

Simulation d'excavation en comportement hydro mécanique fragile

Benchmark proposé dans le cadre du GDR MOMAS

C. Chavant
EDF R&D, département AMA
1, Avenue du Général De Gaulle, 92141 Clamart Cedex
Tel : 01 47 65 48 17
Email : clement.chavant@edf.fr

A Millard
DEN SEMT LM2S
CEA/SACLAY
91191 Gif Sur Yvette
Tel : 01 69 08 62 47
Email : amillard@cea.fr

Ce document est la Version 3 du benchmark de Simulation d'excavation en comportement hydro mécanique fragile.

Les principales révisions concernent :

- **Une modification de la formule donnant l'évolution de la porosité avec la déformation volumique,**
- **Une modification de la définition de la contrainte effective,**
- **Quelques modifications pour les instants de sortie des résultats**
- **L'ajout d'une variante pour le calcul 1D,**
- **L'ajout de contraintes de maillage dans les cas test 2D**
- **L'ajout de trois variantes pour les calculs 2D, incluant maintenant des calculs avec des modèles non locaux dont la formulation est libre**
- **La modification du calendrier, lequel n'inclut plus les calculs 3D**

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1. | OBJECTIFS ET DESCRIPTION SYNTHETIQUE DU BENCHMARK..... | 4 |
| 2. | PRINCIPES D'ORGANISATION..... | 4 |
| 2.1. | ORGANISATEURS..... | 4 |
| 2.2. | ATTRIBUTION D'UN PRIX..... | 5 |
| 2.3. | COMITE SCIENTIFIQUE..... | 5 |
| 2.4. | DUREE DU BENCH ET PLANNING..... | 5 |
| 3. | DESCRIPTION DES MODELES..... | 5 |
| 3.1. | HYPOTHESES GENERALES..... | 5 |
| 3.2. | NOTATIONS..... | 6 |
| 3.3. | CONSERVATION DE LA MASSE D'EAU..... | 7 |
| 3.4. | CONSERVATION DE LA QUANTITE DE MOUVEMENT..... | 7 |
| 3.5. | COMPORTEMENT DE L'EAU..... | 7 |
| 3.6. | LOI DE DARCY..... | 7 |
| 3.7. | EVOLUTION DE LA POROSITE..... | 7 |
| 3.8. | LOI DE COMPORTEMENT MECANIQUE..... | 7 |
| 3.9. | FORMULATIONS NON LOCALES..... | 9 |
| 4. | LES CAS TESTS..... | 10 |
| 4.1. | CAS TESTS OD : ESSAIS TRIAXIAUX..... | 10 |
| 4.1.1. | <i>Géométrie</i> | 10 |
| 4.1.2. | <i>Conditions initiales</i> | 10 |
| 4.1.3. | <i>Chargement</i> | 10 |
| 4.1.4. | <i>Résultats</i> | 10 |
| 4.2. | CAS TEST 1D..... | 10 |
| 4.2.1. | <i>Géométrie</i> | 11 |
| 4.2.2. | <i>Conditions initiales</i> | 11 |
| 4.2.3. | <i>Conditions aux limites et chargement</i> | 11 |
| 4.2.4. | <i>Etude théorique</i> | 11 |
| 4.2.5. | <i>Cas 1.1 Perméabilité constante</i> | 12 |
| 4.2.6. | <i>Cas 1.2 Perméabilité variable</i> | 12 |
| 4.2.7. | <i>Résultats de calcul</i> | 12 |
| 4.3. | CAS TEST 2D..... | 12 |
| 4.3.1. | <i>Géométrie</i> | 13 |
| 4.3.2. | <i>Conditions initiales</i> | 13 |
| 4.3.3. | <i>Conditions aux limites et chargement</i> | 13 |
| 4.3.4. | <i>Cas 2.1 : plasticité parfaite</i> | 14 |
| 4.3.5. | <i>Cas 2.2 : Plasticité parfaite perméabilité variable</i> | 14 |
| 4.3.6. | <i>Cas test 2.3 : non saturé</i> | 14 |
| 4.3.7. | <i>Cas 2.4 adoucissant local</i> | 15 |
| 4.3.8. | <i>Cas 2.5 adoucissant local perméabilité variable</i> | 16 |
| 4.3.9. | <i>Cas 2.6 Non local mécanique</i> | 16 |
| 4.3.10. | <i>Cas 2.7 Non local couplé</i> | 16 |
| 4.3.11. | <i>Résultats</i> | 16 |
| 4.3.12. | <i>Convergence par rapport au pas de temps et d'espace</i> | 17 |
| 4.4. | TEST 3D..... | 17 |
| 4.4.1. | <i>Géométrie</i> | 17 |
| 4.4.2. | <i>Conditions initiales</i> | 18 |

| | |
|--|-----------|
| 4.4.3. <i>Conditions aux limites et chargement</i> | 18 |
| 4.4.4. <i>Résultats</i> | 19 |
| 4.5. VALEURS DES COEFFICIENTS | 19 |
| 5. CONTENU ET FORME DES RESULTATS | 21 |
| 6. RESUME DES CAS TESTS..... | 21 |
| 6.1. LES CAS 1D | 21 |
| 6.2. LES CAS 2D | 22 |
| 6.3. LE CAS 3D..... | 22 |

1. Objectifs et description synthétique du benchmark

Ce benchmark est proposé dans le cadre du GDR MOMAS¹..

La motivation industrielle qui sous-tend les cas tests proposés est la nécessité de mieux connaître l'endommagement induit par les travaux d'excavation dans le milieu naturel d'un éventuel site de stockage de déchets nucléaires.

Les tests proposés se donnent pour but de mesurer la fiabilité des méthodes numériques utilisées dans ce cadre. Ils excluent les chargements thermiques. Ils prennent en compte la dégradation des propriétés mécaniques de la roche, et pour l'un d'entre eux, la variation de perméabilité qui s'en déduit. Ils prennent en compte le couplage entre hydraulique et mécanique, mais écartent toute modélisation du fluage.

Les équations et hypothèses de modélisation sont décrites, les lois de comportement hydrauliques et mécaniques sont imposées, sauf pour le modèle mécanique non local. Les chargements et conditions aux limites sont fournis.

Les participants sont libres :

- des méthodes de discrétisation en espace et en temps,
- des méthodes de résolution des équations.
- De la formulation du modèle de mécanique non local

Sauf pour les tests triaxiaux, les solutions analytiques n'existent pas (tout au plus peut on trouver une solution semi analytique pour le test 1).

La fiabilité des résultats sera donc mesurée par leur plus ou moins grande dispersion.

