over a year! Next year we'd like to get involved more and more in the initial steps of the project (contests, case studies), where an integrated technique like the one we use should bring advantages.

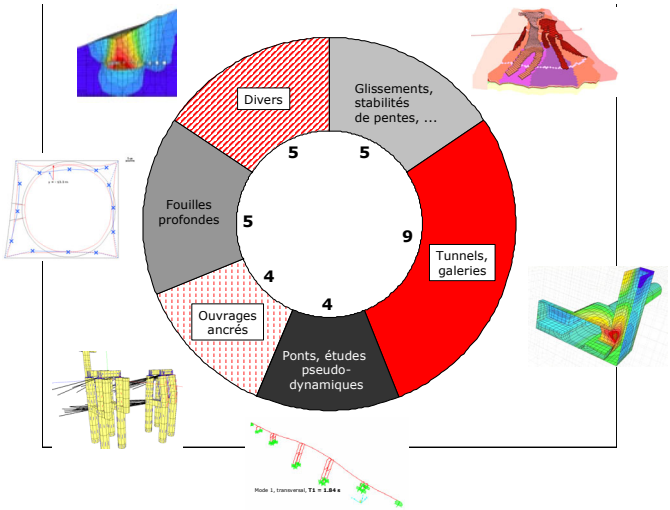


Figure 1. Répartition des mandats par type d'objet

Confortation d'un glissement de terrain

A fully coupled elastoplastic 3D finite element approach applied to a large landslide analysis is described here. First, a hydrogeological model has been adopted by the engineers. Then, a flow-only computation, including geology and transient hydraulic conditions, has been carried out at the EPFL with Feflow. Finally, resulting hydraulic boundary conditions have been introduced in a fully coupled transient finite element model (Z_Soil 3D) in order to reproduce the hydro-mechanical aspects of the landslide over a crisis period of about two years. After a careful comparison between computed and observed pressures and displacements, the model has been used in order to evaluate the impact of constructive solutions, such as drainage or filling, on the behavior of the landslide.

Le comportement d'un grand glissement de terrain a été étudié à l'aide d'un modèle tridimensionnel aux éléments finis incluant l'élasto-plasticité des sols et le couplage hydro-mécanique transitoire. Situé dans les Préalpes Suisses, ce glissement occupe une surface au sol d'environ 2.1 x 0.5 km (Figures 2 et 3).

Il est traversé par deux routes cantonales d'importance capitale pour le tourisme de la région. Des mouvements significatifs y ont été observés ces dernières 150 années. Les vitesses de glissement sont variables dans le temps et dans l'espace. Une surface de glissement principale a été identifiée autour de 40 à 80 m de profondeur. Dans la partie inférieure du glissement (zone critique, appelée zone + / ++), des vitesses de l'ordre de 4 m / année ont été observées lors de périodes de crises, la dernière étant survenue en hiver 94-95. A la suite de cette crise, un premier système de drainage a été installé à l'amont de la zone ++ (plateforme de pompes).

L'évolution des pressions interstitielles dans le glissement sur une période de plus de deux ans a été analysée par le GEOLEP-EPFL à l'aide du logiciel FeFlow (prise en compte de la fonte des neiges, évolution du niveau de la nappe, etc.) Par la suite, les conditions de bord hydrauliques résultant de ce premier calcul, variables dans le temps et l'espace, ont été introduites dans le modèle hydro-mécanique (Z_Soil 3D).

Plusieurs maillages ont été utilisés au cours de l'étude : coupe 2D, maillage 3D global, étude locale du remblayage de la rivière coulant au pied du glissement... Le maillage tridimensionnel principal utilisé, comportant plus de 30'000 éléments, est illustré en figure 4. La position des couches découle du modèle géologique.

