




GROUPE : CODE DE MECANIQUE (T66)

Compte rendu AMA CR-AMA-04.004	Réunion autour du Benchmark hydro-mécanique proposé dans le cadre du GDR MoMas	<i>C.Chavant</i>  <i>R.Fernandes</i> 26/01/2004
---	---	--

DIFFUSION PRINCIPALE :

S. ANDRIEUX, P. GUIHOT, F. WAECKEL (EDF/AMA), JM. GRAS (EDF/RNE)
V. DAFFOS (EDF/DAC), E. LORENTZ, C. DURAND, C CHAVANT (EDF/AMA)
L. LOTH, R. MIGUEZ, K. SU, F. PLAS (ANDRA)
A. MILLARD, P. MONTARNAL, ML. CARONCHARLES, C. DELLIS (CEA)
A. BOURGEAT (UNIVERSITE DE LYON I)
P. MESTAT, P. DANGLA (LCPC)
P. DESTUYNDER (CNAM)
JB. LEBLOND, HECHT (UNIVERSITÉ DE PARIS VI)
A. BENALLAL (LMT-CACHAN)
R. CHAMBON (INPG)
R. CHARLIER, FREDERIC COLLIN (UNIVERSITE DE LIEGE)
O. SIMIONESCU (UNIVERSITE DE BUCAREST)
A. GIRAUD, R. GIOT (LAEGO)
B. GATMIRI, P. DELAGE (ENPC/CERMES)
J. SHAO, G. DUVEAU (EUDIL)
G. MOUNAJED, Y. TRAORE (CSTB)
I. IONESCU (LAMA-CHAMBERY)
X. LI (SCK/CEN)
M. TIJANI (ENSMP)
J. JAFFRE (INRIA)
MODARESSI, BENDHIA (ECP/MSS)
JC. ROBINET (EUROGEOMAT)
P. SARAMITO (IMAG/GRENOBLE)
D. REMAUD (ITECH)
I. MORTAZAVI (UNIVERSITE DE BORDEAUX)
ALLAIRE (POLYTECHNIQUE)
G. DEBRUYNE, N. SELLALI (EDF/AMA), M. EDDI (EDF/RNE),
C. ROSE, D. VERWAERDE (EDF/IMA), ME. STOECKEL (EDF/AEE)
T. LASSABATERE (EDF/MMC), F. LAIGLE, P. KOLMAYER, (EDF/CIH)
JM. DELBECQ (EDF/RNE), O. MARCHAND (EDF/MFTT)
P. BADEL, V. GODARD, S. GRANET, J. EL-GHARIB, R. FERNANDES (EDF)

P.J. : - Solution analytique du « triaxial consolidé non drainé en Drucker_Prager »
- Les présentations ont été déposées sur le site : <https://mcs.univ-lyon1.fr/MOMAS>

- **Synthèse**

L'objectif de la réunion était de faire un premier bilan sur l'avancée des travaux concernant le Benchmark « Simulation d'excavation en comportement hydro mécanique fragile » proposé dans le cadre du GDR MoMas. Il a été rappelé que la motivation industrielle était basée sur la mesure de la fiabilité des méthodes numériques utilisées dans le cadre d'études sur l'endommagement induit par les travaux d'excavation dans le milieu naturel d'un site de stockage de déchets nucléaires.

Cinq participants ont présenté leurs premiers résultats : L3S (Grenoble en collaboration avec Liège), EDF (R&D AMA), LCPC, LAEGO (Nancy), EUDIL Lille). Une comparaison qualitative entre les résultats des différents participants a montré une convergence des résultats pour les études 0d (essais triaxiaux non drainés) et 1d (cavité cylindrique non revêtue en massif infini avec un état de contrainte initial isotrope). Dans l'optique d'une comparaison plus fine, sur les études 0d et 1d, chaque participant devra fournir un fichier excel avec les résultats obtenus en des points et à des instants fournis en annexe. Dans le cadre des études 2d menées par L3S, EDF et LCPC, les deux premières équipes signalent des phénomènes de localisation probablement liés à la définition du maillage utilisé. LCPC ne semble pas avoir rencontré ces difficultés, mais le maillage ainsi que les critères de convergence utilisés sont différents. Enfin des difficultés de convergence liées à la forte variation de perméabilité ont été mises en évidence par l'équipe EDF.

