

# Simulation d'excavation en comportement hydro mécanique fragile Modèles et tests

<b>1. DESCRIPTION DES MODELES .....</b>	<b>2</b>
1.1. HYPOTHESES GENERALES.....	2
1.2. NOTATIONS .....	2
1.3. CONSERVATION DE LA MASSE D'EAU .....	3
1.4. CONSERVATION DE LA QUANTITE DE MOUVEMENT.....	3
1.5. COMPORTEMENT DE L'EAU.....	3
1.6. LOI DE DARCY.....	3
1.7. EVOLUTION DE LA POROSITE .....	3
1.8. LOI DE COMPORTEMENT MECANIQUE.....	4
<b>2. LES CAS TESTS.....</b>	<b>5</b>
2.1. CAS TESTS OD : ESSAIS TRIAXIAUX.....	5
2.1.1. <i>Géométrie</i> .....	5
2.1.2. <i>Conditions initiales</i> .....	6
2.1.3. <i>Chargement</i> .....	6
2.1.4. <i>Résultats</i> .....	6
2.2. CAS TEST 1D .....	6
2.2.1. <i>Géométrie</i> .....	6
2.2.2. <i>Conditions initiales</i> .....	6
2.2.3. <i>Conditions aux limites et chargement</i> .....	7
2.2.4. <i>Etude théorique</i> .....	7
2.2.5. <i>Résultats de calcul</i> .....	7
2.3. CAS TEST 2D .....	7
2.3.1. <i>Géométrie</i> .....	8
2.3.2. <i>Conditions initiales</i> .....	8
2.3.3. <i>Conditions aux limites et chargement</i> .....	8
2.3.4. <i>Modélisation de base en plasticité parfaite</i> .....	9
2.3.5. <i>Variante 1</i> .....	9
2.3.6. <i>Variante 2</i> .....	9
2.3.7. <i>Résultats</i> .....	10
2.3.8. <i>Convergence par rapport au pas de temps et d'espace</i> .....	10
2.4. TEST 3D .....	11
2.4.1. <i>Géométrie</i> .....	11
2.4.2. <i>Conditions initiales</i> .....	11
2.4.3. <i>Conditions aux limites et chargement</i> .....	12
2.4.4. <i>Résultats</i> .....	12
2.5. VALEURS DES COEFFICIENTS .....	13

## 1. Description des modèles

### 1.1. 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 variante 2 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 le Test 2 variantes 1 et 2,
- 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 la première variante du cas test 2D qui est un cas de plasticité parfaite.

### 1.2. 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
$\rho_e$	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:
$\varphi$	porosité
$\boldsymbol{\sigma}$	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
$\rho$	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
$\nu_0$	coefficient de Poisson du squelette
$2\mu_0 = \frac{E_0}{1+\nu_0}$	
$K_0 = \frac{E_0}{3(1-2\nu_0)}$	
$\phi$	Angle de frottement
$c$	Cohésion

### 1.3. Conservation de la masse d'eau

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

où  $\rho_e$  est la masse volumique de l'eau,  $\varphi$  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)

### 1.4. 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),  $\rho$  la masse volumique homogénéisée et  $\mathbf{g}$  le champ des forces volumiques (la gravité).

$\rho$  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 :

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

### 1.5. Comportement de l'eau

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

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

### 1.6. Loi de Darcy

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

$k(\varphi)$  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.

### 1.7. Evolution de la porosité

$$d\varphi = (b - \varphi) \left( d\varepsilon_V + \frac{dp_e}{K_s} \right) \quad (5)$$

Où  $b$  est le coefficient de Biot, supposé constant (mais différent de 1),  $\varepsilon_v = \text{Trace}(\boldsymbol{\varepsilon})$ , 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  $\nu_0$  module d'Young drainé et coefficient de Poisson drainé du squelette (données supposées constantes y compris en régime plastique).

Pour la variante 2 du test 2, :

$$d\varphi = (b - \varphi) \left( d\varepsilon_v + \frac{S_e dp_e}{K_s} \right) \quad (7)$$

### 1.8. Loi de comportement mécanique.

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

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' - b p_e \mathbf{I} \quad (8)$$

Pour la variante 2 du test 2, (8) devient :

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' - b S_e p_e \mathbf{I} \quad (9)$$

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

On adopte les notations :

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

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

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

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

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

On note  $\boldsymbol{\varepsilon}^p$  le tenseur des déformations plastiques,  $\mathbf{e}^p$  son déviateur,  $\varepsilon_v^p$  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'écrouissage scalaire  $\xi$ .

