

### Editorial

Matthias Preisig a rejoint l'équipe de GeoMod courant 2011, augmentant ainsi d'une part la force de travail de l'équipe composée désormais de quatre docteurs-ingénieurs, et apportant d'autre part ses compétences dans des domaines aussi divers que la dynamique des structures, le stockage de CO<sub>2</sub>, les écoulements de laves torrentielles ou la géothermie. C'est un sujet touchant plusieurs de ces domaines que nous vous invitons à découvrir en fin de fascicule, en compagnie de deux autres projets-phares traités cette année.



### Modélisation de l'excavation et des éléments structuraux pour la centrale de pompage-turbinage Nant de Drance

*Maître de l'ouvrage : Alpiq, CFF-Energie et FMV  
Planificateur général : AF-Consult. Projet d'exécution de la  
caverne des machines: BG Ingénieurs-Conseils SA  
En collaboration avec E. Garin et G. Roelfstra, BG Ing. Conseils*

La modélisation de l'excavation d'une très grande caverne pour la centrale de pompage-turbinage à proximité des barrages d'Emosson et du Vieux-Emosson a été conduite dans le but d'optimiser les conditions de l'excavation et de dimensionner le soutènement et le revêtement définitif d'ouvrage.

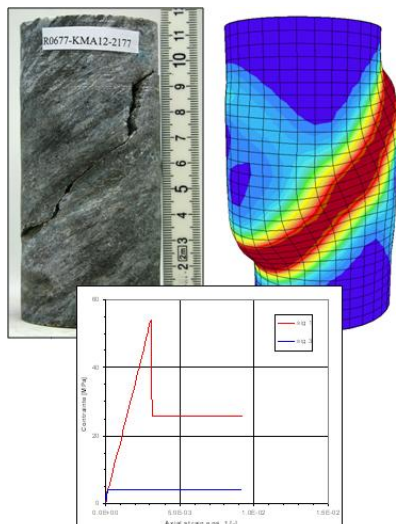


Figure 1. Validation du modèle Mohr-Coulomb avec « softening » et approche non-locale

Dans le cadre de ce projet, plusieurs modèles ont été créés en parallèle à l'aide du logiciel Z\_SOIL : deux modèles (2D et 3D) de l'excavation de la caverne des machines, un modèle 3D d'une tranche de la longrine et un modèle 3D des structures porteuses d'une turbine.

**Géologie.** Les campagnes de reconnaissance géotechniques ont démontré la présence de micaschistes au voisinage de la grande caverne. Ce type de roche est caractérisé par une hétérogénéité et par l'existence des plans de schistosité. Du point de vue mécanique ces derniers représentent des plans de faiblesse. Le choix des lois constitutives pour le massif rocheux a été dicté par l'existence de ces foliations d'une part (modèle *Multilaminat* avec matrice *Hoek-Brown*), et d'autre part par le comportement fragile du rocher observé lors des essais triaxiaux (Figure 1, modèle *Mohr-Coulomb* avec réduction des paramètres de pic une fois la rupture atteinte jusqu'aux paramètres résiduels). Ce dernier modèle nécessite l'utilisation d'un maillage très affiné lié à l'approche non-locale qui permet de limiter l'effet de la dépendance de maille en mode de rupture. De plus, une étude paramétrique a été conduite pour intégrer une fois les valeurs des paramètres caractéristiques (Xk) déterminées à partir des essais laboratoires, et la deuxième fois les valeurs de dimensionnement (Xd).

**Modélisation 3D de l'excavation.** L'excavation de la grande caverne (L = 184 m, l = 32 m, h = 52 m) a été modélisée en tenant compte de 9 niveaux d'excavation (Figures 2 et 3). Chaque niveau a été subdivisé en 3 ou 4 sous-excavations avec des longueurs de volée de 3 m. Le modèle 3D a permis d'étudier le comportement global du massif pendant l'excavation ainsi que de déterminer le taux de déconfinement après l'excavation d'une volée et avant mise en place des boulons. Cette information a été en suite reprise dans le modèle 2D plus détaillé.

