

Réunion n°2 (22 juin 2004) : Présentation des résultats du benchmark proposé dans le cadre du GDR MoMas

Rédacteur :

R.Fernandes

06/07/2004

Synthèse

L'objectif de cette seconde réunion était de faire le point sur l'état d'avancement des travaux concernant le Benchmark « Simulation d'excavation en comportement hydro mécanique fragile » proposé dans le cadre du GDR MoMas.

Un document portant sur l'étude comparative des cas-tests 0d et 1d, présentés lors de la réunion précédente, sera diffusé aux participants.

Six équipes ont participé à la mise en commun de leurs résultats dans le cadre de cette seconde étape : L3S (Grenoble en collaboration avec l'Université de Liège), CEA, EDF (R&D), LCPC, LAEGO, et l'Université de Lille.

L'état d'avancement actuel du benchmark a conduit l'ensemble des participants à décider de faire une publication commune. Deux possibilités complémentaires ont été envisagées :

- présentation lors du Congrès organisé par l'ANDRA à Tours courant 2005 ;
- publication dans une revue (International Journal of Geomechanics ou Revue Française de Génie Civil).

La rédaction dudit article devrait être finalisée pour fin septembre 2004.

En plus de la publication commune, a également été envisagée la rédaction d'articles sur les différentes problématiques traitées lors de ce benchmark :

- utilisation de conditions aux limites de suintement ;
- localisations et grandes déformations ;
- aspects numériques liés à l'opérateur tangent ;
- ...

La liste n'est pas exhaustive et chaque thème pourrait être abordé en commun par plusieurs équipes.

Il a également été décidé, pour les réunions à venir, que chaque équipe décrive son code de calcul : présentation des schémas numériques en espace et en temps, les méthodes de résolution des équations non linéaires discrètes, les critères de convergence utilisés ...

Toutes les équipes ont signalé des difficultés de convergence sur les cas-tests 2.4 (modèle adoucissant) et 1.2 (modèle adoucissant avec perméabilité variable). Ces difficultés de convergence semblent être dues à des paramètres trop sévères ne correspondant pas à la réalité physique. Il a par conséquent été décidé, pour la réunion prochaine, :

- de modifier les paramètres suivant pour le cas-test 1.2 :

$$\text{○ la relation de perméabilité est définie par : } \left\{ \begin{array}{l} \text{Si } \varphi - \varphi_0 < 0 \\ \quad k(\varphi) = k_0 \\ \text{Si } 0 < \varphi - \varphi_0 < 10^{-2} \\ \quad \frac{k(\varphi)}{k_0} = 1 + 2.10^{10} (\varphi - \varphi_0)^3 \\ \text{Si } 10^{-2} < \varphi - \varphi_0 \\ \quad k(\varphi) = k_0 (1 + 2.10^4) \end{array} \right.$$

- le plateau de cohésion est défini par $\alpha = 0.5$ dans la relation :

$$\begin{cases} 0 < \gamma^p < \gamma_R^p & f(\gamma^p) = \left(1 - (1 - \alpha) \frac{\gamma^p}{\gamma_R^p}\right)^2 \\ \gamma^p \geq \gamma_R^p & f(\gamma^p) = \alpha^2 \end{cases}$$

- o la condition hydraulique en R1 est une condition dite de suintement :

$$\begin{cases} 0 \leq t \leq T & p_e \leq 4,7 \left(1 - \frac{t}{T}\right) & ; & \left(p_e - 4,7 \left(1 - \frac{t}{T}\right)\right) \cdot \frac{\partial p_e}{\partial \mathbf{n}} = 0 \\ t > T & p_e \leq 0 & ; & p_e \cdot \frac{\partial p_e}{\partial \mathbf{n}} = 0 \end{cases}$$

où $T = 1,5 * 10^6 s \approx 17 \text{ jours}$

Les présentations de la prochaine réunion (Novembre 2004) porteront sur :

- le cas-test 2.5 (avec prise en compte des maillages M1 et M2) avec les mêmes conditions aux limites que le cas-test 1.2.
- les participants pourront revenir sur les cas-tests 1.2, 2.1, 2.2 et 2.4, afin d'expliquer les différences constatées à ce jour. Des études de convergence par rapport à l'espace et au temps sont fortement conseillées.