2. Principes d'organisation

2.1. *Organisateurs*

Le benchmark est organisé dans le cadre du GDR MOMAS par :

C. Chavant
EDF R&D, département AMA
1, Avenue du Général De Gaulle, 92141 Clamart Cedex
Tel : 01 47 65 48 17
Email : clement.chavant@edf.fr

A Millard
DEN SEMT LM2S
CEA/SACLAY
91191 Gif Sur Yvette
Tel : 01 69 08 62 47
Email : amillard@cea.fr

Les organisateurs ont pour rôle de :

- rédiger la définition des cas tests et la forme attendue des résultats, la mettre à jour si nécessaire et la diffuser,
- organiser des réunions entre participants pour faire le point sur l'avancée des travaux,

¹ <https://mcs.univ-lyon1.fr/MOMAS>

Directeur: Alain BOURGEAT : Université Lyon1 - UCB; Equipe MCS Bât. ISTIL, 15 Bld. Lataret F-69622 Villeurbanne Cedex ; France

- rédiger les compte rendus de réunions incluant des synthèses partielles et les diffuser auprès des participants,
- rédiger et diffuser auprès des participants la synthèse finale.

2.2. Attribution d'un prix

Le comité scientifique notera les contributions des différentes équipes selon des critères incluant les apports théoriques, la qualité des résultats (justification, étude de la convergence par rapport au pas de temps et d'espace) et leur présentation (présentation des résultats numériques et description des méthodes numériques). Un prix de 3000 € sera attribué aux trois premières équipes.

2.3. Comité scientifique

Un comité scientifique est constitué. Son rôle est

- de confirmer la définition des cas tests ou au contraire de proposer des modifications en fonction des résultats trouvés par les participants ou selon les difficultés qu'ils rencontrent.
- d'évaluer les contributions en vue de l'attribution des prix
- d'aider à la publication des résultats.

La composition du Comité scientifique est :

Ahmed Benallal, Alain Bourgeat, Philippe Destuynder, Jean Baptiste Leblond, Philippe Mestat, Michel Tijani,

2.4. Durée du bench et planning

Le benchmark a une durée de un an.

Le planning en est :

- **13 Janvier 2004** : réunion intermédiaire numéro 1 : point sur les cas tests 1 et 2, réajustement des données des tests 1 et 2 si nécessaire. Présentation des critères d'évaluation des équipes par le comité scientifique.
- **22 Juin 2004** réunion intermédiaire numéro 2 : remise par les participants de leurs contributions aux tests 1.2, 2.1, 2.2, 2.4. Synthèse intermédiaire.
- **Novembre 2004** remise par les participants de leurs contributions aux test 2.3 et 2.5. Point sur les cas teste non locaux 2.6 et 2.7.
- **Février 2005**. remise par les participants de leurs contributions aux tests 2.6 et 2.7. Synthèse finale

3. Description des modèles

3.1. Hypothèses générales

- conservation de la masse d'eau,
- conservation de la quantité de mouvement en quasistatique, petites déformations,
- le milieu est saturé en eau sauf pour le test 2.3 où une modélisation partiellement saturée avec hypothèse de Richards (pression de gaz constante) est proposée,
- les écoulements sont darcéens, avec un couplage entre perméabilité et endommagement dans les cas 1.2, 2.2, 2.3, 2.5,
- l'eau est compressible sa pression peut être négative,
- le coefficient de Biot est constant,
- la loi de comportement mécanique est l'élastoplasticité, avec un modèle de Drucker Prager formulé en contraintes effectives. Les déformations plastiques sont calculées à partir de la

règle de normalité (écoulement associé), le critère a un écrouissage de type radoucissant sauf pour les cas 2.1, 2.3 et 2.3 qui sont des cas de plasticité parfaite.

3.2. Notations

Les contraintes mécaniques sont comptées positives en traction, les déformations positives en extension. La pression interstitielle de l'eau est positive en compression.

| | |
|---|--|
| p_e | pression interstitielle d'eau |
| ρ_e | masse volumique de l'eau |
| \mathbf{M}_e | vitesse de filtration de l'eau |
| S_e | saturation en eau |
| \mathbf{u} | déplacements du squelette de composantes u_x, u_y, u_z |
| $\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + \nabla^T \mathbf{u})$ | tenseur des déformations |
| $\mathbf{e} = \boldsymbol{\varepsilon} - \frac{Tr(\boldsymbol{\varepsilon})}{3} \mathbf{I}$ | déviateur des déformations |
| $\varepsilon_v = Tr(\boldsymbol{\varepsilon})$ | trace des déformations : variation de volume |
| $\boldsymbol{\varepsilon}^p$ | tenseur des déformations plastiques, |
| $\varepsilon_v^p = Tr(\boldsymbol{\varepsilon}^p)$ | variation de volume plastique. |
| \mathbf{e}^p | déviateur des déformations plastiques |
| $\delta\gamma^p = \sqrt{d\mathbf{e}^p \cdot d\mathbf{e}^p}$ | déformation plastique cumulée de cisaillement: |
| φ | porosité lagrangienne |
| $\boldsymbol{\sigma}$ | tenseur des contraintes totales |
| $\boldsymbol{\sigma}'$ | tenseur des contraintes effectives |
| $\mathbf{s} = \boldsymbol{\sigma}' - \frac{Tr(\boldsymbol{\sigma}')}{3} \mathbf{I}$ | déviateur des contraintes |
| $s_{II} = \sqrt{\mathbf{s} \cdot \mathbf{s}}$ | |
| $I_1 = Tr(\boldsymbol{\sigma}')$ | trace des contraintes effectives |
| ρ | masse volumique de la roche mouillée |
| \mathbf{g} | vecteur de l'accélération de la pesanteur |
| $k(\varphi)$ | perméabilité intrinsèque |
| $k_e^{rel}(S_e)$ | perméabilité relative à l'eau |
| K_e | incompressibilité de l'eau |
| E_0 | module d'Young drainé du squelette |
| ν_0 | coefficient de Poisson du squelette |
| $2\mu_0 = \frac{E_0}{1+\nu_0}$ | |
| $K_0 = \frac{E_0}{3(1-2\nu_0)}$ | |
| ϕ | Angle de frottement |
| c | Cohésion |
| W_{irr} | Energie irréversible dissipée |

3.3. Conservation de la masse d'eau

$$\frac{\partial(\rho_e S_e \varphi)}{\partial t} + Div(\mathbf{M}_e) = 0 \quad (1)$$

où ρ_e est la masse volumique de l'eau, φ la porosité et \mathbf{M}_e le flux massique d'eau (voir écriture de Darcy) et S_e la saturation en eau (=1, sauf pour la variante 2 du test 2)

3.4. Conservation de la quantité de mouvement

$$Div\boldsymbol{\sigma} + \rho\mathbf{g} = 0 \quad (2)$$

Où $\boldsymbol{\sigma}$ est le tenseur des déformations totales de Cauchy (les compressions sont négatives), ρ la masse volumique homogénéisée et \mathbf{g} le champ des forces volumiques (la gravité).