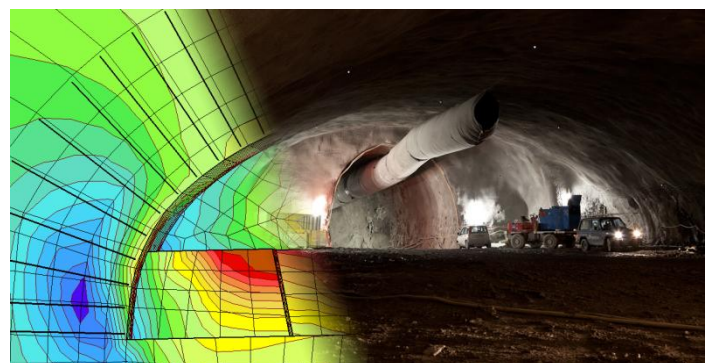


Figure 2. Excavation du premier niveau: photo et maillage

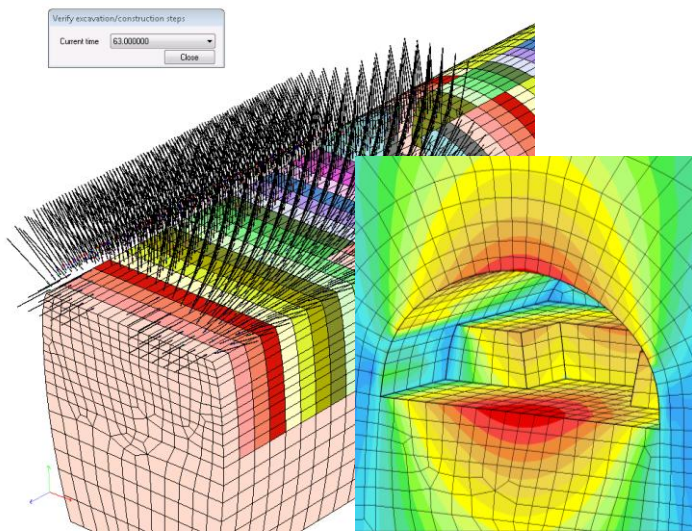


Figure 3. Modélisation 3D de l'excavation de la grande caverne : discrétisation des étapes de l'excavation

**Modélisation 2D de l'excavation.** Ce modèle a permis d'analyser (Fig. 4):

- le comportement du massif au voisinage de la grande excavation
- la convergence du massif et l'évolution des efforts dans les boulons et ancrages précontraints
- l'évolution des efforts dans la voûte et le revêtement définitif (Fig. 5).

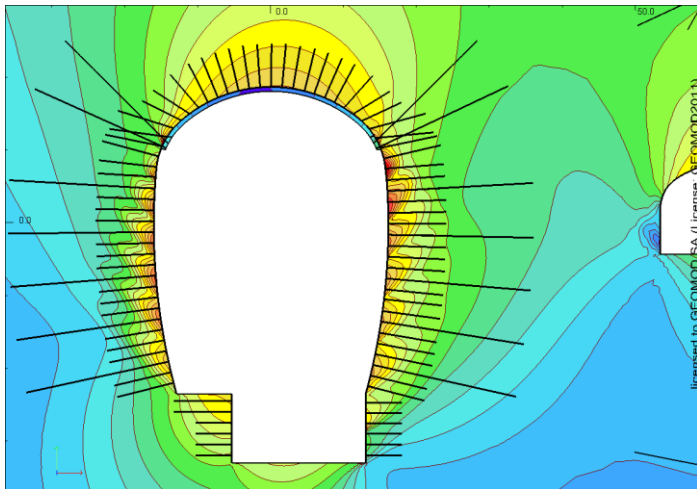


Figure 4. Modélisation 2D de l'excavation de la caverne à l'abri d'une voûte en béton retenue par des ancrages précontraints

L'introduction d'une interface entre le soutènement et la voûte a permis de reproduire au mieux la cinématique de la voûte pendant l'excavation et sous effet du retrait à long terme. Ce dernier peut en effet conduire au décollement du revêtement en clé de la calotte.

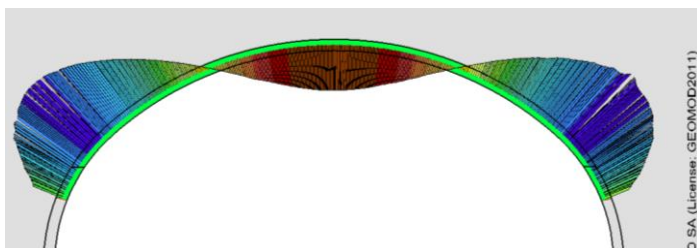


Figure 5. Modélisation de la voûte à long terme sous effet du retrait du béton: visualisation des moments de flexion

**Modélisation 3D d'une tranche de la longrine.** Le résultat de l'évolution des tensions dans les ancrages soutenant la longrine obtenu grâce au modèle 2D a été ensuite appliqué à un nouveau modèle 3D de la longrine (Figure 6). Ce dernier a permis d'analyser la flexion de la longrine compte tenu de la rigidité du rocher en vue de dimensionner l'armature.

