

### Editorial

En 2009 GeoMod a poursuivi activement son action dans la modélisation numérique de pointe, dans des domaines aussi divers que l'expertise d'un ouvrage en construction, la prédiction du comportement d'une décharge de matériaux, l'étude de bâtiments sur pieux, l'aide à la conception et au dimensionnement de tunnels, la vérification au séisme d'une bretelle autoroutière, etc.

Dans ce fascicule, nous présentons trois nouveaux projets, ainsi qu'un résumé du travail de thèse du nouveau collaborateur de GeoMod depuis cet automne : M. Rafal Obrzud.



### Etude d'un barrage avec contreforts

*Maître d'ouvrage : SBB Energie*

*En collaboration avec : CETP SA, Paudex*

Des fissures ont été observées au niveau de certains contreforts du bassin de compensation des Marécottes (Fig. 1), barrage à fines voûtes multiples en béton armé mis en service en 1925. Le but de la modélisation de cet ouvrage était de déterminer les causes potentielles de fissuration, parmi les actions suivantes: poids propre, variation du niveau du bassin, variation de température et mouvements des fondations.

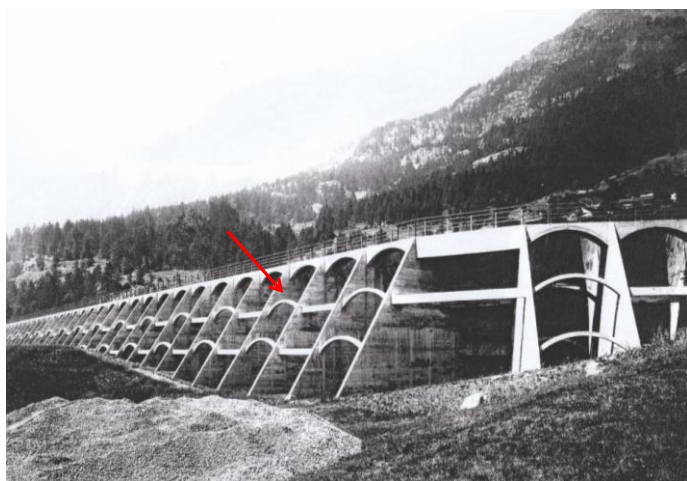


Figure 1. Bassin de compensation des Marécottes

Il a été décidé de ne modéliser qu'un seul contrefort générique possédant des entretoises sur deux niveaux (position indiquée par la flèche rouge en Fig. 1, maillage en Fig. 2). Les armatures n'ont pas été introduites explicitement dans le modèle.

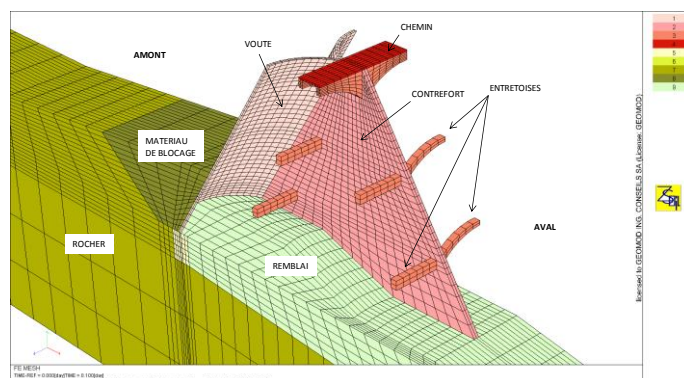


Figure 2. Maillage tridimensionnel d'un contrefort

Les conclusions de l'étude ont montré que :

- Le poids propre et la vidange du bassin n'engendrent pas de contraintes de traction susceptibles d'expliquer les fissures observées
- Un gradient très élevé de température ( $\Delta T = -45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) serait susceptible d'engendrer des contraintes de traction de l'ordre de la résistance à la traction du béton  $f_t$ . Toutefois, le barrage subit probablement des variations de température 2 à 3 fois moins élevées dans la réalité et la variation de température seule ne peut expliquer la fissuration
- Par contre, tous les scénarios de déplacements au niveau des fondations (admis de l'ordre du centimètre) peuvent provoquer l'apparition de contraintes de traction 2 à 4 fois plus élevées que  $f_t$ . L'orientation de ces contraintes au droit de la zone actuellement fissurée (Fig. 3) indique qu'elles pourraient ne pas être reprises par les armatures présentes dans les contreforts (armatures « lisses », espacées d'env. 70 cm), et ainsi être à l'origine des fissures constatées
- L'orientation des contraintes de traction dues au gradient de température correspond à l'orientation des contraintes de traction dues aux mouvements d'appui. Ainsi, l'effet de la température se superposerait à celui des mouvements d'appui