ρ sera considérée comme constante et fournie en donnée.

On désignera par \mathbf{u} le champ de déplacement du squelette et le tenseur des déformations est :

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\nabla\mathbf{u} + \nabla^T\mathbf{u})$$

3.5. Comportement de l'eau

$$\frac{dp_e}{\rho_e} = \frac{dp_e}{K_e} \quad (3)$$

Où p_e est la pression d'eau (comptée positivement pour l'eau en compression) et K_e est l'incompressibilité de l'eau.

3.6. Loi de Darcy

$$\frac{\mathbf{M}_e}{\rho_e} = \frac{k(\varphi) * k_e^{rel}(S_e)}{\rho_e \mathbf{g}} (\nabla p_e - \rho_e \mathbf{g}) \quad (4)$$

$k(\varphi)$ est la perméabilité intrinsèque, qui est une constante (notée k_0) sauf dans les variantes 1 et 2 du test 2, la perméabilité relative $k_e^{rel}(S_e)$ vaut 1 sauf dans la variante 2 du test 2.

3.7. Evolution de la porosité

$$\varphi - \varphi_0 = b\varepsilon_V + \frac{S_e(b - \varphi)}{K_s} (p_e - p_e^0) \quad (5)$$

Où b est le coefficient de Biot, supposé constant (mais différent de 1), $\varepsilon_V = Trace(\boldsymbol{\varepsilon})$, et le module d'incompressibilité des grains K_s se calcule à partir du coefficient de Biot et du module d'incompressibilité drainé du squelette K_0 par :

$$b = 1 - \frac{K_0}{K_s} \quad (6)$$

Avec $K_0 = \frac{E_0}{3(1-2\nu_0)}$, E_0 et ν_0 module d'Young drainé et coefficient de Poisson drainé du squelette (données supposées constantes y compris en régime plastique).

S_e est la saturation en ea qui vaut 1 sauf dans e cas test 2.3

3.8. Loi de comportement mécanique.

On fait l'hypothèse des contraintes effectives et on écrit :

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' - bp_e \mathbf{I} \quad (7)$$

Pour le cas 2.3, (7) devient :

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' - b\boldsymbol{\pi} \quad (8)$$

Avec :

$$\boldsymbol{\pi} = S_e p_e - \frac{2}{3} \int_s^1 p_c(\tau) d\tau \quad (9)$$

$\boldsymbol{\sigma}'$ est le tenseur des contraintes effectives, qui ne dépend que de $\boldsymbol{\varepsilon}$ et son histoire.

On adopte les notations :

$$\mathbf{s} = \boldsymbol{\sigma}' - \frac{Tr(\boldsymbol{\sigma}')}{3} \mathbf{I}$$

$$I_1 = Tr(\boldsymbol{\sigma}')$$

$$s_{II} = \sqrt{\mathbf{s} \cdot \mathbf{s}}$$

$$\mathbf{e} = \boldsymbol{\varepsilon} - \frac{Tr(\boldsymbol{\varepsilon})}{3} \mathbf{I}$$

$$\varepsilon_v = Tr(\boldsymbol{\varepsilon})$$

On note $\boldsymbol{\varepsilon}^p$ le tenseur des déformations plastiques, \mathbf{e}^p son déviateur, ε_v^p sa trace. On définit la déformation plastique cumulée de cisaillement :

$$\delta\gamma^p = \sqrt{d\mathbf{e}^p \cdot d\mathbf{e}^p} \quad (10)$$

Le modèle est un modèle de plasticité associé.

$$d\mathbf{s} = 2\mu_0 (d\mathbf{e} - d\mathbf{e}^p) \quad (11)$$

$$dI_1 = 3K_0 (d\varepsilon_v - d\varepsilon_v^p) \quad (12)$$

$$\text{Avec } 2\mu_0 = \frac{E_0}{1+\nu_0}$$

On définit une fonction de charge $F(\boldsymbol{\sigma}, A)$ où A est la force thermodynamique associée à la variable d'érouissage scalaire ξ .

Nous noterons ψ_c la fonction indicatrice du convexe défini par $F(\boldsymbol{\sigma}, A) \leq 0$:

$$\psi_c(\boldsymbol{\sigma}, A) = \begin{cases} 0 & \text{si } F(\boldsymbol{\sigma}, A) \leq 0 \\ \infty & \text{sinon} \end{cases}$$

L'évolution des déformations plastiques et de la variable d'érouissage sont données par :

$$\begin{cases} F \leq 0 \\ (d\boldsymbol{\varepsilon}^p, d\xi) \in \partial\psi_c \end{cases} \quad (13)$$

Pour les points où $F(\boldsymbol{\sigma}, A)$ est différentiable, on a :

$$d\boldsymbol{\varepsilon}^p = d\lambda \frac{\partial F(\boldsymbol{\sigma}', \xi)}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} \quad ; \quad d\lambda \geq 0 \quad ; \quad d\lambda \cdot F = 0 \quad (14)$$

On considère un critère de type Drucker Prager et on prend comme variable d'érouissage $\xi = \gamma^p$

$$F = \sqrt{\frac{3}{2}} s_{II} + \frac{2 \sin \phi}{3 - \sin \phi} I_1 - \frac{6cf(\gamma^p) \cos \phi}{3 - \sin \phi} \quad (15)$$

La fonction $f(\gamma^p)$ est donnée par

$$\begin{cases} 0 < \gamma^p < \gamma_R^p & f(\gamma^p) = \left(1 - (1 - \alpha) \frac{\gamma^p}{\gamma_R^p}\right)^2 \\ \gamma^p \geq \gamma_R^p & f(\gamma^p) = \alpha^2 \end{cases} \quad (16)$$

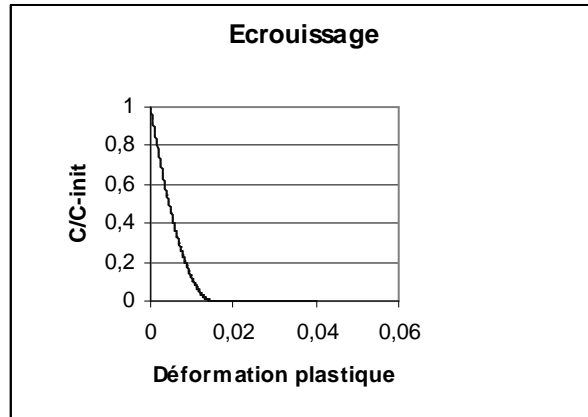


Figure 1
Evolution de la cohésion avec la déformation plastique

Les coefficients c , ϕ , γ_R^p et α sont donnés.