De plus, étant donné la dépendance des résultats aux modèles locaux utilisés, s'est posée la question de savoir s'il était envisageable de faire des calculs sur de tels matériaux fragiles en dehors d'une loi de plasticité parfaite. Il apparaît alors nécessaire de prendre en compte, dans le cadre de ce benchmark, l'étude d'un cas-test avec une formulation non-locale. Les participants se sont mis d'accord pour ne pas imposer de modèle particulier. Seule la définition d'une longueur caractéristique de bande devra être commune pour tous les participants. L'intérêt de ce modèle sera d'étudier l'importance de la dispersion des résultats. Ce modèle ne sera pas à l'ordre du jour de la prochaine réunion.

La prochaine réunion est prévue courant novembre. La date reste à déterminer.

Introduction par Clément Chavant

Clément Chavant a fait le point sur les principales évolutions apportées à la nouvelle version du benchmark, sur l'état d'avancement des différents cas-tests, sur les différents documents diffusés depuis la première réunion du 13 janvier 2004 et a rappelé les modifications apportées au calendrier. La modification du calendrier est due, d'une part à l'ajout de plusieurs cas-tests parmi lesquels les modèles non-locaux et, d'autre part aux difficultés rencontrées. Ce qui conduit à s'interroger sur le maintien du cas-test 3d et sur sa faisabilité.

Toutes ces informations sont détaillées dans le document PowerPoint joint.

Présentation des résultats

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

- Etude 1d : **Cas 1.2** : cavité cylindrique non revêtue en massif infini avec un état de contrainte initial isotrope. La perméabilité est variable, 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 :
 - **Cas 2.1** : Une modélisation en plasticité parfaite avec une perméabilité constante et un milieu complètement saturé ;
 - **Cas 2.2** : Une modélisation en plasticité parfaite avec une perméabilité variable et un milieu complètement saturé ;
 - **Cas 2.4 (M1 et M2)** : Une modélisation avec le modèle radoucissant (de type Drucker-Prager) avec une perméabilité constante et un milieu complètement saturé. Pour cette modélisation sont proposés deux maillages : le premier maillage (maillage M1) doit être tel que la distance radiale entre le bord de la cavité et la première couche de nœuds intérieurs au domaine soit de 0.15m. Le second maillage (maillage M2) sera localement 10 fois plus fin.

Présentation commune aux participants (Roméo Fernandes)

Un document en « pré-diffusion » présentant les comparaisons des résultats des cas-tests étudiés pour la première réunion du 13 janvier 2004 a été envoyé aux équipes participantes ainsi qu'au comité scientifique. Cette pré-diffusion a permis au LCPC de fournir une nouvelle version de ses résultats avec une nouvelle définition dans la prise en compte de la porosité, et a également permis de récupérer les résultats du LAEGO qui n'avait pas encore été remis. La diffusion définitive de ce document interviendra après la prise en compte de ces nouveaux résultats.

Les comparaisons effectuées sur les cas-tests à l'ordre du jour portent sur les résultats fournis par :

- Le CEA avec le code CASTEM pour les cas-tests 2.1, 2.2 et 2.4-M1. Pour le cas 1.2 le calcul n'a pas permis d'aller au-delà d'une simulation de 1.47^e6 secondes pour cause de non convergence.
- L'université de Lille avec le code THM Passa (code interne) pour les cas-tests 1.2 (résultats fournis sur calcul non convergé avec un modèle à porosité constante), 2.1, 2.2 et 2.4-M1.
- Le L3S (Liège-3S-Mol) avec le code LAGAMINE pour les cas-tests 2.1, 2.2 et 2.4-M1.
- Le LCPC avec le code BIL pour les cas-tests 2.1, 2.2 et 2.4-M1.
- Le LAEGO avec une version libre surchargée du code_aster pour les cas-tests 1.2 (les résultats fournis correspondait au cas-test 1.1), 2.1, 2.2 et 2.4-M1.
- EDF avec le code_aster pour les cas-tests 1.2 (calcul arrêté en fin d'excavation car les calculs sont gourmands en temps CPU), 2.1, 2.2, 2.4-M1 et 2.4-M2 (calcul arrêté en fin d'excavation car les calculs sont gourmands en temps CPU).

