



Invitation à la

Séance Technique du 4 juin 2015

Conception des cavernes souterraines

CNAM, 292 rue St-Martin, 75003 Paris (métro : Réaumur-Sébastopol)

(Entrée libre et gratuite)

- 14 : 00** Accueil des participants : **Alain Mercusot (AFTES), Frédéric Pellet (CFMR)**
- 14 : 15** Introduction à la thématique : **Daniel Billaux (Itasca Consultants)**
- 14 : 30** Excavation de la caverne principale de l'aménagement Nant-de-Drance
Etienne Garin, BG Ingénieurs Conseil
- 15 : 00** Les cavernes du projet hydroélectrique Baihetan (Chine) : ruptures fragiles, grandes déformations, et instabilités de blocs
Daniel Billaux, Peter Zhu, Itasca Consultants
- 15 : 30** **Discussion**
- 16 : 00** Retours d'expériences pendant la construction de cavités pour le stockage d'hydrocarbures
Nicolas Gatelier, Philippe Vaskou, Thierry You, Geostock
- 16 : 30** Principes et méthodes de conception de grandes cavernes hydroélectriques souterraines
François Laigle, EDF - DPIH
- 17 : 00** **Discussion**
- 17 : 30** **Fin de la séance**



Excavation de la caverne principale de l'aménagement Nant-de-Drance

Etienne Garin, BG Ingénieurs Conseil

L'aménagement hydroélectrique Nant-de-Drance consiste à installer 6 groupes de pompage-turbinage, de puissance cumulée 900 MW, entre deux réservoirs artificiels existants. Le montant de l'investissement s'élève à 1,8 Mia CHF. Mise à part une surélévation du barrage supérieur, tous les travaux s'effectuent en souterrain. Ils comprennent 10 km de tunnels, deux puits verticaux de 440 m et 6 cavernes.

La taille exceptionnelle de la caverne des machines (194 m x 32 m x 52 m), implantée à 600 m de profondeur dans une formation rocheuse métamorphique d'origine sédimentaire (micaschistes, paragneis) représente une source majeure de risque dans ce projet.

La définition d'un concept approprié d'excavation, de soutènement et de revêtement a requis l'établissement d'un modèle de comportement du massif très élaboré, s'appuyant sur une campagne de reconnaissance conséquente: cinq sondages carottés de profondeur jusqu'à 660 m, une centaine d'essais de mécanique des roches. Les lithologies rencontrées sont saines, dures, laminées et litées. La schistosité présente un pendage moyen de 70 à 80°, selon un azimut proche de la perpendiculaire par rapport à l'axe de la caverne. L'état de contrainte in situ a été déterminé au moyen d'essais de fracturation hydraulique réalisés dans 3 forages

Compte tenu de l'anisotropie de résistance constatée, liée à la schistosité, un modèle multi-laminaire a été retenu pour caractériser le comportement du massif, avec une loi de rupture type Hoek-Brown dans la matrice rocheuse et un critère de Mohr-Coulomb pour les discontinuités. Les paramètres caractéristiques du rocher ont été déterminés sur la base des résultats des essais de laboratoire.

Les paramètres du critère de rupture de Hoek-Brown ont été calés sur la courbe enveloppe des résultats d'essais et non déterminés sur la base de considérations empiriques. Les paramètres du critère de Mohr-Coulomb ont été définis sur la base des essais de cisaillement direct. Ces valeurs ont ensuite été réduites par des facteurs partiels pour prendre en considération les éventuelles variations défavorables des paramètres par rapport aux valeurs caractéristiques.

Sur cette base, une modélisation tridimensionnelle par éléments finis ainsi qu'une analyse des blocs instables ont permis d'optimiser le soutènement (constitué de boulons et béton projeté) et le revêtement (en béton armé).

Une surveillance rapprochée des mouvements du massif et un contrôle régulier des hypothèses de base du dimensionnement ont été mis en œuvre. Les déformations observées, limitées à 40 mm, ont bien correspondu aux pronostics établis par les calculs aux éléments finis.

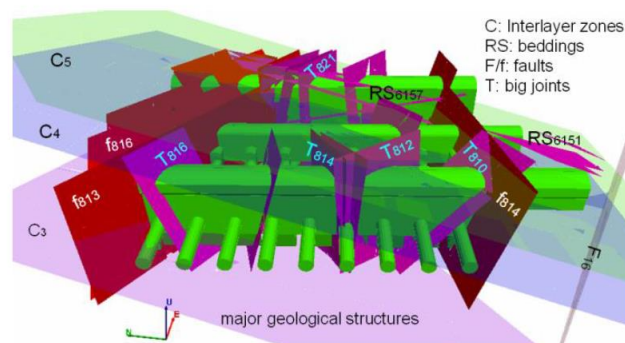
Le suivi de l'avancement et les rétro-analyses effectuées ont permis des allègements successifs des mesures de soutènement et l'adaptation du phasage d'excavation, comprenant 9 étapes du haut vers le bas, chacune divisée en trois ou quatre sections partielles.

Les économies réalisées grâce à ces études ont largement dépassé les dépenses consenties pour les reconnaissances et calculs additionnels. Les délais d'excavation ont aussi pu être accélérés en réorganisant les passages des différentes étapes, dégagant une marge pour rattraper les retards survenus ailleurs.