3.9. Formulations non locales

Pour les cas tests 2.6 et 2.7, il est demandé d'utiliser une version non locale de la loi de comportement. Nous entendons par là une formulation qui évite la localisation des déformations sur une seule couche d'éléments et qui permette d'obtenir des résultats convergents par rapport au pas d'espace. Etant donné que ces formulations sont encore très largement du domaine de la recherche, nous n'en imposons pas une, et nous nous contentons de préciser les contraintes que devront respecter les formulations adoptées.

On considère que le modèle local, Equations 10 à 16 représente le comportement d'un échantillon pour un essai au cours duquel l'état de déformation resterait homogène dans tout l'échantillon.

Les formulations non locales ont nécessairement besoin d'une donnée supplémentaire, plus ou moins liée à une notion de longueur caractéristique, et de largeur de bande de localisation.

On choisit de fournir comme donnée supplémentaire l'énergie irréversible dissipée jusqu'à rupture dans un essai de compression simple conduit de telle façon qu'une seule bande de localisation apparaisse. On note W_{irr} cette quantité. On indique ici comment on l'a estimée, mais les participants sont libres de l'interpréter selon leur modèle.

L'interprétation proposée consiste à supposer que la bande de localisation a une largeur L_c , que toute la déformation plastique y est concentrée, et que la déformation plastique est constante dans cette bande. On note t_r le « temps à rupture », c'est à dire le temps au bout duquel la déformation plastique cumulée γ^p atteint la valeur γ_R^p pour tous les points de la bande de localisation et on calcule W_{irr} par :

$$W_{irr} = L_c \int_0^{t_r} \boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p$$

Tous calculs faits, on trouve :

$$W_{irr} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{6c \cdot \cos \phi}{3 - \sin \phi} L_c \int_0^{\gamma_R^p} \left(1 - (1 - \alpha) \frac{\gamma^p}{\gamma_R^p} \right)^2 d\gamma^p = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{6c \cdot \cos \phi}{3 - \sin \phi} L_c \frac{\gamma_R^p}{3} (1 + \alpha + \alpha^2)$$

4. Les cas tests

4.1. Cas tests OD : essais triaxiaux

4.1.1. Géométrie

Ce sont des cas tests OD

4.1.2. Conditions initiales

Contraintes initiales totales : $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = -P_{confinement}$

Pression initiale d'eau nulle : $p_e = 0$

4.1.3. Chargement

Contraintes latérales totales imposées

$\sigma_2 = \sigma_3 = -P_{confinement}$

Déformation dans la direction 1 ε_1 imposée (provoquant une augmentation de la compression) et correspondant à une déformation dans la direction 1 variant de 0 à -0.2

Aucun flux hydraulique

Quatre niveaux de confinement $P_{confinement}$:

1Mpa, 5Mpa, 10 Mpa, 15 Mpa

Etant donné que le coefficient de Biot ne vaut pas 1 et que de plus l'eau a une compressibilité, la condition non drainée n'est pas équivalente à une variation de volume nulle.

4.1.4. Résultats

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

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

Afin de comparer les résultats, les tableaux Excel correspondants devront être fournis.

4.2. Cas test 1D

Il s'agit d'une cavité cylindrique non revêtue en massif infini avec un état de contrainte initial isotrope

4.2.1. Géométrie

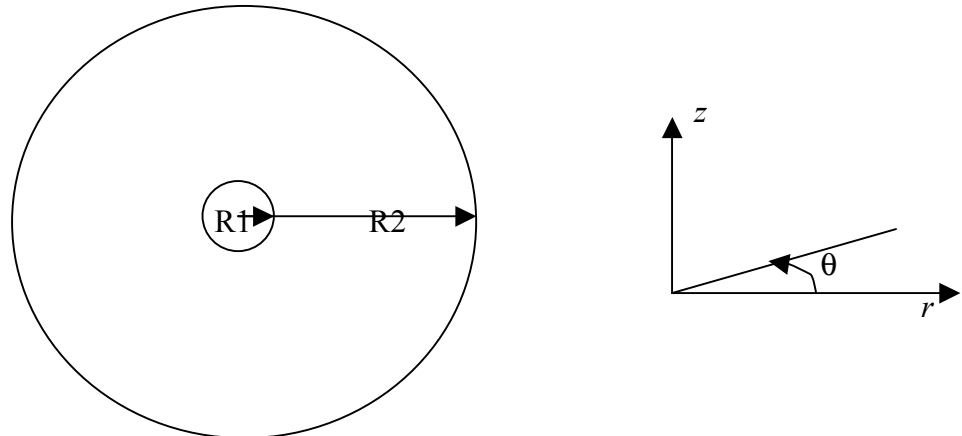


Figure 2

$$R1 = 3\text{m}$$

$$R2 = 20\text{m}$$

4.2.2. Conditions initiales

En contrainte effective

$$\sigma'_{rr} = \sigma'_{\theta\theta} = \sigma'_{zz} = -7,74\text{Mpa}$$

$$p_e = 4,7\text{Mpa}$$

4.2.3. Conditions aux limites et chargement

La déformation selon z est nulle. La solution est indépendante de θ et z

$$\text{En R1 : } \begin{cases} 0 \leq t \leq T \\ \sigma_{rr} = \sigma'_{rr} - bp_e = -11,5 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \\ p_e = 4,7 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \\ t > T \\ \sigma_{rr} = p_e = 0 \end{cases}$$

$$\text{En R2 : } \begin{cases} \sigma_{rr} = -11,5\text{Mpa} \\ p_e = 4,7\text{Mpa} \end{cases}$$

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

$$\text{Temps de simulation : } 300 * 10^6 \text{ s} \approx 9.5 \text{ ans}$$

Dans ce cas test la pesanteur n'est pas prise en compte.

Le milieu complètement saturé. Les pressions d'eau peuvent être négatives.

4.2.4. Etude théorique

Les participants qui le souhaitent pourront faire une étude théorique de ce problème, notamment sur les points suivants :

Existence et unicité de la solution, existence possible de bifurcations.

Régularité de la solution, localisation des déformations.

Les contributions à cette étude seront diffusées et publiées au même titre que les résultats de calcul. Elles pourront être récompensées par le prix évoqué au paragraphe 2.2

4.2.5. Cas 1.1 Perméabilité constante

La perméabilité est constante.

4.2.6. Cas 1.2 Perméabilité variable

La perméabilité dépend de la porosité selon la loi :

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

4.2.7. Résultats de calcul

On fournira des courbes donnant :

- 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

Ces quantités seront fournies aux instants :

1.5*106s, 50*106s et 300*106s

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.

Afin de comparer les résultats, les tableaux Excel correspondants devront être fournis.

4.3. Cas test 2D

Il s'agit d'une cavité cylindrique non revêtue en massif infini avec un état de contrainte initial anisotrope.