Suite à la présentation des différents résultats, les conclusions et propositions suivantes ont été émises :

Conclusions :

- **Les essais triaxiaux sont supposés clos à moins que l'étude comparative des résultats des différentes équipes montre des différences significatives ;**
- **L'étude 1d est également considérée close sauf si des différences de résultats sont mises en évidences lors de l'étude comparative ;**

Les études citées dans les deux paragraphes ci-dessus ne devraient plus faire l'objet d'une nouvelle présentation.

Propositions sur la présentation des résultats :

La discussion et les interventions de plusieurs membres du comité scientifique font émerger les conseils suivants :

- Il est conseillé de proposer aux différents participants d'étudier la sensibilité de leurs résultats par rapport au maillage. Cette proposition déjà contenue dans le texte initial du benchmark est renforcée par le constat suivant lequel des difficultés de convergence, liées à des problèmes de localisation, apparaissent pour les participants ayant des maillages plus raffinés ;
- Les participants devront indiquer avec précision la nature numérique de leurs résultats (aux points de Gauss, interpolés aux nœuds...);
- Il est conseillé de disposer d'indicateurs de sensibilité des paramètres, d'indicateurs d'erreur pour ceux qui peuvent, et d'indicateurs de localisation (basés sur le tenseur acoustique par exemple) ;

Propositions sur la définition des cas tests :

- Plusieurs participants ont discuté la formule de variation de la perméabilité avec la porosité proposée dans le bench. Les organisateurs ont rappelé que la formule proposée avait pour but de modéliser simplement le fait que la perméabilité augmente fortement dans la zone endommagée, ce que l'on constate in situ (par exemple au Mont Terri). Etant donné que la loi de plasticité proposée est dilatante, il est physiquement équivalent de faire dépendre la perméabilité de la porosité ou de la déformation plastique. Par contre, rien ne limite la dilatance dans la loi de comportement du benchmark. Il apparaît donc nécessaire de borner la variation de porosité ;
- Pour tenir compte de ces remarques, les organisateurs proposent la loi suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } \varphi - \varphi_0 < 0 \\ \quad \quad \quad k(\varphi) = k_0 \\ \text{Si } 0 < \varphi - \varphi_0 < 10^{-2} \\ \quad \quad \quad \frac{k(\varphi)}{k_0} = 1 + 2.10^{12} (\varphi - \varphi_0)^3 \\ \text{Si } 10^{-2} < \varphi - \varphi_0 \\ \quad \quad \quad k(\varphi) = k_0 (1 + 2.10^6) \end{array} \right.$$

- Il est demandé d'échelonner le degré des difficultés des différentes études et pour cela de proposer une étude 1d supplémentaire dans laquelle serait prise en compte la variation de perméabilité ;
- Il est également demandé pour la prochaine réunion de se limiter, dans le cadre des études 2d, à deux études . La première pourrait être sur une modélisation de base en plasticité parfaite avec variation de la perméabilité, alors que la seconde porterait, elle, sur une modélisation radoucissante avec une perméabilité constante. Les organisateurs proposeront dans ce sens de nouvelles modélisations.
- Patrick Dangla demande d'utiliser une définition lagrangienne de la porosité et d'avoir une définition de la contrainte effective prenant en compte les travaux de l'école française dans ce domaine.

La prochaine réunion d'avancement a été fixée au 22 juin 2004 de 13H à 17H.