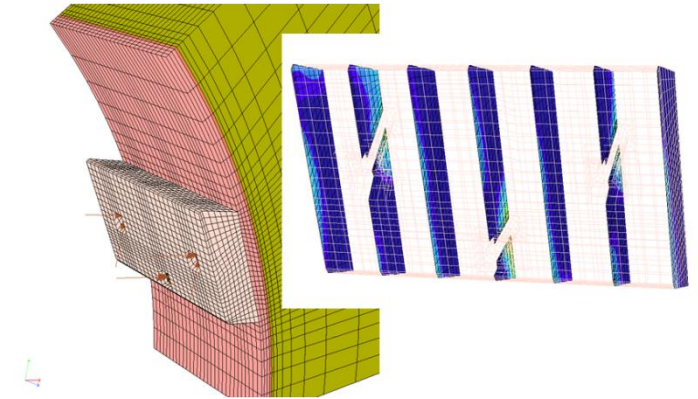


Figure 6. Détermination des zones en traction dans de la longrine suspendue aux ancrages précontraints

**Modélisation 3D de l'intérieur de la grande caverne.** Actuellement, le calcul est poursuivi afin de dimensionner les armatures dans les éléments supportant les machines hydrauliques. Cette modélisation permet d'analyser entre autres l'état de contrainte dans les éléments en béton massif au voisinage des éléments de la turbine. Plus précisément l'état de contrainte dans ce type de structure est influencé par :

- le retrait intrinsèque du béton et celui associé aux changements de température,
- les différentes charges mécaniques,
- les différentes charges hydrauliques.

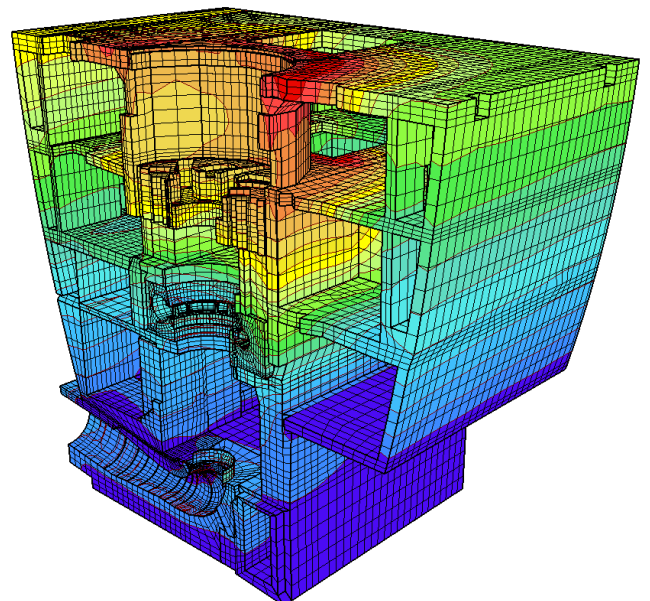


Figure 7. Modélisation 3D de l'intérieur de la grande caverne: étude de la structure porteuse en béton d'une turbine soumise aux effets du retrait et des charges de mise en service

## Estimation des paramètres du modèle HSS et application à la prédiction des mouvements autour d'une excavation dans des sables

En collaboration avec Prof. Th. Zimmermann, Zace services SA  
 Ref.: "The Hardening-Soil Model, a Practical Guidebook",  
 R. Obrzud, A. Truty, in Z\_SOIL report 100701, revised 17.03.11

L'utilisation de modèles constitutifs avancés permet de prédire de manière aussi fiable que possible l'évolution des déformations pour des problèmes complexes. Par exemple, dans le cas d'une fouille ancrée (Figure 6), le modèle doit être capable de reproduire correctement des comportements en charge (derrière l'écran) et en décharge (à l'intérieur de la fouille), le couplage hydro-mécanique, l'interaction sol-structure, etc. Le modèle Hardening-Soil Small Strain (HSS), présent dans le logiciel Z\_SOIL, permet de prendre en compte une rigidité correcte lors de très petites déformations, et de distinguer entre les modes de charge et de décharge.