Nous noterons  $\psi_c$  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'écrouissage 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 :

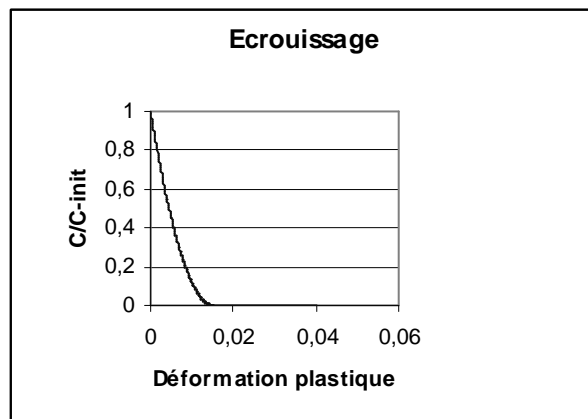
$$d\boldsymbol{\varepsilon}^p = d\lambda \frac{\partial F(\boldsymbol{\sigma}', \xi)}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} \quad ; \quad d\lambda \geq 0 \quad ; \quad d\lambda \cdot F = 0 \quad (14)$$

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

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

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  $c$ ,  $\phi$ ,  $\gamma_R^p$  et  $\alpha$  sont donnés.

## 2. Les cas tests

### 2.1. Cas tests OD : essais triaxiaux

#### 2.1.1. Géométrie

Ce sont des cas tests OD

### 2.1.2. Conditions initiales

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

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

### 2.1.3. Chargement

Contraintes latérales totales imposées

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

Déformation dans la direction 1  $\varepsilon_1$  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  $P_{\text{confinement}}$  :

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.

### 2.1.4. Résultats

Pour chaque niveau de confinement les courbes :

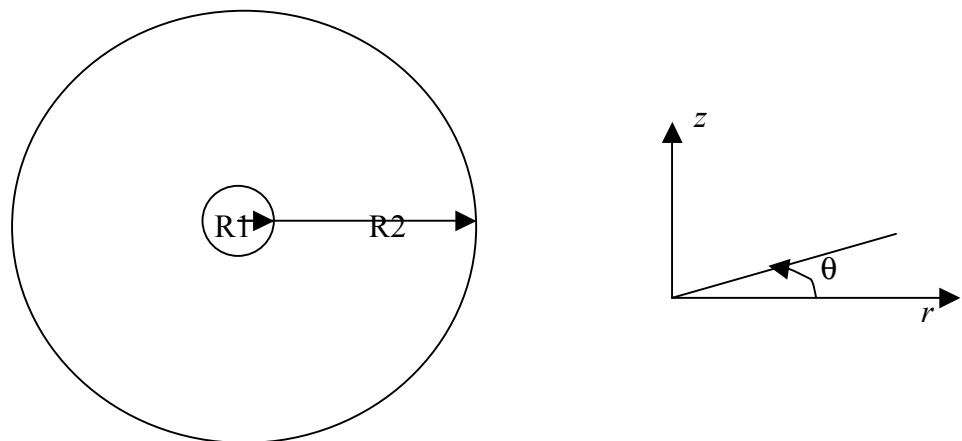
- $(\sigma_1 - \sigma_3)$  fonction de  $\varepsilon_1$
- pression d'eau  $p_e$  fonction de  $\varepsilon_1$
- déformation volumique totale  $\varepsilon_V$  fonction de  $\varepsilon_1$

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

## 2.2. Cas test 1D

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

### 2.2.1. Géométrie



**Figure 2**

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

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

### 2.2.2. Conditions initiales

En contrainte effective

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

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

### 2.2.3. Conditions aux limites et chargement

La déformation selon z est nulle. La solution est indépendante de  $\theta$  et z

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

$$\text{En R2 : } \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{rr} = -11,5 \text{ Mpa} \\ p_e = 4,7 \text{ Mpa} \end{array} \right.$$

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

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

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

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

### 2.2.4. 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 \$\$\$.

### 2.2.5. 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  $\gamma^p$  en fonction de r
- La déformation plastique cumulée volumique  $\varepsilon_v^p$  en fonction de r

Ces quantités seront fournies aux instants :

$$1.2 * 10^6 \text{ s}, 1.5 * 10^6 \text{ s}, 1.6 * 10^6 \text{ s}, 2.5 * 10^6 \text{ s}, 5 * 10^6 \text{ s}, 10 * 10^6 \text{ s}, 50 * 10^6 \text{ s}, 100 * 10^6 \text{ s}, 200 * 10^6 \text{ s}, 300 * 10^6 \text{ s}$$