Présents le 13 janvier 2004 :

- Université de Liège : Robert Charlier, Frédéric Collin
- L3S : René Chambon
- EDF : François Waeckel, Clément Chavant, Sylvie Granet, Joumana El-Gharib, Roméo Fernandes
- CERMES : Behrouz Gatmiri
- LCPC : Philippe Mestat, Patrick DANGLA
- LMT (Cachan) : Ahmed Benallal
- SCK/CEN : Xiangling Li
- CEA : Alain Millard
- Université de Paris VI : Jean-Baptiste Leblond
- LAEGO : Albert Giraud, Richard Giot
- Université de Bucarest : Olivian Simionescu
- LAMA (Chambéry) : Ioan Ionescu
- EUDIL : Jianfu Shao, Gilles Duveau
- CNAM : Philippe Destuynder
- ANDRA : Laurent Loth
- Université de Lyon I : Alain Bourgeat
- CSTB : Ghassan Mounajed, Youssouf Traore.

Introduction par Clément Chavant

Clément Chavant, rappelle que la motivation de ce benchmark est d'estimer la fiabilité des méthodes numériques utilisées pour les études sur l'endommagement des zones excavées d'un site de stockage de déchets nucléaires

Introduction par Alain Bourgeat : l'exemple du benchmark COUPLEX

Alain Bourgeat, président du GDR MOMAS, situe le présent exercice en donnant l'exemple d'un benchmark déjà réalisé dans le cadre d'un GDR : le benchmark COUPLEX. Il s'agit de calculs d'hydrologie et de transport. Son but est de tester la qualité numérique des codes. On part d'un modèle simplifié, on définit un test « vérifiable » et compréhensible par un large public (non restreint aux seuls ingénieurs du domaine). Trois niveaux de difficultés sont distingués, correspondant à trois exercices. Après la première étape, un workshop de deux jours avec présentation des résultats a été organisé, les quatre meilleures contributions ont été récompensées (6000€). Le rôle du Comité Scientifique de Couplex a été l'aide et le suivi des participants, la sélection « des meilleurs », l'organisation du workshop.

Alain Bourgeat insiste sur le fait que ce genre d'exercice doit être ouvert à la communauté internationale dont on doit rechercher la participation avec insistance, et que la publication des résultats est une obligation. A titre indicatif, le calendrier de COUPLEX a été :

Lancement :	01/2001
Fin étape I :	04/2001
Workshop	07/2001
Fin étapes II et III :	2002
Publication :	2004

Présentation de Olivian Simionescu de l'université de Bucarest

La présentation avait pour thème « Les modèles de transports dans des milieux élastoplastiques ». Une solution analytique est obtenue sous les hypothèses suivantes :

- Cavité circulaire en milieu infini avec état de contrainte initialement isotrope ;
- Chargement thermique correspondant à une température décroissante avec le rayon ;
- Critère de plasticité de type Tresca avec dépendance de la cohésion par rapport à la température.

La solution s'appuie sur un théorème d'existence et unicité. Les problèmes mécaniques et thermiques sont complètement découplés. O. Simionescu montre l'évolution des zones plastiques, selon qu'elles correspondent à des régimes d'arête ou de face. Une étude dans ce cadre pourra être proposée.

Présentation des résultats

On rappelle que les études à l'ordre du jour étaient :

- Etude 0d : essais triaxiaux en conditions non drainées ;
- Etude 1d : cavité cylindrique non revêtue en massif infini avec un état de contrainte initial isotrope. La perméabilité est constante, le milieu complètement saturé et le modèle mécanique est radoucissant (de type Drucker-Prager) ;
- Etude 2d : cavité cylindrique non revêtue en massif infini avec un état de contrainte initial anisotrope. Trois modélisations sont proposées : La modélisation dite « de base » en plasticité parfaite avec une perméabilité constante et un milieu complètement saturé. La modélisation dite « Variante1 » avec le modèle radoucissant, un milieu complètement saturé et une perméabilité variable. La modélisation dite « Variante2 » avec le modèle radoucissant, un milieu partiellement saturé (hypothèse de Richards), une perméabilité variable, et une condition de suintement.
- Etude comparative sur la convergence des résultats par rapport au pas de temps et d'espace. Cette étude comparative est proposée dans le cadre des modélisations « de base » et « variante1 » en 2d.