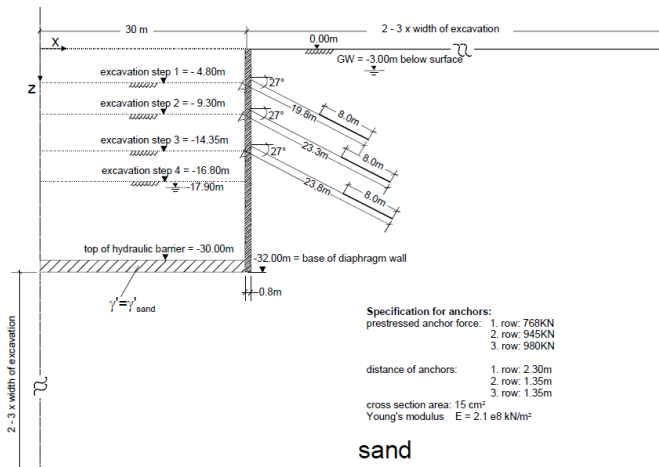


Figure 6. Fouille ancrée, définition du problème

Le problème récurrent auquel un ingénieur praticien peut être confronté est le nombre et la complexité des paramètres à définir. GeoMod participe depuis deux ans à l'élaboration d'une interface simplifiée permettant d'estimer des fourchettes de valeurs pour les paramètres de différents modèles dans Z\_SOIL, dont le modèle HSS. L'utilisateur fournit des indications simples concernant la nature du sol (type : gravier, sable, limon, etc., degré de consolidation, densité, etc., voir Figure 7a), et l'interface fournit une gamme de paramètres plausibles, sur la base de corrélations présentes dans la littérature.

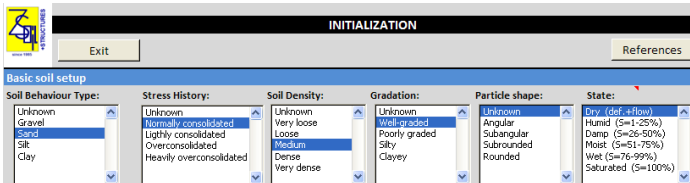


Figure 7a. Interface utilisateur « simple » pour l'estimation des paramètres du modèle HSS

L'utilisateur valide ensuite ces paramètres en fonction de sa connaissance des sols en présence (Figure 7b) et le modèle HSS est alors entièrement défini. La Figure 8 illustre les déplacements prédits à la fin de l'excavation. Si l'on compare cette prédiction avec les déplacements horizontaux de l'écran observés in situ (Figure 9 à gauche) ou avec les tassements à l'arrière de la fouille

prédits par un modèle de référence (Figure 9 à droite), on constate une excellente concordance pour la partie supérieure de l'écran, ainsi qu'une légère sous-estimation pour la partie inférieure.

Ainsi, cet exemple montre que cet outil est adapté pour le pré-dimensionnement d'un ouvrage. Dans les phases ultérieures du projet, le choix des paramètres devra être validé par un géotechnicien.

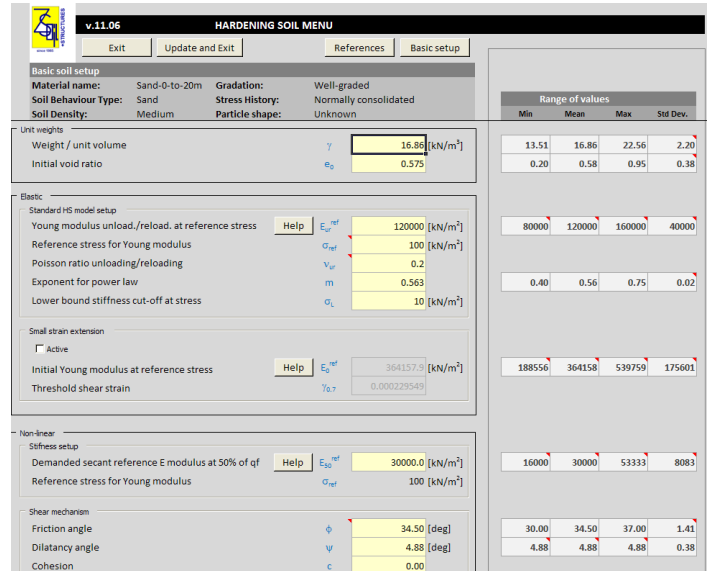


Figure 7b. Valeurs proposées par l'interface (extrait)