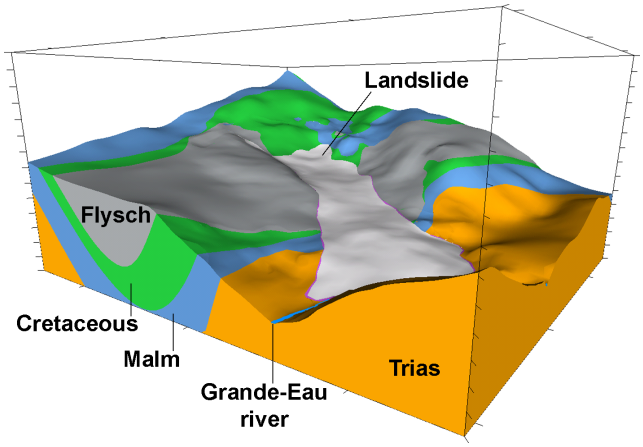


Figure 2. Modèle géologique du glissement

Pour l'étude transitoire représentant l'évolution du glissement entre août 1993 et décembre 1995, plus de 350 calculs ont été effectués, chacun prenant une quinzaine d'heures sur un ordinateur muni d'un processeur P4.

La loi constitutive utilisée dans cette étude est celle de Drucker-Prager, avec une fermeture de la surface de charge de type « Cap » au niveau de la surface de glissement.

La carte des déplacements calculés en fin d'analyse est donnée en figures 4 et 5. La distribution spatiale peut être comparée avec les observations in situ. La concentration des vitesses maximales dans la partie inférieure du glissement (zones + / ++) y est apparente.