Bilan cas 2.1 :

Les comparaisons ont montré que deux courbes s'écartaient des autres résultats : celle du LCPC et celle du LAEGO. Concernant le LCPC, Patrick Dangla souligne que les différences obtenues s'expliquent peut-être par le fait que l'équation de l'évolution de la porosité utilisée par le LCPC diffère de la formule énoncée dans le

benchmark de la façon suivante $\varphi - \varphi_0 = b\varepsilon_v + \frac{S_c(b - \varphi_0)}{K_s}(p_c - p_c^0)$ au lieu de $\varphi - \varphi_0 = b\varepsilon_v + \frac{S_c(b - \varphi)}{K_s}(p_c - p_c^0)$.

En revanche, en ce qui concerne le LAEGO la différence semble plus difficile à interpréter. Une erreur dans les paramètres en données sont peut-être à l'origine des différences obtenues.

Bilan cas 2.2 :

Les écarts sont plus faibles que pour le cas 2.1. On constate, cependant, un écart de la courbe du LCPC par rapport aux autres courbes. Une autre constatation porte sur l'apparition d'oscillations des courbes qui traduit probablement un problème de discrétisation du maillage.

Il a été noté lors de la présentation de ces deux cas-tests que l'influence de la discrétisation spatiale (sur le maillage) et l'influence de la discrétisation temporelle (sur les pas de temps) pouvaient être à l'origine de certaines différences.

Bilan cas 2.4-M1 :

Tous les participants ont souligné que le calcul avait présenté des difficultés au niveau de la convergence. On constate toujours des différences plus importantes sur les courbes du LCPC et du LAEGO, probablement pour les mêmes raisons que celles mentionnées ci-dessus. De plus, concernant le LAEGO, les résultats sont fournis à partir d'un calcul non convergé. On constate en revanche un écart plus important qu'auparavant pour les résultats fournis par l'Université de Lille. Ces écarts ont été expliqués par la suite par une différence de prise en compte de la porosité (dans les calculs de Lille, la porosité est considérée constante dans l'équation de la conservation de la masse d'eau).

Bilan cas 1.2 :

Il a été précisé que les résultats fournis par le LAEGO ne correspondaient pas au cas-test 1.2. De nouveaux résultats ont donnés après la réunion. La comparaison en fin d'excavation entre les résultats fournis par l'Université de Lille et EDF montrent des différences très importantes. Cependant, l'Université de Lille a précisé que les calculs obtenus n'avaient pas convergé et qu'elle utilisait la formulation à porosité constante. Après avoir effectué le calcul avec la nouvelle formulation, Gilles Duveau a indiqué que, comme EDF, il trouve un palier de l'ordre de 6 mètres en pression en fin d'excavation et un déplacement de l'ordre de 2 mètres.

Présentation de EDF (Roméo Fernandes)

Pour palier les problèmes liés à la convergence, l'équipe EDF, a utilisé la matrice élastique pour le calcul de la partie mécanique de l'opérateur tangent. Cette méthode a permis de s'affranchir des difficultés de convergence. La convergence est cependant plus lente. Les temps de calcul ne sont pas très importants car, même si le nombre d'itérations de Newton a augmenté par pas de temps, il n'est plus nécessaire de réactualiser l'opérateur tangent. A. Benallal a souligné que les difficultés de convergence pouvaient être dues à des snap-back. C. Chavant a répondu que le pilotage des courbes dans le cas hydraulique est difficile car le temps intervient en tant que tel dans le problème hydraulique et les variations du chargement mécanique avec le temps sont imposées. .

Les isovaleurs des déformations plastiques cumulées de cisaillement et des frontières des zones plastiques ont été présentées. Une évolution des zones potentielles de localisation, selon le critère de Rice, a été présentée en fonction du temps. Par abus de langage on parlera de « zones de localisation » pour désigner les zones potentielles de localisation. On constate un début de localisation en milieu d'excavation (à 9 jours) au pied du radier. La zone de localisation se propage alors suivant la première couche d'éléments puis sur la seconde couche en fonction de la déformation plastique cumulée de cisaillement. On voit apparaître également, au cours du calcul, des zones de décharges.