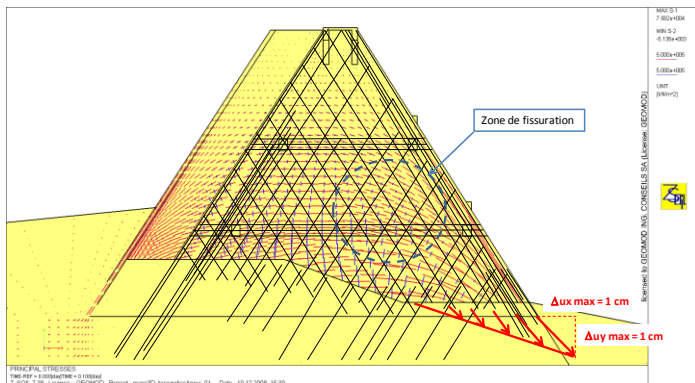


Figure 3. Emplacement des armatures et orientation des contraintes principales (rouges en traction) sous l'effet du mouvement d'appui indiqué

Dans un deuxième temps, le même modèle a été utilisé afin d'effectuer la vérification au séisme du réservoir selon les directives édictées par la section « Barrages » de l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN). L'ouvrage étant de classe III, une vérification pseudo-statique suffit. L'accélération horizontale maximale à prendre en compte atteint 0.5 g pour cet ouvrage. La Figure 4 illustre la déformée du réservoir sous l'effet de cette action (sens amont-aval). La Figure 5 montre les zones pour lesquelles la contrainte de traction dépasserait  $f_t$  au niveau du béton, sous l'effet conjugué du séisme et des actions permanentes (poids propre, eau et gradient de température). Ces zones restent peu étendues, et la contribution du séisme reste minoritaire par rapport à celle du gradient de température. Une vérification de la stabilité générale du barrage a également été menée et a permis de conclure que le séisme n'était pas le cas de charge prépondérant pour la vérification de cet ouvrage.

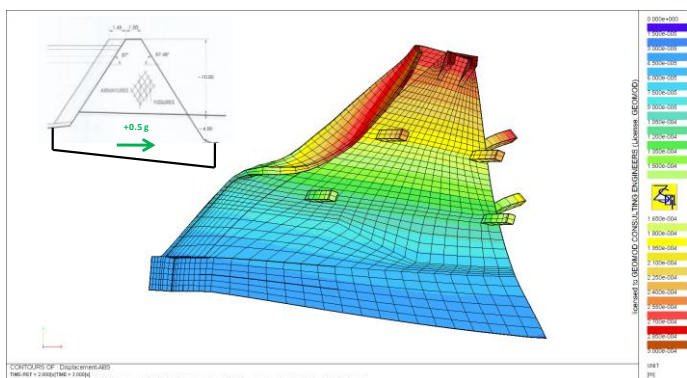


Figure 4. Champ de déplacements et déformée du barrage sous l'effet de  $a_h = 0.5$  g (sens amont-aval)

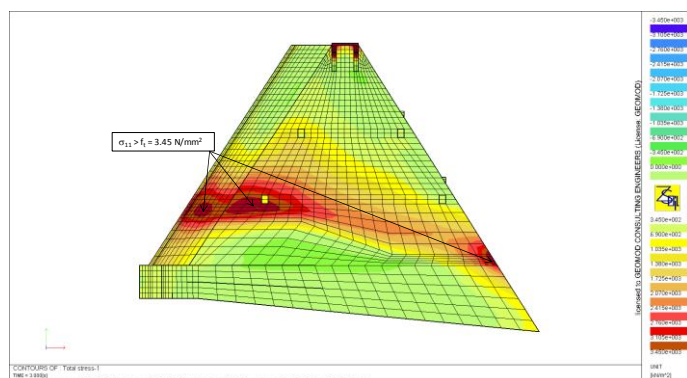


Figure 5. Contraintes principales de traction sous l'effet conjugué de  $a_h = 0.5$  g et des actions permanentes

## Prolongation du métro lyonnais : influence de la creuse au tunnelier

Maître d'ouvrage : BG ing. conseils SAS, Lyon

Le prolongement de la ligne B du métro lyonnais à Oullins-Gare a été modélisé (Fig. 6) dans le but de prédire l'influence du creusement du tunnel au tunnelier à pression de boue sur les tassements de la ligne SNCF située en surface. La séquence d'excavation admise est illustrée en Figure 7, avec application de la pression de boue au front et le long de la jupe, et disparition progressive de la pression de boue à l'arrière de la jupe.