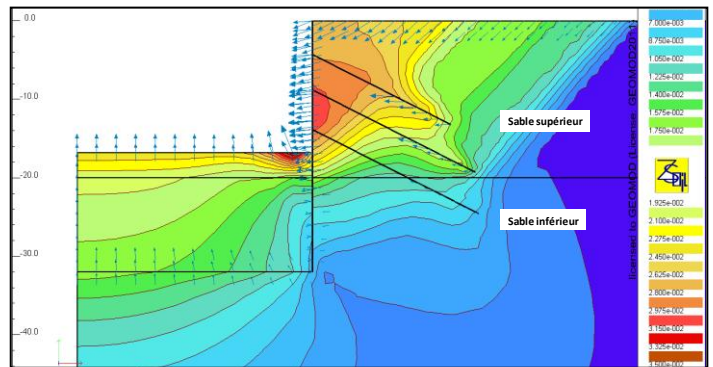


Figure 8. Déplacements absolus et vecteurs à la fin de l'étude

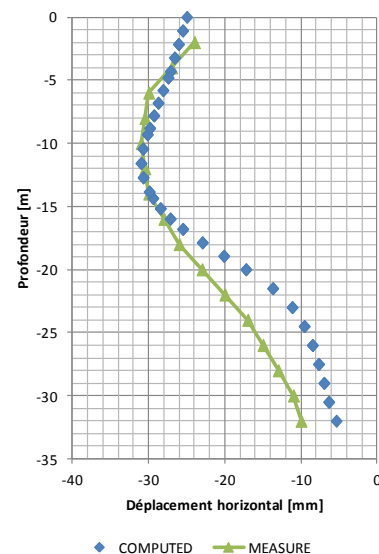


Figure 9. Comparaison mesure-modèle

## Sismicité causée par l'injection d'eau: modélisation d'un essai hydromécanique

En collaboration avec Princeton University

Ref.: "Water Injection Induced Seismicity: Modeling a Hydromechanical Experiment", M. Preisig, F. Cappa, Y. Guglielmi, J.H. Prevost, in Proceedings MPPS 2011

La sismicité engendrée par l'injection d'eau dans des couches souterraines est un sujet qui intéresse pour plusieurs raisons: le développement de l'exploitation de nouvelles ressources de gaz naturel dans des schistes nécessite un traitement des formations par fracturation pour rendre accessibles les réserves. Pour créer ces fractures dans la roche on injecte de l'eau avec des adjuvants sous haute pression. La même technologie peut être utilisée pour augmenter la perméabilité d'un réservoir géothermique afin d'augmenter sa production. Mais le risque d'engendrer des événements sismiques suffisamment puissants pour endommager des bâtiments en surface, comme ce fut le cas à Bâle en 2006, rend nécessaire le développement d'outils de simulation pour pouvoir prédire l'occurrence d'un tel événement. Dans le cadre d'une collaboration entre chercheurs de Princeton University et chercheurs de l'Université de Sophia-Antipolis, un essai d'injection d'eau a été modélisé afin de pouvoir comprendre le comportement d'un réservoir avec des fissures sous l'effet d'injection d'un fluide. Un forage vertical a permis d'accéder à un massif rocheux non perturbé, et la mesure de vibrations dans les forages avoisinants.

Différents modèles numériques ont été créés: Un modèle en 3D comprenant une couche faible traversée par plusieurs failles, et un modèle 2D comprenant en plus un fissure qui intercepte le forage d'injection. La roche est quant à elle considérée élastique. Le modèle 3D a permis de calculer l'évolution de la pression ainsi que de la saturation d'eau dans la roche (Figure 10). La comparaison entre la pression mesurée avec la pression calculée montre une très bonne correspondance (Figure 11).

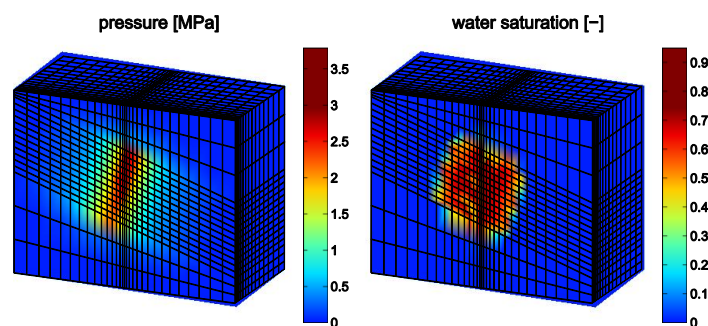


Figure 10. Evolution de la pression et de la saturation d'eau dans la couche fissurée