Les valeurs de r en abscisse seront :

$$3, 3.05, 3.2, 3.2, 3.55, 3.7, 5, 10 \text{ m.}$$

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

## 2.3. Cas test 2D

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

## 2.3.1. Géométrie

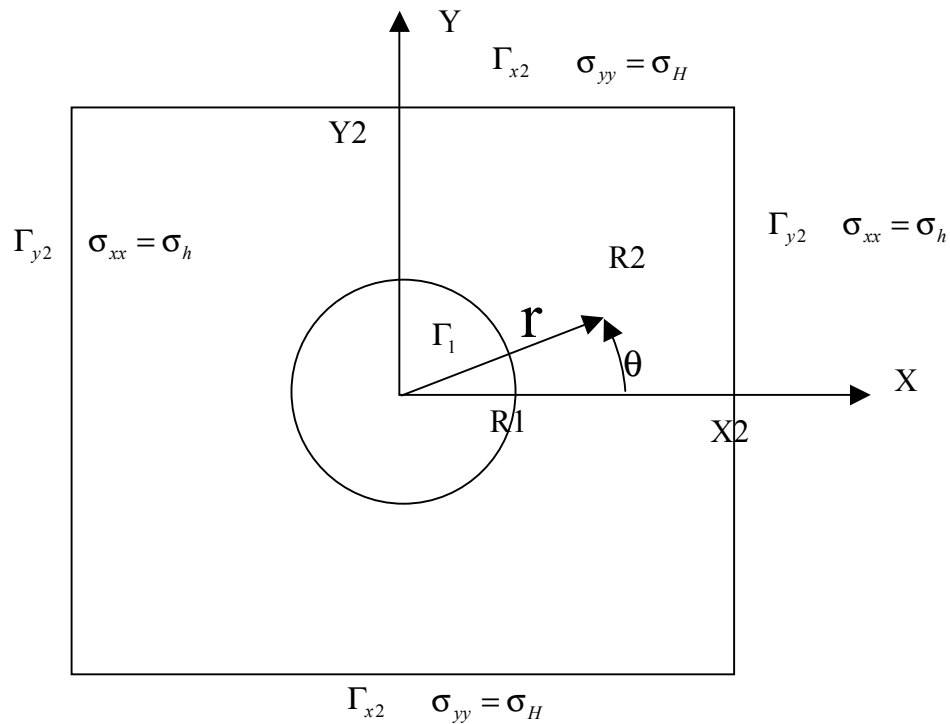


Figure 3

Il s'agit d'un domaine plan limité par un cercle de rayon  $R1$ , noté  $\Gamma_1$ , deux segments  $x = \pm X_2$  dont l'union est notée  $\Gamma_{x2}$  et deux segments  $y = \pm Y_2$  dont l'union est notée  $\Gamma_{y2}$ .

$R1 = 3\text{m}$

$X2 = Y2 = 60\text{m}$

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

## 2.3.2. Conditions initiales

Contraintes effectives

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

$$p_e = 4.7 \text{ MPa}$$

## 2.3.3. 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 :

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

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

Sur la frontière intérieure, on simule un déconfinement en 4 heures ( $T = 14400$ ).

Les conditions mécaniques sur  $\Gamma_1$  sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq t \leq T \\ t > T \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{rr} = (\sigma_h * \cos^2 \theta + \sigma_H * \sin^2 \theta) * \left(1 - \frac{t}{T}\right) = (-11.5 * \cos^2 \theta - 15.4 * \sin^2 \theta) * \left(1 - \frac{t}{T}\right) \\ \sigma_{r\theta} = (\sigma_H - \sigma_h) \cos \theta * \sin \theta * \left(1 - \frac{t}{T}\right) = -3.9 * \cos \theta * \sin \theta * \left(1 - \frac{t}{T}\right) \\ \sigma_{rr} = 0 \\ \sigma_{r\theta} = 0 \end{array} \right.$$

Les conditions hydrauliques sur  $\Gamma_1$  dépendent de la variante.