4.3.1. Géométrie

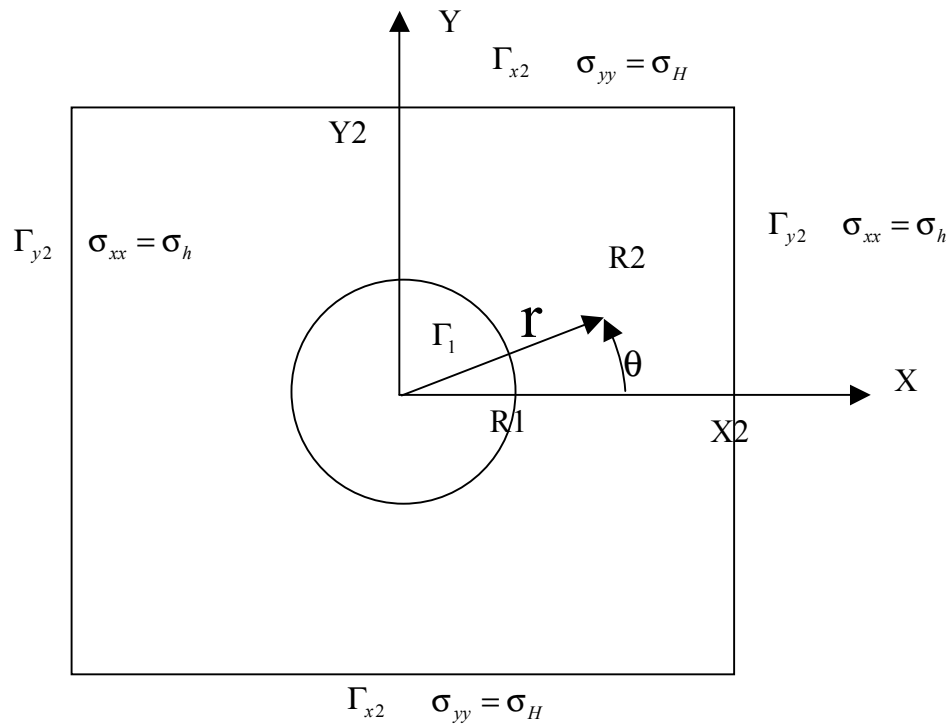


Figure 3

Il s'agit d'un domaine plan limité par un cercle de rayon R1, noté Γ_1 , deux segments $x = \pm X_2$ dont l'union est notée Γ_{x2} et deux segments $y = \pm Y_2$ dont l'union est notée Γ_{y2} .

$R1 = 3m$

$X2 = Y2 = 60m$

Les participants sont libres d'exploiter ou non les symétries du problème.

4.3.2. Conditions initiales

Contraintes effectives

$$\sigma'_{zz} = -7.24 MPa, \quad \sigma'_{xx} = -7.24 MPa, \quad \sigma'_{yy} = -11.64 MPa$$

$$p_e = 4.7 MPa$$

4.3.3. Conditions aux limites et chargement

On se met dans des conditions de déformations planes par rapport à la direction z.

Sur la frontière extérieure les contraintes totales et la pression sont maintenues égales aux conditions initiales :

$$\text{Sur } \Gamma_{x2} \begin{cases} \sigma_{xx} = \sigma_h = -11 MPa \\ p_e = 4.7 MPa \end{cases}$$

$$\text{Sur } \Gamma_{y2} \begin{cases} \sigma_{yy} = \sigma_H = -15.4 MPa \\ p_e = 4.7 MPa \end{cases}$$

Les conditions mécaniques sur Γ_1 sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq t \leq T \\ t > T \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{rr} = (\sigma_h * \cos^2 \theta + \sigma_H * \sin^2 \theta) * \left(1 - \frac{t}{T}\right) = (-11 * \cos^2 \theta - 15.4 * \sin^2 \theta) * \left(1 - \frac{t}{T}\right) \\ \sigma_{r\theta} = (\sigma_H - \sigma_h) \cos \theta * \sin \theta * \left(1 - \frac{t}{T}\right) = -4.4 * \cos \theta * \sin \theta * \left(1 - \frac{t}{T}\right) \\ \sigma_{rr} = 0 \\ \sigma_{r\theta} = 0 \end{array} \right.$$

Les conditions hydrauliques sur Γ_1 sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq t \leq T \\ t > T \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} p_e = 4,7 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \\ p_e = 0 \end{array} \right.$$

sauf pour le cas 2.3 où elles sont de type suintement .

Dans ce cas test la pesanteur n'est pas prise en compte.

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

$$\text{Temps de simulation : } 300 * 10^6 s \approx 9.5 \text{ ans}$$

4.3.4. Cas 2.1 : plasticité parfaite

La perméabilité est constante et le milieu complètement saturé. Les pressions d'eau peuvent être négatives.

De plus, et afin de vérifier que les codes utilisés donnent des résultats cohérents sur un problème a priori sans difficulté, ce premier sera traité sans prendre en compte l'écrouissage.

L'équation (16) sera donc remplacée par : $f(\gamma^p) = 1$

4.3.5. Cas 2.2 : Plasticité parfaite perméabilité variable

La perméabilité dépend de la porosité selon la loi :

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

Le milieu est complètement saturé. Les pressions d'eau peuvent être négatives.

L'écrouissage n'est pas pris en compte. L'équation (16) est donc remplacée par $f(\gamma^p) = 1$

4.3.6. Cas test 2.3 : non saturé

La perméabilité dépend de la porosité selon la loi :

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

L'écroûissage n'est pas pris en compte. L'équation (16) est donc remplacée par $f(\gamma^p) = 1$

Le milieu est partiellement saturé. Dans ce cas, on fera une hypothèse de Richards, on prendra pour pression capillaire $p_c = -p_e$; $p_g = 0$

Le courbe de sorption est :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } p_c > 0 \\ \quad S_e(p_c) = \left(1 + \left(\frac{p_c}{A} \right)^{\frac{1}{1-B}} \right)^{-B} \\ \text{si } p_c \leq 0 \\ \quad S_e(p_c) = 1 \end{array} \right. \text{ avec } A = 10 * 10^6 \quad B = 0.412$$

La perméabilité relative est donnée par :

$$k_e^{rel}(S_e) = \left(1 + (S_e^{-2.429} - 1)^{1.1760} \right)^{-1}$$

La condition hydraulique en R1 sera alors une condition dite de suintement :

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

4.3.7. Cas 2.4 adoucissant local

La perméabilité est constante et le milieu complètement saturé. Les pressions d'eau peuvent être négatives.

L'écroûissage est pris en compte.

Ce calcul sera fait avec deux maillages pour lesquels on impose une contrainte de taille d'élément au niveau de la cavité :

- Maillage M1 : la distance radiale entre le bord de la cavité et la première couche de nœuds intérieurs au domaine sera de 0,15m. Cette valeur est celle qui permet d'obtenir une erreur inférieure à 1% pour un test de déconfinement en milieu élastique avec état de contrainte initial isotrope.
- Maillage M2 : localement 10 fois plus fin : la distance radiale entre le bord de la cavité et la première couche de nœuds intérieurs au domaine sera de 0,015m.