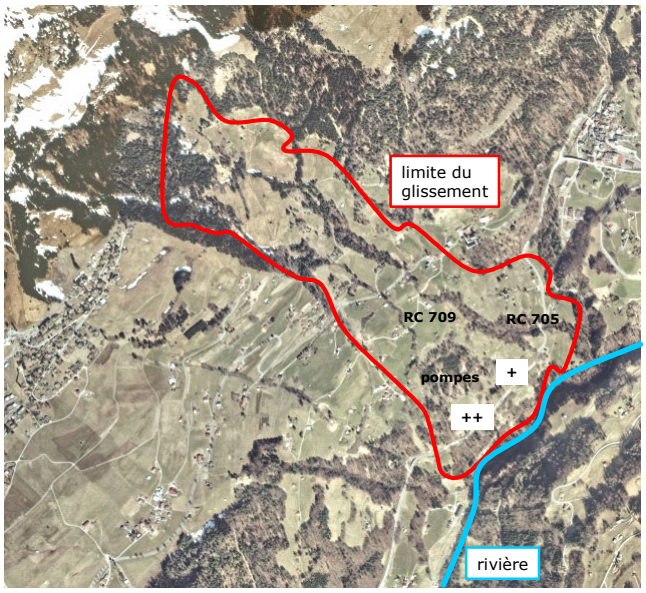


Figure 3. Vue aérienne de la zone en glissement

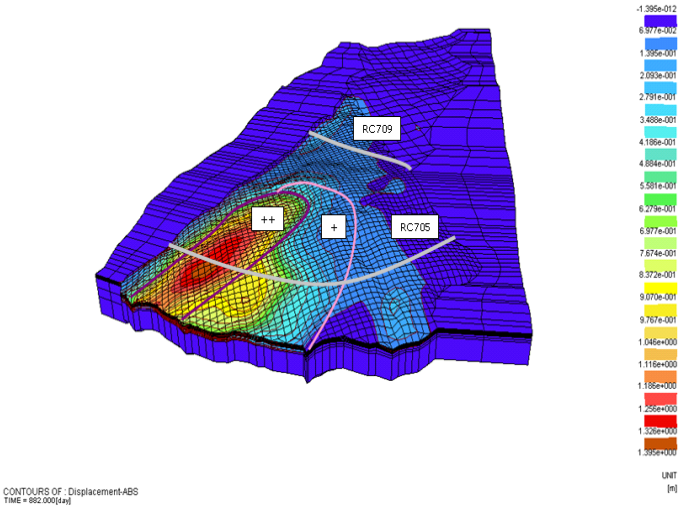


Figure 4. Déplacements horizontaux absolus entre août 93 et décembre 95, vue 3D

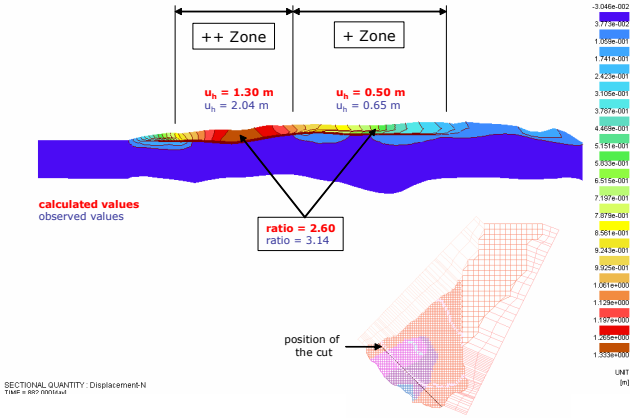
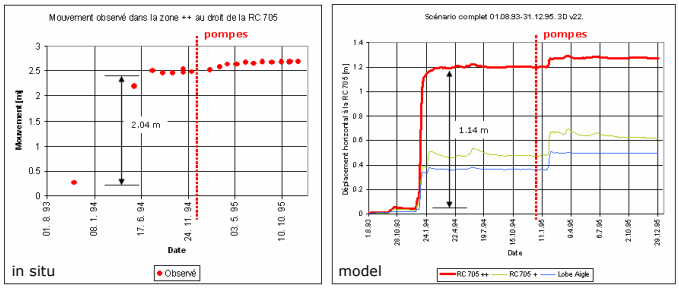


Figure 5. Déplacements horizontaux absolus entre août 93 et décembre95, coupe 2D le long de la RC 705

La figure 6 permet de comparer les déplacements horizontaux prédits et mesurés au niveau de la route RC 705. L'effet de l'apparition de la plateforme de pompage fin 1994 y est flagrant, à la fois dans les mesures sur le terrain et dans la modélisation.

Les différences subsistant entre les valeurs absolues observées in situ et calculées peuvent être expliquées par le caractère continu du modèle, ainsi que par la discrétisation spatiale et temporelle du problème. Toutefois, les rapports de déplacements de la Figure 6 avant et après pompage, ainsi que la répartition spatiale des déplacements, sont satisfaisants. Le modèle est ainsi validé et l'effet de différentes variantes confortatives peut y être étudié : drainage par le biais d'une ligne de pompes traversant tout le glissement d'Est en Ouest, drainage au moyen d'une galerie munie de forages drainants située sous la surface de glissement, remblayage de la rivière située au pied de la masse en mouvement, ...



	in situ measured displacements [m]			3D model displacements [m]		
	Crisis	*Pumping*	Ratio	**Crisis**	*Pumping*	Ratio
++ Zone	**2.04**	*0.17*	12	**1.14**	*0.08*	14
+ Zone	**0.65**	*0.22*	3	**0.45**	*0.17*	3
Left side	**0.01**	*0.01*	1	**0.35**	*0.15*	2

Figure 6. Comparaison des déplacements calculés et observés avant / après construction des pompes en 1994

L'influence de chaque solution de stabilisation est évaluée numériquement par son impact sur les déplacements induits ainsi que sur le facteur de sécurité global du glissement pour la période de crise étudiée (figure 7).

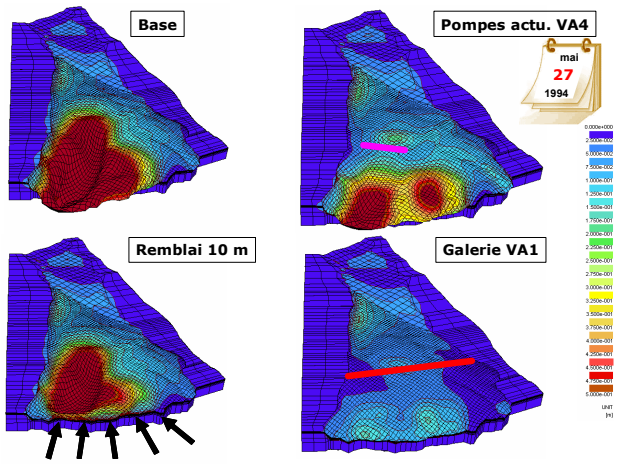


Figure 7. Comparaison de différentes solutions constructives

Notons pour finir l'importance de l'interaction entre les différents intervenants lors d'une modélisation de cette ampleur. Ainsi, « L'association technique pour l'étude du glissement de la Frasse », composée de NCG (Bureau Technique Norbert, géologues à Lausanne + De Cérenville Géotechnique SA), du GEOLEP et du LMS (EPFL) d'une part, le SESA et l'OFEG d'autre part, ont permis à GeoMod d'affiner les modèles numériques au cours des deux années de cette étude.

