

Géomatériaux

Pourquoi EDF s'intéresse-t-elle à la modélisation du comportement des bétons, limons, sables, argiles et roches ? Réponse : au delà de la tenue des barrages, l'expertise des solutions envisagées dans le stockage des déchets radioactifs. Les modèles de thermo-hydro-mécanique de *Code_Aster* sont un des apports d'EDF-R&D dans l'épineuse question de l'aval du cycle.

Non linéaires sous chargement nominal, les géomatériaux sont souvent objet de déformations différées : aussi, prédire l'état des ouvrages à court et long terme requiert la simulation des phases de leur construction. D'autant plus que le comportement de l'eau imbibant ces matériaux n'est pas sans conséquences mécaniques, notamment pour l'évolution lointaine des sols et roches. Il est alors primordial de calculer les écoulements en tant que tels car les effets capillaires liés à des états partiellement saturés influencent significativement l'état de contrainte. En particulier pour des matériaux peu perméables où des fortes succions apparaissent.

Des lois de comportement particulières

Les phénoménologies décrites ici ne peuvent bien sûr être simulées que par des modèles *Aster* spécifiques. Au delà de leur diversité, tous partagent la propriété de représenter une dégradation du matériau sous cisaillement fonction du confinement et s'accompagnant de variations de volume sensibles. Selon qu'il s'agit d'un béton, d'un limon ou d'un sable, d'une argile ou d'une roche, le cadre de la formulation variera. On préférera le formalisme de l'endommagement pour les bétons dont la micro fissuration détériore la rigidité, alors que pour les sols la plasticité permettra de mieux tenir compte des déformations irréversibles. Pour les argiles, on fera dépendre l'écrouissage plutôt de la déformation plastique volumique et pour les roches, de la déformation plastique de cisaillement. Dans tous les cas, au delà d'un certain seuil, un comportement adoucissant apparaît. Pour les sols et roches, les fonctionnalités *Aster* modélisent assez finement les phénomènes de dilatance concomitants.

Elles modélisent également les évolutions hydrauliques et thermiques ; ces dernières entraînant directement des dégradations de type fissuration par séchage, effondrement par remouillage, plastification par gonflement des argiles, claquage des terrains dû à la dilatation thermique de l'eau.

Une offre *Aster* adaptée aux géomatériaux



Pour les sables et limons, le premier niveau des lois CJS permet une approche de type "charge limite". Les deuxième et troisième niveaux introduisent un couplage entre mécanismes plastiques isotrope et déviatoire avec des écrouissages isotropes ou cinématiques incluant la dilatance et le radoucissement pour le troisième niveau.

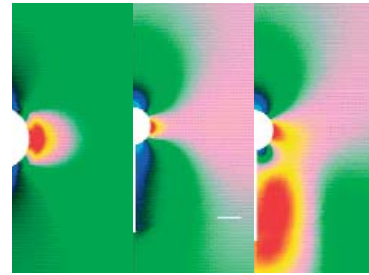
Pour les argiles saturés, Cam Clay (`RELATION_KIT='CAM_CLAY'`), la star des modèles, associe une élasticité non linéaire et une plasticité limitant les contraintes à un domaine dont la taille dépend de la pression de consolidation. Son extension aux sols non saturés, connue sous le nom de modèle de Barcelone (voir encadré), fait en outre dépendre ce domaine de la pression capillaire. Pour les roches, *Aster* a bénéficié de l'expérience du Centre EDF d'Ingénierie Hydraulique de Chambéry qui a démontré la nécessité de retenir le comportement dit post pic, c'est à dire fissuré, des roches et a proposé une généralisation du modèle de Hoek et Brown (`'LAIGLE'`).

Code_Aster répond à la variété des phénomènes hydrauliques par des modèles simples pour le séchage et l'hydratation du béton, ou plus complexes basés sur l'intégration couplée de deux lois d'écoulement non linéaires et celle de conservation de l'énergie. Dans la version élaborée de cette modélisation sans hypothèse sur la pression de gaz, les échanges entre phases sont régis par les lois d'équilibre très générales de la thermodynamique. Les écoulements sont darcéens, perméabilités et saturation sont reliées par des lois quelconques fournies par l'utilisateur. De même pour la relation entre saturation et pression capillaire. Les mécanismes de diffusion au sein des mélanges gazeux (gaz « sec » et vapeur) et liquides (gaz dissous et eau liquide) sont régis par des lois de Fick.

Une bonne expérience d'utilisation



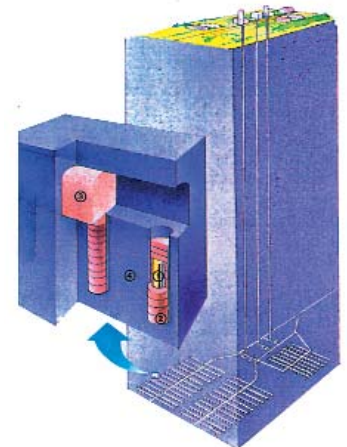
L'ancienneté de certains de ces modèles, leur longue utilisation ont contribué à accroître leur robustesse. Les modélisations THM couplées sont bien adaptées aux besoins EDF : étanchéité des enceintes de confinement des centrales nucléaires, problèmes liés au stockage profond des déchets, à la resaturation et la thermo-mécanique d'argiles gonflantes, à l'endommagement lors du creusement et de la consolidation de galeries...



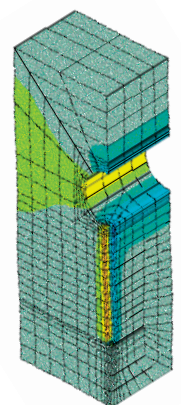
Contraintes effectives sur un site de stockage : après excavation de la galerie, creusement du puits et un an après la mise en place des colis.

→ La modélisation des sols non saturés...

... a fait l'objet de récents développements : introduction du modèle de Barcelone et d'une loi de couplage hydraulique prenant en compte la dissolution d'un gaz dans l'eau et la diffusion au sein de ce mélange (`LIQU_AD_GAZ_VAPE`).



Stockage profond et ses alvéoles : concept suédois KBS-3 en milieu granitique.



Contraintes mécaniques dans la jonction galerie-puits.