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

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

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

### 2.3.4. Modélisation de base en plasticité parfaite

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

Les conditions hydrauliques sur  $\Gamma_1$  sont :

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

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 :  $f(\gamma^p) = 1$

### 2.3.5. Variante 1

La perméabilité dépend de la porosité selon la loi :  $\frac{k(\varphi)}{k_0} = 1 + 2.10^{12} [\varphi - \varphi_0]^3$

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

Les conditions hydrauliques sur  $\Gamma_1$  sont :

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

### 2.3.6. Variante 2

La perméabilité dépend de la porosité selon la loi :  $\frac{k(\varphi)}{k_0} = 1 + 2.10^{12} [\varphi - \varphi_0]^3$

Le milieu 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 :

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

La perméabilité relative est donnée par :

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

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

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

### 2.3.7. 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 la modélisation de base :

- Les déplacements selon X et Y 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  $\gamma^p$  en fonction de r
- La déformation plastique cumulée volumique  $\varepsilon_v^p$  en fonction de r

Pour la variante 1 :

- Les déplacements selon X et Y 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  $\gamma^p$  en fonction de r
- La déformation plastique cumulée volumique  $\varepsilon_v^p$  en fonction de r
- La perméabilité intrinsèque en fonction de r

Pour la variante 2 :

- Les déplacements selon X et Y 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  $\gamma^p$  en fonction de r
- La déformation plastique cumulée volumique  $\varepsilon_v^p$  en fonction de r
- La perméabilité intrinsèque en fonction de r
- La saturation en fonction de r

Ces quantités seront fournies aux instants :

$1.2 \cdot 10^6$ s,  $1.5 \cdot 10^6$ s,  $1.6 \cdot 10^6$ s,  $2.5 \cdot 10^6$ s,  $5 \cdot 10^6$ s,  $10 \cdot 10^6$ s,  $50 \cdot 10^6$ s,  $100 \cdot 10^6$ s,  $200 \cdot 10^6$ s,  $300 \cdot 10^6$ s

Les valeurs de r en abscisse seront :

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.

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

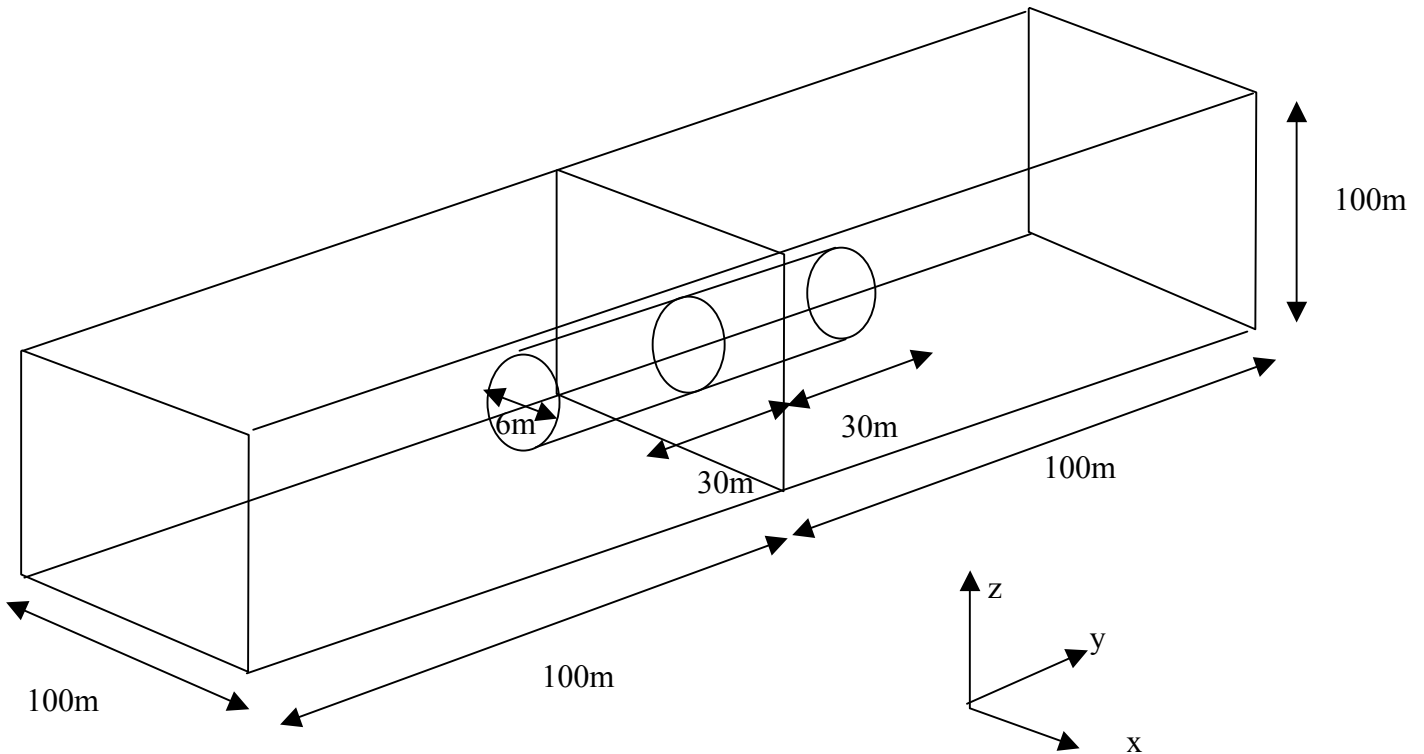
Il est demandé de fournir une étude sur la dépendance des résultats par rapport au pas d'espace et de temps pour le cas de base et la variante 1. On montrera cette dépendance à  $5 \cdot 10^6$ s, pour  $\sigma'_{rr}, \sigma'_{\theta\theta}, \sigma'_{zz}$  à  $r=3.2$ m.