Vérification au séisme d'un viaduc

Dans le but de vérifier un viaduc autoroutier (Figure 8) au séisme - analyse préliminaire, en collaboration avec R. Beylouné ing. conseil et Giacomini+Jolliet SA, une modélisation a été réalisée en deux étapes. Premièrement, un modèle composé de poutres est construit dans SAP2000, afin d'en extraire les modes de vibration de la structure (Figure 9). Deux valeurs spectrales du spectre de dimensionnement, l'une transversale et l'autre longitudinale, sont ensuite déterminées selon la norme SIA 261, en fonction des modes de vibration. Par la suite, un modèle tridimensionnel aux éléments finis (Z_Soil 3D, Figure 10), comprenant la structure et le terrain avoisinant, est utilisé afin d'y introduire des forces de remplacement, appliquées à la structure en multipliant les charges permanentes par la valeur spectrale du spectre de dimensionnement. En clair, on y introduit une accélération horizontale d'amplitude donnée par le spectre dans le sens considéré (longitudinal ou transversal), en plus de la gravité verticale. Les déplacements (Figure 11) et efforts dans les piles résultants peuvent alors servir de base à la vérification au séisme du viaduc.

A pseudo-dynamic approach has been used in order to verify a motorway high-bridge. A frequency analysis conducted with SAP2000 first yields the two lower vibration modes of the idealized structure (Fig. 9). The resulting transverse and longitudinal accelerations are then applied to a 3D finite element model (Z_Soil 3D, Fig. 10), allowing to compute forces and displacements (Fig. 11) associated with the seismic input.

Figure 8. Vue du viaduc

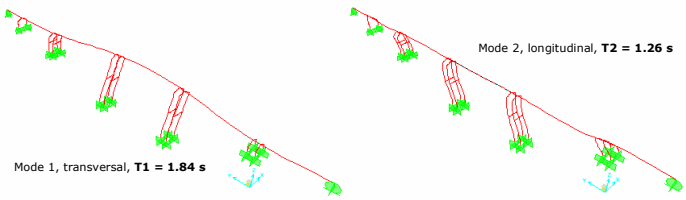


Figure 9. Premiers modes de vibration

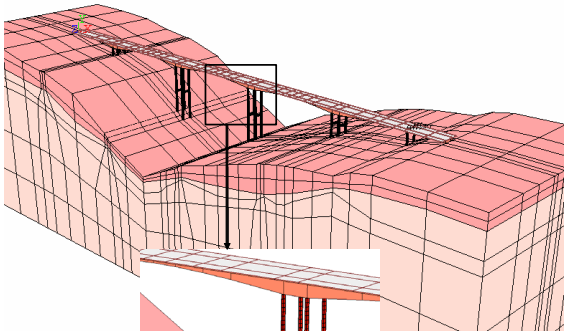


Figure 10. Modèle 3D incluant le viaduc et le terrain avoisinant

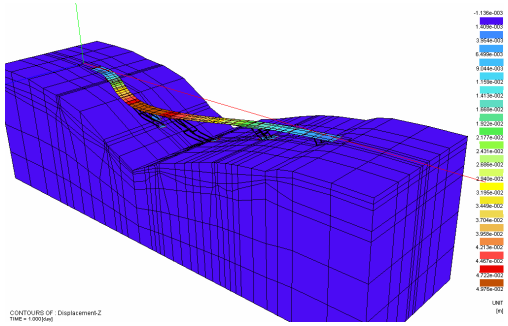


Figure 11. Déplacements associés à l'accélération transversale

Etude d'un quai portuaire

Dans le cadre de l'étude d'un quai maritime formé de caissons (Figure 12) en collaboration avec Oxand SA - spécialiste en analyse de risques - une modélisation numérique a été effectuée afin de se prononcer sur la stabilité de l'ouvrage (Figure 13), sur le risque de poinçonnement des caissons et sur l'aptitude au service du quai. Afin d'intégrer l'histoire des sols en place, un état initial «avant travaux» est considéré. Le calcul est couplé d'un point de vue hydromécanique et les conditions hydrauliques sont considérées comme permanentes. Les déformations, les contraintes (Figure 14) et les niveaux de plasticité dus à la construction du quai ainsi qu'aux charges de service transmises par le portique roulant sur le quai ont été ensuite analysés, en intégrant les données provenant de mesures in situ existantes.