Pour ce cas et pour tous les cas avec écroûissage en formulation locale, il est demandé aux participants de fournir si possible les valeurs d'un indicateur de localisation, par exemple celui du tenseur acoustique :

H étant l'opérateur tangent en vitesse au sens $\dot{\sigma} = H\dot{\epsilon}$, il y a bifurcation possible, si en au moins un point de la structure il existe une direction caractérisée par un vecteur unitaire N tel que

$\det(N.H.N) \leq 0$. où $N.H.N$ est le tenseur acoustique, tenseur d'ordre 2 dont les composantes sont :

$$N_j.H_{ijkl}.N_l$$

Les participants indiqueront à quel instant et en quel point de la structure apparaît la première indication de ce type.

4.3.8. Cas 2.5 adoucissant local perméabilité variable

La perméabilité dépend de la porosité selon la loi :

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

Le milieu complètement saturé. Les pressions d'eau peuvent être négatives.

L'écrouissage est pris en compte..

Pour ce cas, il est demandé aux participants de fournir si possible les valeurs d'un indicateur de localisation,

4.3.9. Cas 2.6 Non local mécanique

Il s'agit d'un calcul en situation drainée. Les écoulements ne sont pas calculés, seule subsiste l'équation (2).

Les contraintes effectives et totales sont confondues, la pression d'eau étant considérée comme nulle. Seules les conditions aux limites mécaniques subsistent et peuvent s'écrire sous la forme :

$$\sigma_{rr} = \Lambda(\sigma_h * \cos^2 \theta + \sigma_H * \sin^2 \theta) = \Lambda(-11 * \cos^2 \theta - 15.4 * \sin^2 \theta)$$

$$\sigma_{r\theta} = \Lambda(\sigma_H - \sigma_h) \cos \theta * \sin \theta = \Lambda(-4.4 * \cos \theta * \sin \theta)$$

Où Λ est un facteur de chargement compris entre 0 et 1, mais dont la dépendance par rapport au temps n'est pas forcément monotone. Les résultats devront être exprimés en fonction de ce facteur de chargement et non plus en fonction du temps.

Pour ce cas test, les participants devront utiliser une formulation non locale de la loi de comportement proposée, selon les spécifications du paragraphe 3.9

4.3.10. Cas 2.7 Non local couplé

La perméabilité est constante et le milieu complètement saturé. Les pressions d'eau peuvent être négatives. L'écrouissage est pris en compte.

Pour ce cas test, les participants devront utiliser une formulation non locale de la loi de comportement proposée, selon les spécifications du paragraphe 3.9

4.3.11. Résultats

On fournira des courbes selon trois rayons d'équation $Y=0$, $X=Y$ et $X=0$. Selon chacun de ces rayons on portera :

Pour tous les cas:

- Les déplacements selon X et Y fonction de r
- Les contraintes effectives σ'_{rr} , $\sigma'_{\theta\theta}$, σ'_{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 tous les cas avec hydraulique

- La pression d'eau fonction du rayon

Pour le cas 2.3 :

- La saturation en eau fonction du rayon

Pour tous les cas adoucissants :

- La frontière de la zone plastique
- L'isovaleur $\gamma^p = \gamma_R^p$

Ces quantités seront fournies aux instants :

1.5*10⁶s, 50*10⁶s et 300*10⁶s

Pour le cas 2.6, cette liste d'instant sera remplacée par une liste de facteurs de chargement Λ :

1, 0.7, 0.5, 0.2, 0.

Les valeurs de r en abscisse seront :

3, 3.05, 3.2, 3.55, 3.7, 5, 10 m.

Afin de comparer les résultats, les tableaux Excel correspondants devront être fournis.

4.3.12. Convergence par rapport au pas de temps et d'espace

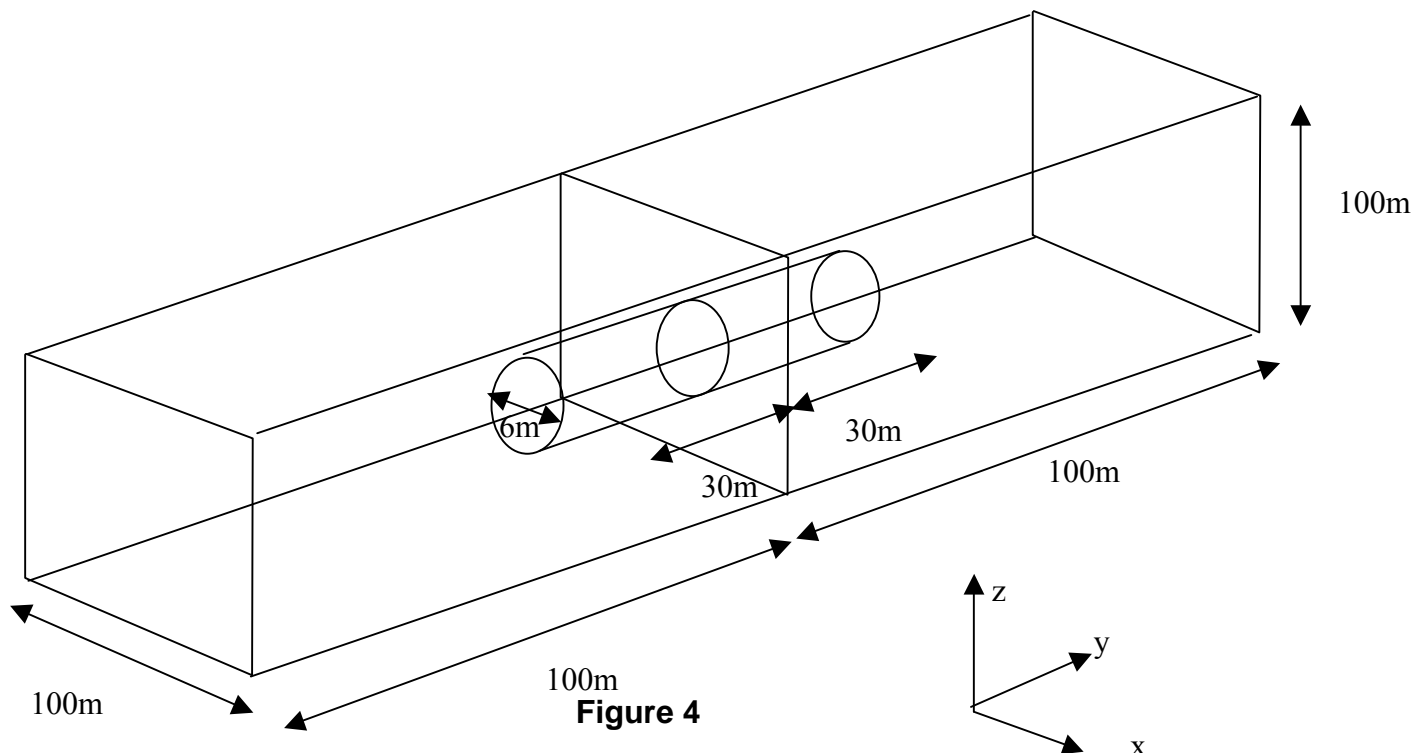
Il est demandé de fournir une étude sur la dépendance des résultats par rapport au pas d'espace et de temps pour le cas 2.1. On montrera cette dépendance à 5*10⁶s, pour σ'_{rr} , $\sigma'_{\theta\theta}$, σ'_{zz} à r=3.2m.