Présentation de L3S (Frédéric Collin)

Le code utilisé est LAGAMINE (développé à l'Université de Liège, par l'équipe de Robert Charlier). Les grandes lignes de la modélisation sont rappelées :

- grandes déformations ;
- linéarisation de l'équation des fluides (proposée dans le cadre du benchmark) ;
- formulation faible des équations complètement couplées
- algorithme de résolution de Newton-Raphson ;
- éléments finis couplés en Déplacement et Pression d'eau sur 8 nœuds avec 4 points de Gauss.

L'étude 0d sur les triaxiaux non drainés a été présentée sur un élément en formulation axisymétrique. Une étude supplémentaire sur des biaxiaux en conditions drainés a permis de mettre en évidence des phénomènes de localisation. L'utilisation du critère de Rice montre la possibilité d'apparition de bifurcations. La modélisation est alors reprise en formulation de milieu enrichi (second gradient). L'hétérogénéité est générée soit en affaiblissant un élément (baisse de 5% de sa cohésion) soit en choisissant des initialisations aléatoires pour l'algorithme de Newton.

Dans le cadre de l'étude 1d, le laboratoire a présenté une étude comparative en prenant en compte une variation de la dimension radiale du modèle. L'objectif était de montrer que la dimension spécifiée dans le cadre du Benchmark était relativement faible compte tenu des conditions aux limites proposées.

Dans le cadre de l'étude 2d, le laboratoire a présenté des résultats pour la modélisation dite de base.

Présentation de EDF (Roméo Fernandes)

Le code utilisé est Code_Aster qui a pour particularité, dans le cadre des études de couplages Thermo-Hydro-Mécanique, d'utiliser des éléments Q2 en déplacements et Q1 en pression avec des points de Gauss aux sommets.

Dans le cadre de l'étude 0d une solution analytique a été présentée sous conditions de petites variations de masse volumique et de porosité. Les résultats de Code_aster coïncident avec la solution analytique.

Pour l'étude 1d, les résultats présentés sont, d'un point de vue qualitatif, similaires à ceux proposés par le laboratoire L3S.

Pour l'étude 2d :

- En plasticité parfaite les résultats présentés sont en accord avec ceux de L3S.
- Pour la modélisation de la « variante1 », des difficultés de convergence (à partir d'une simulation d'excavation de trois jours) ont été rencontrées. Ces difficultés sont liées à de fortes diminutions de la perméabilité. Ce constat a mené à la proposition de deux nouvelles modélisations : la première dite « variante1bis » propose de reprendre l'étude 2d avec une perméabilité constante, et la seconde dite « variante1ter » propose de borner la perméabilité lorsque la variation de porosité devient négative. Les résultats de ces deux études ont été présentés en fin d'excavation.
 - Les résultats obtenus avec la modélisation de la « variante1bis » ont mis en évidence des phénomènes de localisation avec le maillage proposé (le maillage comporte environ 2000 mailles).
 - Les résultats obtenus avec la modélisation de la « variante1ter » ont également mis en évidence des problèmes liés à la localisation.
- Pour la modélisation de la « variante2 », la condition de suintement n'a pas été prise en compte. Comme pour la « variante1 » la non convergence a été rapidement constatée (à peine 3 jours d'excavation).

La dépendance des résultats par rapport au pas de temps et au pas d'espace, a également été présentée.

Présentation du LCPC (Patrick Dangla)

Le code utilisé est BIL qui a pour particularité d'avoir un pas de temps automatique (adaptatif) et utilise la méthode Crout avec un algorithme de Newton.

Pour les essais triaxiaux et l'étude 1d les résultats étaient proches, d'un point de vue qualitatif, de ceux présentés par L3S et EDF.