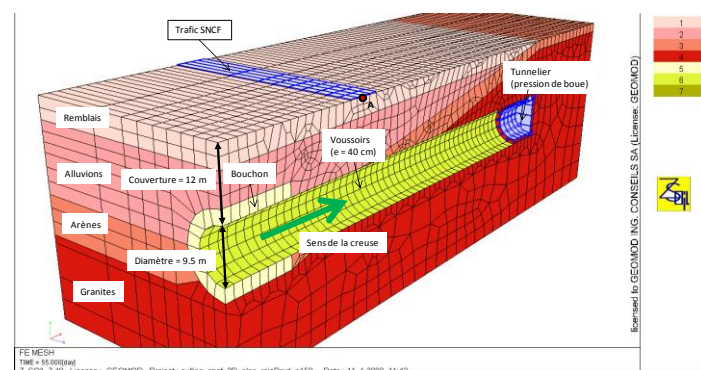


Figure 6. Maillage 3D

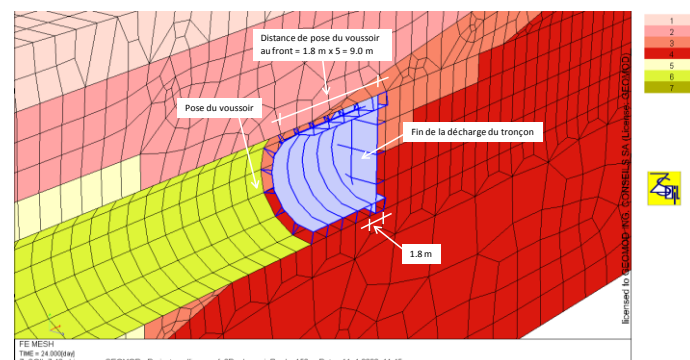
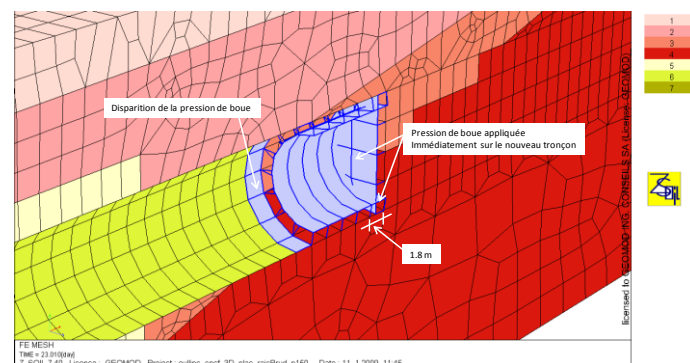
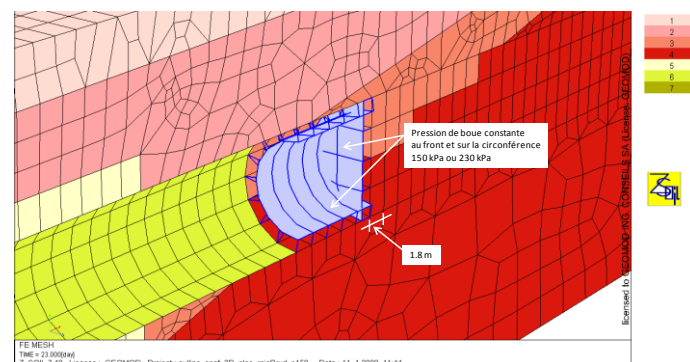


Figure 7. Séquence d'excavation

L'évolution temporelle du déplacement vertical d'un point situé en surface au niveau des rails SNCF est reproduite en Figure 8, pour différentes hypothèses sur les paramètres et sur la valeur de la pression de boue. La Figure 9 illustre les déplacements absolus sur une coupe longitudinale. Ces résultats ont permis d'optimiser la pression de boue à appliquer en fonction de déplacements admissibles au niveau des rails SNCF.