4.4. Test 3D

4.4.1. Géométrie

Il s'agit d'une galerie cylindrique, de section circulaire située dans un massif dont on représente une portion parallélépipédique. Afin de les préciser sans ambiguïté, on suppose que la verticale correspond à l'axe des z et que le centre de la galerie coïncide avec l'origine des coordonnées, x=y=z=0.

Le rayon de la galerie est de 3m, le massif a une hauteur de 100m selon l'axe oz, une largeur de 100m selon l'axe ox et une longueur de 20m selon l'axe oy. On simule un creusement qui parallèlement à l'axe des y, de façon symétrique par rapport au plan y=0, sur une longueur de 30m par rapport à ce plan.



Les participants sont libres d'exploiter ou non les symétries du problème.

4.4.2. Conditions initiales

Les conditions initiales correspondent à un état de contrainte et de pression d'eau hydrostatique.

L'état initial est alors :

En contraintes totales

$$\sigma_{zz} = -11 \text{ MPa} + \rho g z = -11 + 2.4525 * 10^{-2} z$$

$$\sigma_{yy} = -11 \text{ MPa} + \rho g z = -11 + 2.4525 * 10^{-2} z$$

$$\sigma_{xx} = 1.4 * (-11 \text{ MPa} + \rho g z) = -15.4 + 3.4335 * 10^{-2} z$$

$$p_e = 4.7 \text{ MPa} - \rho_e g z = 4.7 \text{ MPa} - 0.981 * 10^{-2} z$$

Où ρ désigne le poids la masse volumique de la roche mouillée et ρ_e la masse volumique de l'eau

En contraintes effectives

$$\sigma'_{zz} = \sigma_{zz} + b * p_e = -7.24 \text{ MPa} + 1.6677 * 10^{-2} * z$$

$$\sigma'_{yy} = \sigma_{yy} + b * p_e = -7.24 \text{ MPa} + 1.6677 * 10^{-2} * z,$$

$$\sigma'_{xx} = \sigma_{xx} + b * p_e = -11.64 \text{ MPa} + 2.6487 * 10^{-2} * z$$

$$p_e = 4.7 \text{ MPa} - \rho_e g z = 4.7 \text{ MPa} - 0.981 * 10^{-2} z$$

4.4.3. Conditions aux limites et chargement

Plans $x=\pm 50$

$$\sigma_{xx} = -15.4 + 3.4335 * 10^{-2} z$$

$$p_e = 4.7 \text{ MPa} - 0.981 * 10^{-2} z$$

Plan $y=\pm 100$

$$\sigma_{yy} = -11 + 2.4525 * 10^{-2} z$$

$$p_e = 4.7 \text{ MPa} - 0.981 * 10^{-2} z$$

Plan $z=50$

$$\sigma_{zz} = -9.77375 \text{ MPa}$$

$$p_e = 4.2095 \text{ MPa}$$

Plan $z=-50$

Déplacements selon z nuls : $u_z = 0$

Flux hydraulique nul : $\frac{\partial p_e}{\partial z} = 0$

On simule le creusement de la galerie sur 30m de par et d'autre du plan $y=0$ par tranches de 3m, chaque tranche se creusant en 1 jour. Le creusement d'une tranche est simulé en faisant décroître les contraintes totales et la pression d'eau linéairement en fonction du temps, jusqu'à 0 au bout de 1 jour.

On simule l'ouvrage pendant 1 an.

Dans ce cas test la pesanteur est prise en compte.

4.4.4. Résultats

On fournira des courbes selon trois rayons d'équation $Z=0$, $X=Z$ et $X=0$ et dans les plans $y=\text{constante}$. Afin de faciliter le dépouillement, chaque ligne sera repérée par les noms suivants :

| Plan | Ligne | Equation | Ligne | Equation | Ligne | Equation |
|------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|
| Y=0 | L1 | Z=0 | L2 | X=Z | L3 | X=0 |
| Y=3 | L4 | Z=0 | L5 | X=Z | 6L | X=0 |
| Y=6 | L7 | Z=0 | L8 | X=Z | L9 | X=0 |
| Y=9 | L10 | Z=0 | L11 | X=Z | L12 | X=0 |
| Y=12 | L13 | Z=0 | L14 | X=Z | L15 | X=0 |
| Y=15 | L16 | Z=0 | L17 | X=Z | L18 | X=0 |
| Y=18 | L19 | Z=0 | L20 | X=Z | L21 | X=0 |
| Y=21 | L22 | Z=0 | L23 | X=Z | L24 | X=0 |
| Y=24 | L25 | Z=0 | L26 | X=Z | L27 | X=0 |
| Y=27 | L28 | Z=0 | L29 | X=Z | L30 | X=0 |
| Y=30 | L31 | Z=0 | L32 | X=Z | L33 | X=0 |
| Y=33 | L34 | Z=0 | L35 | X=Z | L36 | X=0 |
| Y=36 | L37 | Z=0 | L38 | X=Z | L39 | X=0 |
| Y=40 | L40 | Z=0 | L41 | X=Z | L42 | X=0 |
| Y=50 | L43 | Z=0 | L44 | X=Z | L45 | X=0 |
| Y=80 | L46 | Z=0 | L47 | X=Z | L48 | X=0 |

On appelle s l'abscisse curviligne le long de chacune ligne, supposée nulle en $X=Z=0$.

Sur chacune de ces lignes on portera :

Pour la modélisation de base :

- Les déplacements selon X,Y et Z fonction de s
- Les contraintes effectives $\sigma'_{xx}, \sigma'_{yy}, \sigma'_{zz}, \sigma'_{xy}, \sigma'_{xz}, \sigma'_{yz}$ fonctions de s
- La pression interstitielle p_e fonction de s
- La déformation plastique cumulée de cisaillement γ^p en fonction de s
- La déformation plastique cumulée volumique ε_v^p en fonction de s

Ces quantités seront fournies aux instants :

1j, 2j, 3j, 4j, 5j, 6j, 7j, 8j, 9j, 10j, 15j, 30j, 60j, 90j, 120j, 150j, 180j, 210j, 240j, 270j, 300j, 330j, 360j

Les valeurs de s en abscisse seront :

0., 1., 2., 3, 3.05, 3.2, 3.2, 3.55, 3.7, 5, 10 m.