Pour l'étude 2d, les résultats présentés portent sur le modèle radoucissant avec une perméabilité constante. Le calcul n'a apparemment pas posé de problèmes de convergence et les résultats ne montrent pas de problèmes liés au phénomène de localisation. Le nombre d'itérations obtenu apparaît cependant important. Le maillage utilisé semble assez grossier et les critères de convergence ne portent pas sur le résidu mais sont du type accroissement relatif des variables primales inférieur à un critère du type u/u_0 .

Présentation du LAEGO (Albert Giraud)

Le code utilisé est le Code_Aster (version libre) comprenant un modèle de comportement développé par le LAEGO.

Les résultats présentés dans le cadre de ce benchmark portent sur les essais triaxiaux et s'approchent également des résultats des participants précédents.

Des résultats portant sur les essais triaxiaux avec une prise en compte d'un couplage en conditions non saturées ont également été présentés. La forte dilatance du modèle et la variation importante de la déformation conduisent à une forte désaturation.

Présentation de EUDIL (Jianfu Shao)

Eudil présente des résultats de triaxiaux non drainés avec modélisation complètement ou partiellement saturée ; Les résultats obtenus sont voisins de ceux du LAEGO. Eudil présente également des résultats sur le cas test 1d, qui semblent qualitativement proches de ceux de L3S et EDF. Eudil a également étudié le cas test 1d en condition partiellement saturée.

Discussion

Les différentes présentations ont conduit les participants du benchmark à s'interroger sur la nécessité de définir un maillage commun. Mais en plus d'être trop forte, cette contrainte pourrait être illusoire car les différents codes n'utilisent pas les mêmes types de discrétisation. Par contre et a minima, les participants devront étudier la sensibilité de leurs résultats avec la finesse du maillage.

Philippe Mestat a rappelé l'importance de fixer des objectifs tels que la vérification de la qualité des codes. Que peut-on vérifier dans les codes pour montrer la cohérence des résultats ? Comment interpréter les résidus ? Il a de plus souligné la nécessité de porter une attention significative à la projection des contraintes des points de Gauss aux nœuds. Il suggère que les participants montrent la cohérence de leurs résultats en montrant, par exemple, que les déplacements, contraintes, déformations élastiques et plastiques obtenus sont cohérents. Les critères de convergence doivent, de plus, être très explicites.

Philippe Destuynder a, quant à lui, rappelé l'importance de respecter les lois proposées. Il pense également que des indicateurs d'erreur pour ceux qui en possèdent seraient d'une grande utilité. Il a également plaidé en faveur d'un maillage commun.

Et Ahmed Benallal propose également d'avoir des indicateurs de localisation.

Annexe

Pour la comparaison des résultats dans le cadre du benchmark, il est demandé aux participants de fournir un fichier excel correspondant aux résultats suivant :

1. Dans le cadre du test 0d

Pour chaque niveau de confinement (1 Mpa, 5 Mpa, 10 Mpa, 15 Mpa) :

- $(\sigma_1 - \sigma_3)$ fonction de ε_1
- pression d'eau p_e fonction de ε_1
- déformation volumique totale ε_v fonction de ε_1

2. Dans le cadre du test 1d

- Le déplacement radial fonction de r
- La pression interstitielle p_e fonction de r
- Les contraintes effectives $\sigma'_{rr}, \sigma'_{\theta\theta}, \sigma'_{zz}$ fonctions de r
- La déformation plastique cumulée de cisaillement γ^p en fonction de r
- La déformation plastique cumulée volumique ε_v^p en fonction de r

Pour cette modélisation, les résultats seront fournis aux instants : $1.5 \cdot 10^6$ s, $50 \cdot 10^6$ s et $300 \cdot 10^6$ s. Il est demandé que toutes les courbes (déplacement, pression interstitielle, contraintes effectives, déformation plastique cumulée et déformation plastique volumique cumulée) soient fournies sur les mêmes abscisses (fonction de r). Elles devront toutefois inclure, a minima, les abscisses suivantes : 3, 3.05, 3.2, 3.55, 3.7, 5 et 10 m.