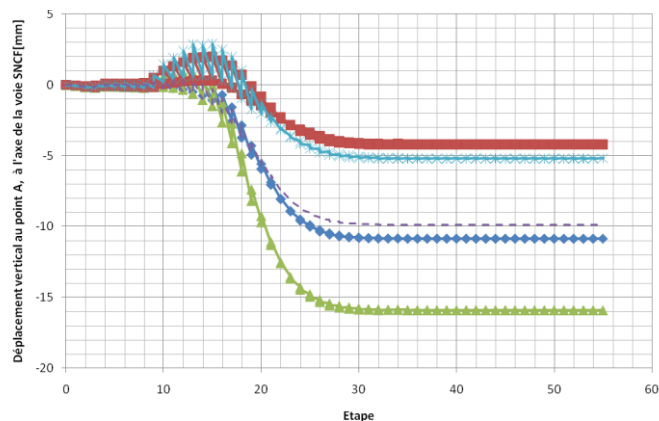


Figure 8. Evolution du déplacement vertical des rails au droit du tunnel au cours de la creuse (étude paramétrique)

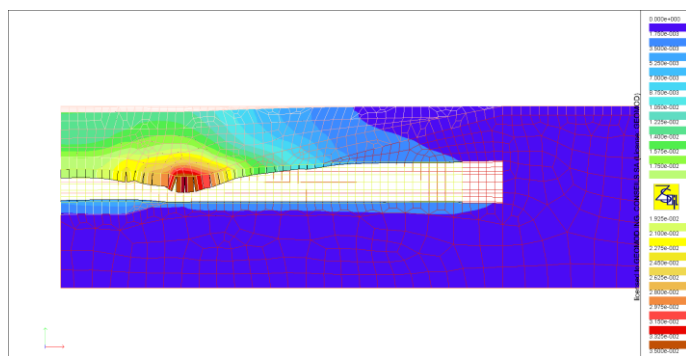


Figure 9. Déplacements absolus (coupe longitudinale)

## Colline de Crebelley

*Maître d'ouvrage : Service des Routes du canton de Vaud  
En collaboration avec : De Céréville Géotechnique SA*

Dans le cadre du projet de route H144, la réalisation d'une « colline » sur une tranchée couverte s'avère nécessaire pour permettre le croisement de deux routes à Crebelley (voir situation Figure 10).

Ceci implique des risques de tassements non négligeables sous l'effet des remblayages, compte tenu du contexte géotechnique appréhendé.

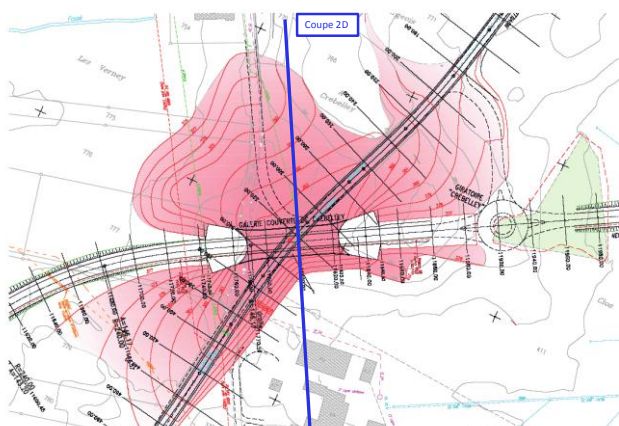


Figure 10. Vue en situation du projet retenu

Pour évaluer et limiter les tassements, la modélisation a d'abord consisté (1) à tester essentiellement en 2D différentes géométries de la colline et (2) à évaluer au mieux les paramètres géomécaniques des sols glaciolacustres en présence. Pour cette seconde partie, une campagne de reconnaissance complète (conduite par le bureau Maric en 2008, en collaboration avec De Céréville) a été réalisée avec des essais SPT, des essais pressiométriques, des essais au pénétromètre statique et dynamique et des essais en laboratoire (caractérisation et essais triaxiaux).

Dans un premier temps l'ensemble de ces essais ont été analysés séparément pour fixer des fourchettes de paramètres géomécaniques des sols et donc de prédictions comme illustré à la Figure 11.