Afin de comparer les résultats, les tableaux Excel correspondants devront être fournis.

4.5. Valeurs des coefficients

On indique ici les coefficients en précisant dans quels cas tests ils sont utilisés.

| | Nom | Valeur | Tria xiaux | 1.1 | 1.2 | 2.1 | 2.2 | 2.3 | 2.4 | 2.5 | 2.6 | 2.7 | 3 |
|--------------|----------------------------------|---|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|
| φ_0 | Porosité initiale | 0.15 | X | X | X | X | X | X | X | X | | X | X |
| b | Coefficient de Biot | 0.8 | X | X | X | X | X | X | X | X | | X | v |
| E_0 | Module d'Young drainé | 5800 Mpa | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| ν_0 | Coefficient de Poisson drainé | 0.3 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| K_e | Incompressibilité de l'eau | 2000 Mpa | X | X | X | X | X | X | X | X | | X | X |
| k_0 | Perméabilité | $10^{-12} m/s$ | X | X | X | X | X | X | X | X | | X | X |
| $k(\varphi)$ | Variation perméabilité | $\begin{cases} \text{Si } \varphi - \varphi_0 < 0 \\ \quad k(\varphi) = k_0 \\ \text{Si } 0 < \varphi - \varphi_0 < 10^{-2} \\ \quad \frac{k(\varphi)}{k_0} = 1 + 2 \cdot 10^{12} (\varphi - \varphi_0)^3 \\ \text{Si } 10^{-2} < \varphi - \varphi_0 \\ \quad k(\varphi) = k_0 (1 + 2 \cdot 10^6) \end{cases}$ | | | X | | X | X | | X | | | |
| $S_e(p_c)$ | Courbe de sorption | $\begin{aligned} & \text{si } p_c > 0 \\ & S_e(p_c) = \left(1 + \left(\frac{p_c}{A} \right)^B \right)^{-1} \\ & \text{si } p_c \leq 0 \quad S_e(p_c) = 1 \\ & A = 10 \cdot 10^6 \\ & B = 0.412 \end{aligned}$ | | | | | | X | | | | | |
| k_e^{rel} | Perméabilité relative au liquide | $k_e^{rel}(S_e) = \left(1 + (S_e^{-2.429} - 1)^{1.1760} \right)^{-1}$ | | | | | | X | | | | | |
| c | Cohésion | 1 MPA | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| ϕ | Angle de frottement | 25° | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| α | | 0.01 | X | X | X | | | | X | X | X | X | X |
| γ_R^p | | 0.015 | X | X | X | | | | X | X | X | X | X |
| W_{irr} | Energie à rupture | 870J | | | | | | | | | X | X | |
| h (M1) | Taille de maille | 0,15 | | | | | | | X | | | | |
| h (M2) | Taille de maille | 0,015 | | | | | | | X | | | | |
| ρ_e | Masse volumique de l'eau | 1000 kg/M3 | X | X | X | X | X | X | X | X | | X | X |
| ρ | Masse volumique du sol mouillé | 2500 kg/M3 | | | | | | | | | | | X |
| g | Accélération de la pesanteur | $9,81m/s^2$ | | | | | | | | | | | X |

5. Contenu et forme des résultats

Les participants fournissent les résultats sous forme de courbes et de tableaux Excel comme indiqué dans chacun des cas tests.

Les participants fournissent un document décrivant les méthodes numériques utilisées :

- discrétisation spatiale (éventuellement adaptation de maillage),
- discrétisation temporelle (éventuellement calcul automatique du pas de temps),
- méthode de couplage des équations : système assemblé totalement couplé, méthode itérative ...
- méthode de résolution des systèmes non linéaires : calculs et réactualisation des opérateurs tangents, stratégie de découpage ou redécoupage des pas de temps, méthodes d'accélération de convergence. Ils fournissent les valeurs numériques attenantes à ces stratégies, notamment les critères de convergence (forme mathématique et tolérance utilisée),
- méthode de résolution des systèmes linéaires,
- pour le test 3 les participants décrivent la méthode de simulation de l'avancée du tunnel.

Les participants fournissent des indications sur le comportement de leurs algorithmes sur les tests du benchmark : nombre de pas de temps, nombre d'itération par pas de temps.

Les participants donnent des indications sur les temps de calcul : machine utilisée, temps CPU total, taille mémoire nécessaire.

6. Résumé des cas tests

6.1. Les cas 1D

| | Nom du cas | Hypothèse Hydraulique | Loi de perméabilité | Loi de comportement mécanique | Maillage | Chargement |
|-----|------------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------------|----------|-----------------------|
| 1.1 | Perméabilité constante | Saturé | $k = k_0$ | $h < 0$ locale | libre | $\sigma.n(t); p_e(t)$ |
| 1.2 | Perméabilité variable | Saturé | $k(\varphi)$ | $h < 0$ locale | libre | $\sigma.n(t); p_e(t)$ |

6.2. Les cas 2D

| | Nom du cas | Hypothèse Hydraulique | Loi de perméabilité | Loi de comportement mécanique | Maillage | Chargement |
|-----|---|-----------------------|---------------------|-------------------------------|----------|------------------------------|
| 2.1 | Plasticité parfaite | Saturé | $k = k_0$ | P P | libre | $\sigma.n(t); p_e(t)$ |
| 2.2 | Plasticité parfaite perméabilité variable | Saturé | $k(\varphi)$ | P P | libre | $\sigma.n(t); p_e(t)$ |
| 2.3 | Non saturé | Non saturé | $k(\varphi)$ | P.P. | libre | $\sigma.n(t);$ suintement |
| 2.4 | Adoucissant local | Saturé | $k = k_0$ | $h < 0$ locale | M1 M2 | $\sigma.n(t); p_e(t)$ |
| 2.5 | Adoucissant local perméabilité variable | Saturé | $k(\varphi)$ | $h < 0$ locale | libre | $\sigma.n(t); p_e(t)$ |
| 2.6 | Non local mécanique | Drainé | Drainé | $h < 0$ non locale | M1 | Déconfinement pilotage libre |
| 2.7 | Non local couplé | Saturé | $k = k_0$ | $h < 0$ non locale | M1 | $\sigma.n(t); p_e(t)$ |

6.3. Le cas 3D

| | Nom du cas | Hypothèse Hydraulique | Loi de perméabilité | Loi de comportement mécanique | Maillage | Chargement |
|---|------------|-----------------------|---------------------|-------------------------------|----------|------------------------------------|
| 3 | 3D | Saturé | $k = k_0$ | $h < 0$ locale | libre | pesanteur $\sigma.n(t); p_e(t)$ |