Ces isovaleurs ont montré, par ailleurs, que le maillage M1 utilisé devrait être davantage raffiné après le premier mètre.

Le calcul du cas-test 2.4 avec le maillage M2 a été mené jusqu'en fin d'excavation. Il a montré l'apparition de deux pics à 0.05 mètre et à 0.2 mètre au niveau des déplacements et des déformations plastiques cumulées de cisaillement traduisant l'apparition de zones de localisation. Une étude des isovaleurs sur les déformations plastiques cumulées montre effectivement l'apparition de franges autour de la galerie. On retrouve des franges similaires sur l'études des zones de localisation par le critère de Rice. On confirme ainsi l'évolution des zones de localisation avec l'évolution des déformations plastiques cumulées de cisaillement. De plus, on constate que ces zones de localisation sont fortement dépendantes du maillage. Il suffit pour cela de comparer les zones de

localisation suivant le maillage M1 et suivant le maillage M2. R. Charlier précise quand même qu'il existe toujours une direction préférentielle de localisation.

Sur le cas-test 1.2 où le modèle utilisé est le modèle radoucissant de type Drucker-Prager et où la perméabilité est variable, l'étude de la variation de la porosité montre que sur les 5 premiers mètres la perméabilité est alors multipliée par un facteur d'ordre 10^6 . L. Loth précise que ce facteur est de l'ordre de 10^4 pour les études menées par l'ANDRA.

Suite à la présentation des temps de calcul, R. Charlier a estimé que cet indicateur n'était pas nécessaire, puisqu'il dépend des différentes discrétisations (spatiales et temporelles). F. Waeckel a estimé qu'il s'agissait tout de même d'un paramètre important au moins d'un point de vue industriel pour envisager par exemple un calcul 3d.

Présentation de l'Université de Lille (Gilles Duveau)

Les résultats fournis par l'Université de Lille pour les comparaisons présentées ci-dessus ont été obtenus avec un calcul à porosité constante, c'est-à-dire que le terme de la porosité est supposé constant dans l'équation de la conservation de la masse d'eau.

Une présentation des résultats 0d, 1d (cas 1.1, perméabilité constante) et 2d (cas 2.1, 2.2, et 2.4) a été faite avec la modélisation conforme à la définition du benchmark. Les courbes de l'Université de Lille étaient alors cohérentes avec les autres résultats sur les test 0d (pour les déformations volumiques notamment), 1d et sur les cas 2d (2.2 et 2.4). La variation de la porosité n'a pas montré de réel impact sur le cas 2.1.

De plus, l'étude sur le cas test 1d à perméabilité variable n'a pas convergé avec les hypothèses du benchmark. En revanche, il a été précisé qu'une modification apportée au plateau de cohésion par une modification du paramètre alpha améliorerait notablement la convergence.

Présentation du LAEGO (Dashnor Hoxha)

Le modèle DVL utilisé par le LAEGO est un développement interne qui peut dégénérer en Drucker-Prager. Une étude comparative a été présentée pour montrer la concordance des résultats des modèles DVL du LAEGO dégénéré en Drucker-Prager et Drucker-Prager du code_aster. Une étude supplémentaire sur l'influence de l'équation de la perméabilité a été présentée. On constate une meilleure convergence des calculs en abaissant le critère de la perméabilité de 10^{12} à 10^8 .

Présentation du L3S (Frédéric Collin)

Sur le calcul 1d où le modèle utilisé est de type Drucker-Prager à perméabilité variable, on constate un problème de convergence lié au calcul d'un milieu sans résistance au niveau de la paroi (les contraintes et déformations sont nulles en fin d'excavation). La conclusion porte sur la cohérence des conditions aux limites qui semblent peu réaliste d'un point de vue physique puisqu'elles impliquent une injection importante d'eau en paroi. Le L3S propose par conséquent de modifier les conditions aux limites par des conditions de suintement.

Sur les calculs 2d, le L3S a présenté des isovaleurs qui étaient en accord avec les résultats présentés par l'équipe EDF. On retrouve également les mêmes formes de zones de localisation que celles observées sur les isovaleurs présentées par EDF. En revanche, on ne retrouve pas les zones de décharges.