Les cavernes du projet hydroélectrique Baihetan (Chine) : ruptures fragiles, grandes déformations, et instabilités de blocs

Daniel Billaux, Itasca Consultants sas, Peter Zhu, Itasca Consulting China Ltd

Dans le projet hydroélectrique de Baihetan en Chine, deux cavernes de grande taille - 32,2 m de portée, 80 m de hauteur, et 438 m de longueur, sont en construction dans les deux rives du fleuve. Lors de la conception des deux cavernes, au stade de l'étude de faisabilité, trois types de problèmes étaient envisagés : des ruptures fragiles dues aux fortes contraintes, de grandes déformations, et des instabilités de blocs. Des analyses de stabilité menées par la méthode des éléments distincts ont été menées pour examiner chacun de ces problèmes potentiels, avec divers scénarios correspondant à chacune des propositions de positionnement des cavernes. La prise en compte de ces trois types de problèmes potentiels a fourni les éléments fiables permettant de déterminer la disposition la plus favorable, et la compréhension des problèmes potentiels associés à cette disposition.



Structures géologiques principales, caverne en rive droite.

Retours d'expériences pendant la construction de cavités pour le stockage d'hydrocarbures

Nicolas Gatelier, Philippe Vaskou, Thierry You, Geostock

Les stockages souterrains d'hydrocarbures en cavités minées sont des ouvrages spécifiques d'un point de vue géotechnique. D'une part le massif de roche doit rester saturé durant la construction et ensuite en exploitation et d'autre part la stabilité à long terme est assurée uniquement par la mise en place de boulons et d'une couche de béton projeté, les cavités restant non-revêtues. Les capacités utiles de stockage sur un site peuvent atteindre plusieurs millions de mètres cubes principalement pour des applications de stockages stratégiques mais aussi pour alimenter des usines de production de produits chimiques. Des cavités de grandes sections sont donc nécessaires pour minimiser le linéaire à excaver et optimiser le planning de construction.

Dans ce contexte, la présence de blocs rocheux potentiellement instables et de grandes dimensions (pouvant couvrir la galerie de tête ainsi qu'un ou plusieurs stross) est identifiée comme un aléa géotechnique majeur pendant la construction. Les méthodes empiriques classiques (Q ou RMR), ne sont pas adaptées à cette configuration de « méga-blocs » qui peuvent survenir même et surtout dans des massifs qui seraient qualifiés de bonne qualité par ces méthodes.



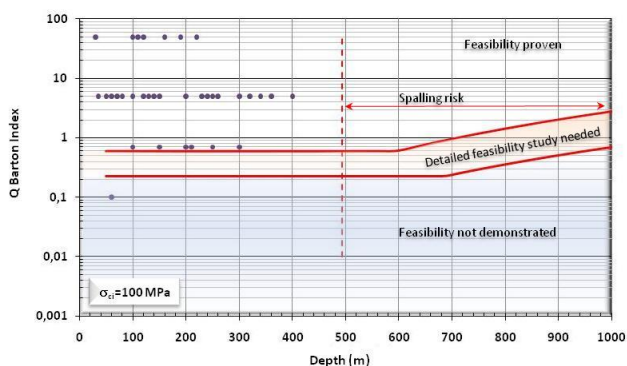
On présentera au cours de cette séance, la méthodologie développée par les auteurs pour gérer le risque d'occurrence et de chute « méga-blocs » pendant la construction des cavités. L'approche utilisée est déterministe et basée d'une part sur la géologie structurale pour la partie anticipation (identification des zones potentiellement à risque ainsi que la géométrie des « méga-blocs ») et d'autre part sur la mécanique des blocs rocheux pour la partie stabilisation des blocs identifiés (définition du besoin en support pour stabiliser le bloc au travers de modélisation avec géométrie réelle des fractures). La méthodologie mise en application sur plusieurs sites en construction pour des massifs granitiques semble prometteuse et s'est révélée complémentaire aux méthodes empiriques même si les paramètres mécaniques des discontinuités mises en jeu au cours du processus de rupture mériteraient une identification plus précise avec des essais sur site afin de prendre en compte les effets d'échelle.

Principes et méthodes de conception de grandes cavernes hydroélectriques souterraines

François Laigle, EDF - DPIH

Les grandes cavernes souterraines abritant les turbines, les transformateurs et certaines vannes sont des ouvrages majeurs dans les aménagements hydroélectriques. A la différence des galeries et des puits qui présentent de longs linéaires, les grandes cavernes sont des structures à la géométrie souvent complexe et avec des portées conséquentes. De plus, ces cavernes étant généralement situées en pied du circuit hydraulique, la grande couverture rocheuse peut se traduire par un état de contraintes important.

Forte de ses expériences récentes en France et dans le monde, le EDF a identifié de grands principes de conception des cavernes permettant l'élaboration d'une méthodologie plus générale. Le projet de Tehri en Inde est un exemple de terrain difficile, présentant à la fois une forte couverture, un matériau ductile et une schistosité marquée. Ces réalités physiques sont approchées au mieux grâce à la prise en compte dans les modélisations numériques d'une loi de comportement radoucissante avec un critère orienté intégré dans un modèle continu. Les résultats ont conduit à privilégier un soutènement souple basé sur un boulonnage systématique relativement dense associé à une fine couche de béton projeté. Cette méthodologie a ensuite été reprise pour le projet de Gilboa en Israël, exception faite de la schistosité puisque non observée sur site. L'exemple de Gavet (France) enfin permet d'illustrer un cas de modélisation numérique discontinue d'un massif rocheux de bonne qualité mais fracturé.



Abaque de justification de la faisabilité d'une caverne souterraine



Vue de la caverne hydroélectrique de Tehri (Inde)