## 2.4. Test 3D

### 2.4.1. 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.



**Figure 4**

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

### 2.4.2. 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  $\rho$  désigne le poids la masse volumique de la roche mouillée et  $\rho_e$  la masse volumique de l'eau

En contraintes effectives

$$\begin{aligned}\sigma'_{zz} &= \sigma_{zz} + b * p_e = -7.24 \text{ MPa} + 1.6677 * 10^{-2} * z \\ \sigma'_{yy} &= \sigma_{yy} + b * p_e = -7.24 \text{ MPa} + 1.6677 * 10^{-2} * z, \\ \sigma'_{xx} &= \sigma_{xx} + b * p_e = -11.64 \text{ MPa} + 2.6487 * 10^{-2} * z \\ p_e &= 4.7 \text{ MPa} - \rho_e g z = 4.7 \text{ MPa} - 0.981 * 10^{-2} * z\end{aligned}$$

### 2.4.3. Conditions aux limites et chargement

Plans  $x=\pm 50$

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= -15.4 + 3.4335 * 10^{-2} * z \\ p_e &= 4.7 \text{ MPa} - 0.981 * 10^{-2} * z\end{aligned}$$

Plan  $y=\pm 100$

$$\begin{aligned}\sigma_{yy} &= -11 + 2.4525 * 10^{-2} * z \\ p_e &= 4.7 \text{ MPa} - 0.981 * 10^{-2} * z\end{aligned}$$

Plan  $z=50$

$$\begin{aligned}\sigma_{zz} &= -9.77375 \text{ MPa} \\ p_e &= 4.2095 \text{ MPa}\end{aligned}$$

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.

### 2.4.4. 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  $\gamma^p$  en fonction de  $s$
- La déformation plastique cumulée volumique  $\varepsilon_v^p$  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.

## 2.5. Valeurs des coefficients

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

	Nom	Valeur	Triaxiaux	Test 1	Test 2 Base	Test 2 Variante 1	Test 2 Variante 2	Test3
$\phi_0$	Porosité initiale	0.15	X	X	X	X	X	X
$b$	Coefficient de Biot	0.8	X	X	X	X	X	X
$E_0$	Module d'Young drainé	5800 Mpa	X	X	X	X	X	X
$\nu_0$	Coefficient de Poisson drainé	0.3	X	X	X	X	X	X
$K_e$	Incompressibilité de l'eau	2000 Mpa	X	X	X	X	X	X
$k_0$	Perméabilité	$10^{-12} m/s$	X	X	X	X	X	X
$k(\phi)$	Variation perméabilité	$\frac{k(\phi)}{k_0} = 1 + 2.10^{12} [\phi - \phi_0]^3$				X	X	
$S_e(p_c)$	Courbe de sorption	$si p_c > 0$ $S_e(p_c) = \left( 1 + \left( \frac{p_c}{A} \right)^{\frac{1}{1-B}} \right)^{-1}$ $si p_c \leq 0 \quad S_e(p_c) = 1$ $A = 10 * 10^6$ $B = 0.412$					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	X
$c$	Cohésion	1 MPA	X	X	X	X	X	
$\phi$	Angle de frottement	25°	X	X	X	X	X	X
$\alpha$		0.01	X	X	X	X	X	X
$\gamma_R^p$		0.015	X	X	X	X	X	X
$\rho_e$	Masse volumique de l'eau	1000 kg/M3						X
$\rho$	Masse volumique du sol mouillé	2500 kg/M3						X
$g$	Accélération de la pesanteur	9,81m/s <sup>2</sup>						X