Le modèle 2D d'une fissure (Figure 12) a permis de calculer des déformations dans une faille pendant l'injection (Figure 13). Les déformations montrent l'hystérèse due au couplage hydromécanique. La Figure 14 montre, sur une maille déformée, les contraintes principales. La rupture se produit par élargissement de la fissure, et on observe des concentrations de contrainte de traction autour des pointes de la fissure. Ces concentrations pourraient alors propager la fissure et être à l'origine de la micro-sismicité observée lors de l'expérience.

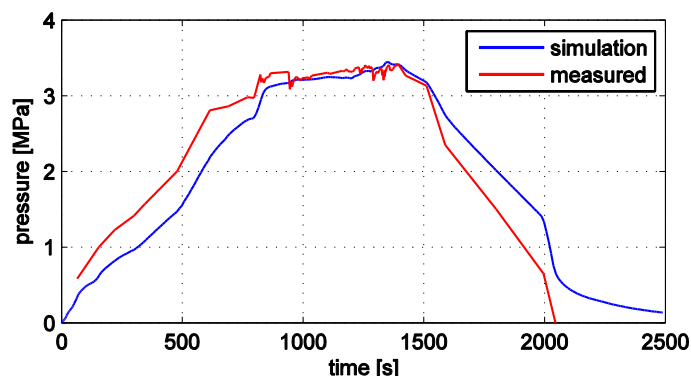


Figure 11. Pression dans le forage, mesure-simulation

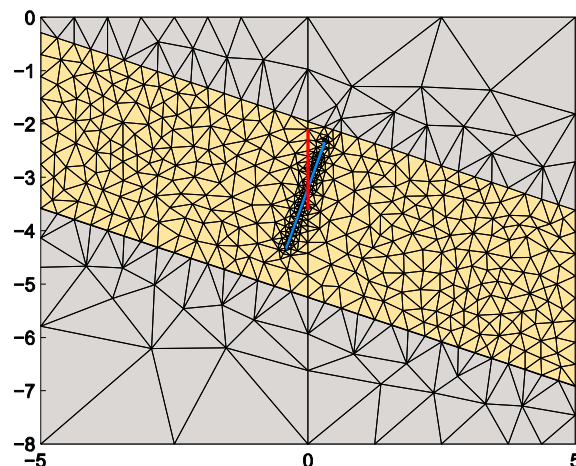


Figure 12. Maillage triangulaire avec zone d'injection (en rouge) et faille (en bleu)

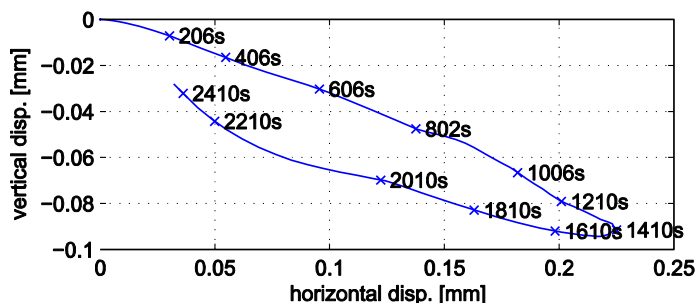


Figure 13. Déformations relatives à travers la fissure

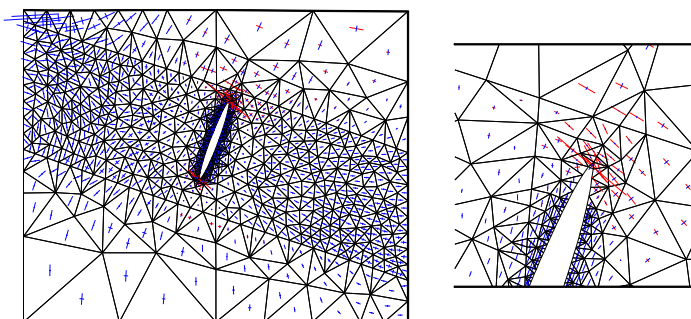


Figure 14. Contraintes principales autour de la fissure



GeoMod ingénieurs conseils SA

Ch. des Epinettes 32 - CH-1007 Lausanne

TN 7 / Lausanne, décembre 2011 / SC+FG+RO+MP

www.geomod.ch