A coupled stability analysis (Fig. 13) of a harbour quay composed of concrete tubes (Fig. 12) has been conducted. Displacements and stresses (Fig. 14) resulting from the quay building and service loading are then compared to in situ measured values.

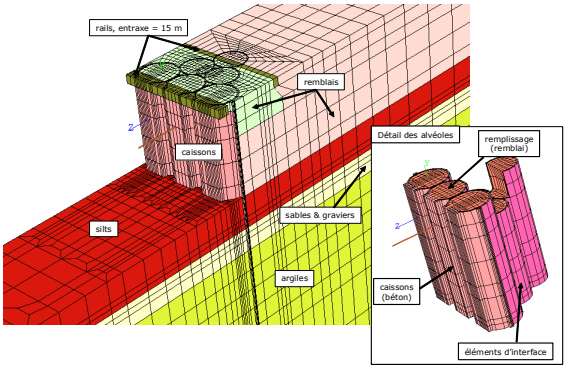


Figure 12. Maillage 3D

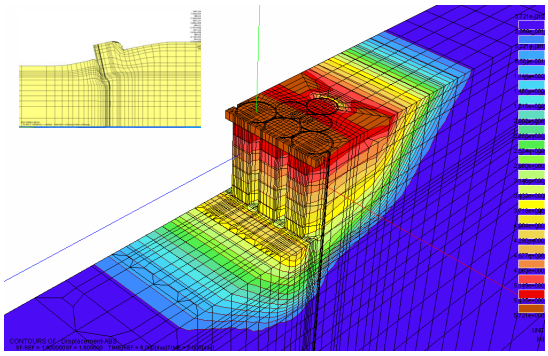


Figure 13. Mécanisme global à la fin de l'analyse de stabilité

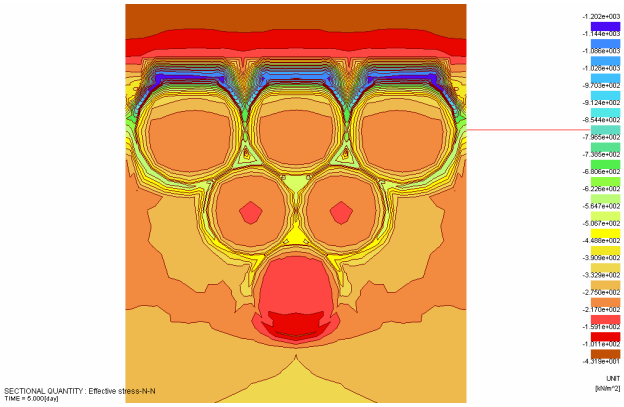


Figure 14. Contraintes verticales dans le sol sous le caisson

Un mot encore...

Dans les environnements de plus en plus urbanisés parmi lesquels l'ingénieur est appelé à concevoir aujourd'hui, le problème des déformations devient aussi important que la sécurité structurale de l'ouvrage, et peut même devenir critique. La méthode des éléments finis couplée à la connaissance des sols en présence est certainement la plus évoluée pour appréhender au mieux ces phénomènes d'aptitude au service.

Deformation studies are more and more important nowadays, due to the highly urban environment where the engineer has to build. We believe that the finite element method, coupled with good soil knowledge, can help to gain confidence in this critical area.

- D'autres domaines du génie civil et environnemental sont susceptibles d'être abordés sous l'angle de modélisation numérique, comme les problèmes de transport (polluants, chaleur, eau, etc.)
- Vous ne nous connaissez pas encore ? Nous venons dans votre société, et nous appliquons gratuitement à titre d'exemple nos méthodes d'analyse numérique à l'un de vos problèmes concrets.
- Nous sommes également à votre disposition pour vous former à l'utilisation de logiciels aux éléments finis, ou pour vous aider à réaliser une modélisation numérique dans vos locaux.
- Nous organisons enfin des mini séminaires sur l'utilisation des méthodes numériques dans le domaine du génie civil et environnemental, ou celui de la géotechnique.

GeoMod ingénieurs conseils SA
Av. des Jordils 5
CH-1006 Lausanne

T : +41 21 311 34 30
F : +41 21 311 34 29
www.geomod.ch
info@geomod.ch