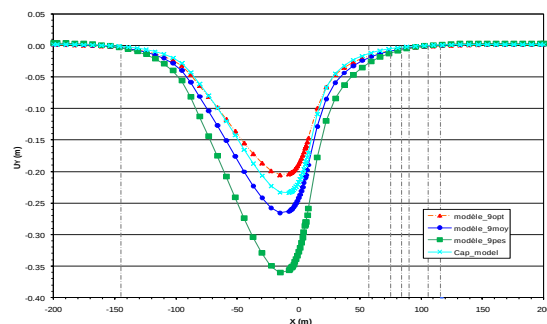


Figure 11. Modélisation 2D, évaluation des tassements pour une coupe-type (voir Figure 10), pour différents jeux de paramètres

Ensuite, une fois ces analyses terminées, un modèle 3D complet de la colline a été réalisé, étant donné la géométrie complexe de la colline. Ce modèle tient compte des étapes de réalisation, ce qui permettra d'appliquer la méthode observationnelle en cours de réalisation. La Figure 12 montre la géométrie du modèle et la Figure 13 l'allure des tassements prédits en situation à la fin de la construction.

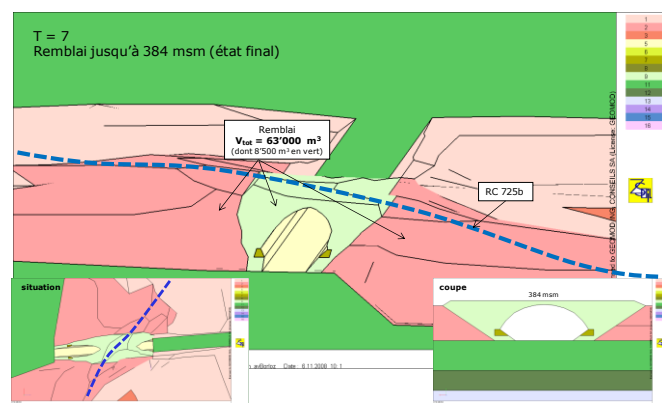


Figure 12. Géométrie du modèle – état final

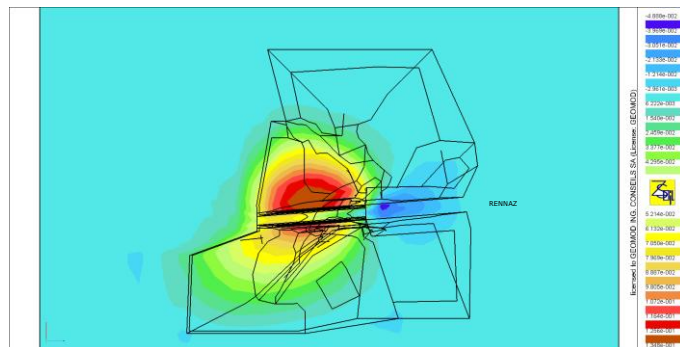


Figure 13. Tassements prédits – vue aérienne

# Modélisation numérique et réseaux de neurones : détermination de paramètres constitutifs à partir d'essais *in situ*

Thèse de doctorat EPFL: Rafal Obrzud

Directeurs: L. Vulliet (EPFL), A. Truty (Zace Services)

Les tests *in situ* permettent de caractériser le comportement d'un échantillon de sol représentatif dans des conditions de contraintes naturelles proches de celles d'un sol intact. Les essais pressiométriques autoforçeurs (de type SBPT) et les essais de pénétration au cône (CPTU) peuvent être utilisés pour la détermination des propriétés des sols argileux. Ils utilisent des corrélations analytiques et empiriques entre les mesures expérimentales et les propriétés du sol.

Les corrélations empiriques nécessitent habituellement un ajustement sur la base de nombreux essais de laboratoire pour calibrer les coefficients de corrélation typiques. Ainsi en particulier, les corrélations analytiques sont, pour la plupart, basées sur les méthodes d'expansion d'une cavité. Elles sont limitées aux problèmes parfaitement drainés ou non drainés, où des solutions analytiques puissent être obtenues pour des modèles constitutifs relativement simples. Or, dans la réalité, les tests *in situ* se déroulent souvent dans des conditions partiellement drainées, lesquelles dépendent des propriétés physiques et de consolidation du sol et peuvent induire des estimations erronées des caractéristiques de l'argile. Le but de cette recherche était ainsi d'élaborer un système générique d'identification des paramètres basé sur la technique des réseaux de neurones artificiels (RN) et permettant d'améliorer la fiabilité des caractéristiques du sol déterminées à partir de tests *in situ* pour les lois constitutives complexes. Les RN peuvent être utilisés pour l'analyse rapide des mesures expérimentales, notamment en prenant en compte des conditions partiellement drainées, en première approximation de propriétés du sol. Le développement de modèles d'identification basés sur des RN s'appuie sur des données issues de mesures pseudo expérimentales provenant d'analyses rigoureuses par éléments finis des deux tests - SBPT et CPTU (voir la Figure 14) - exécutés dans de l'argile normalement et légèrement surconsolidée en considérant des relations constitutives de type « Modified Cam Clay » (Figure 15).

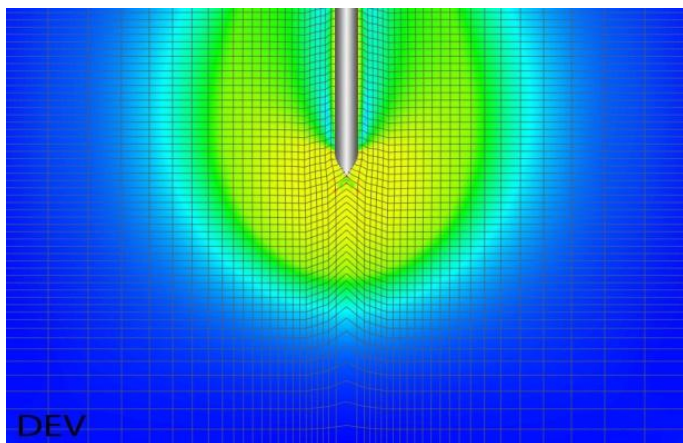


Figure 14. Exemple d'une simulation par éléments finis de l'essai de pénétration au cône

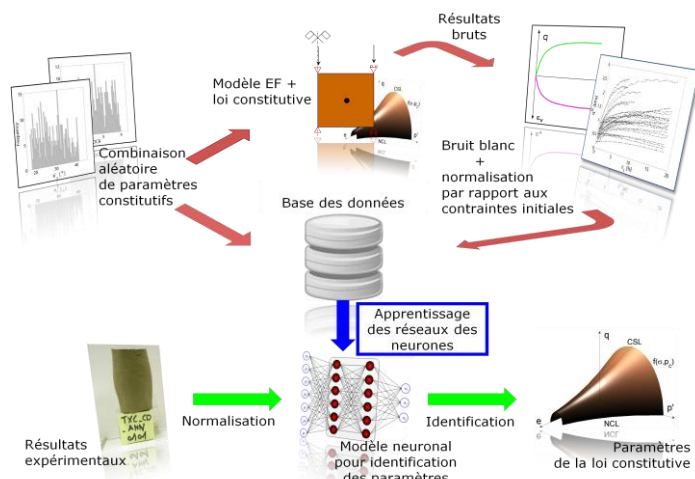


Figure 15. Phase préparatoire du développement du modèle d'identification (en haut) et phase de détermination des paramètres constitutifs (en bas)

La Figure 16 présente l'application des modèles de réseaux de neurones en tant que support pour effectuer les profils multi-paramétriques du sol pour les données provenant de l'essai de pénétration au cône (Figure 16). En d'autres termes, les RN sont utilisés pour transformer des mesures expérimentales en un ensemble de propriétés du sol (selon le schéma du bas de la Figure 15).

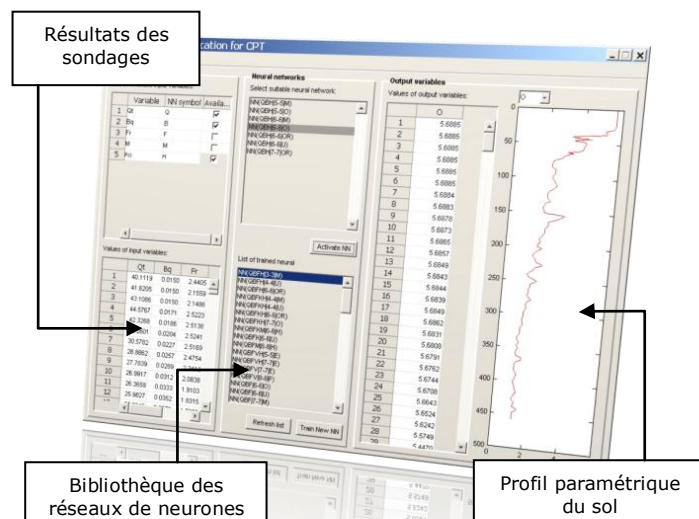


Figure 16. Interface graphique pour la détermination des paramètres constitutifs par les réseaux de neurones



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](http://www.geomod.ch)  
[info@geomod.ch](mailto:info@geomod.ch)