

## WTNV123 - Essai triaxial à succion fixée avec le modèle de Barcelone

---

### Résumé :

Ce test permet de valider le modèle de Barcelone, qui intègre une loi mécanique élasto-plastique couplée à l'hydraulique (et éventuellement à la thermique) en condition de non saturation de la phase liquide. Cette loi intègre un mécanisme hydrostatique élasto-plastique (dont la partie élastique est non-linéaire et le seuil d'écoulement correspond à une pression de consolidation variable avec la succion) couplé à un mécanisme déviatorique élasto-plastique. Les caractéristiques de ces mécanismes dépendent de la succion (c'est-à-dire de la différence entre pression de gaz et pression de liquide encore appelée pression capillaire). Il existe en particulier deux mécanismes d'écrouissage en pression et pression capillaire complètement couplés. La surface de charge du modèle de Barcelone se présente (dans le diagramme pression hydrostatique-déviateur et pour une pression capillaire donnée) sous la forme d'une ellipse coupant l'axe hydrostatique en deux points : la valeur de la pression de consolidation et la cohésion du matériau proportionnelle à la pression capillaire. En condition de saturation complète, ce critère se réduit à celui du modèle `CAM_CLAY` spécifique aux sols normalement consolidés saturés.

Le présent test effectué en couplage hydro-mécanique (modélisation `HHM`) se décline en trois modélisations :

La modélisation A comprend deux trajets de chargement mécanique, la pression capillaire étant fixée à une valeur correspondant à un degré de saturation de 10% :

- un trajet de compression hydrostatique
- un trajet obtenu en maintenant les contraintes latérales sur l'échantillon et en imposant une pression verticale supplémentaire, qui induit un état de contraintes triaxial, jusqu'à atteindre la surface de charge et engendrer des déformations plastiques dans le domaine contractant.

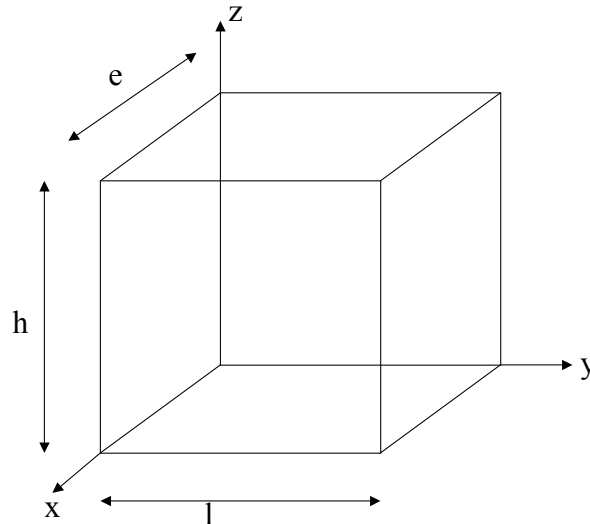
La modélisation B reprend la modélisation A mais avec un critère de convergence de l'équilibre sur chaque contrainte généralisée.

La modélisation C poursuit la modélisation B par une décharge déviatorique puis hydrostatique concluant par une recharge déviatorique plastifiant dans le domaine dilatant.

Toutes ces modélisations sont réalisées en 3D sur un élément hexaédrique.

## 1 Problème de référence

### 1.1 Géométrie



hauteur :  $h = 1\text{ m}$   
largeur :  $l = 1\text{ m}$   
épaisseur :  $e = 1\text{ m}$

### 1.2 Propriétés du matériau

Module de cisaillement  $\mu = 2,76 \cdot 10^6\text{ Pa}$

Porosité initiale  $PORO = 0.14$

Module de compressibilité plastique en saturé LAMBDA  $\lambda = 0.2$

Module de compressibilité élastique KAPA  $\kappa = 0.02$

Pente de la droite critique  $M = 1$ .

Pression critique égale à la moitié de la pression de consolidation à saturation  
 $PRES\_CRIT = 2 \cdot 10^5\text{ Pa}$ ,

Pression de référence  $PA = 10^5\text{ Pa}$

Paramètres permettant de calculer le module de compressibilité en fonction de la pression capillaire

$\lambda(p_c) = \lambda(0)(1-r)\exp(-\beta p_c) + r$ ,  $r = 0.75$ ,  $\beta = 12,5 \cdot 10^6$

Pente de cohésion  $k_c = 0.6$

Seuil plastique initial de la pression capillaire PCO\_INIT  $p_{c0}(0) = 3 \cdot 10^5\text{ Pa}$

Module de compressibilité élastique de la succion KAPAS  $\kappa_s = 0.008$

Module de compressibilité plastique de la succion LAMBDA S  $\lambda_s = 0.08$

**Propriétés hydrauliques** : les propriétés hydrauliques du matériau qui sont indépendantes du modèle de Barcelone mais néanmoins nécessaires pour effectuer le calcul couplé sont présentées dans le tableau ci-dessous :

|             |                                                    |                   |
|-------------|----------------------------------------------------|-------------------|
| Eau liquide | Masse volumique ( $\text{kg.m}^{-3}$ )             | 1.10 <sup>3</sup> |
|             | Chaleur à pression constante ( $\text{J.K}^{-1}$ ) | 4180              |

|                           |                                                                     |                                             |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
|                           | coefficient de dilatation thermique du liquide ( $10^{-4} K^{-1}$ ) |                                             |
| Squelette                 | Capacité calorifique à contrainte constante                         | 800                                         |
| Etat initial              | Porosité                                                            | 0,14                                        |
|                           | Température ( $K$ )                                                 | 293                                         |
|                           | Pression capillaire ( $Pa$ )                                        | $2 \cdot 10^5$                              |
|                           | Pression de gaz ( $Pa$ )                                            | $10^5$                                      |
|                           | Saturation initiale en liquide (*)                                  | 0,1                                         |
| Constantes                | Constante des gaz parfaits                                          | 8,315                                       |
| Coefficients homogénéisés | Masse volumique homogénéisée ( $kg.m^{-3}$ )                        | 2400                                        |
|                           | Courbe capillaire                                                   | $S(P_c) = 0,99(1 - 4,49 \cdot 10^{-6} p_c)$ |
|                           | Coefficient de Biot                                                 | 1                                           |

(\*) cette donnée transmise dans THM\_INIT par le mot-clef DEGR\_SATU n'a qu'une valeur indicative, seules la pression capillaire initiale et la courbe capillaire déterminent la saturation initiale.

## 1.3 Conditions aux limites et chargements

Pour toutes les modélisations, on commence par un trajet de chargement hydrostatique, avec une pression capillaire constante  $PRE1 = 2 \cdot 10^5 Pa$  à partir d'un état initial hydrostatique jusqu'à une pression hydrostatique totale de  $\sigma_T = 8 \cdot 10^5 Pa$ . La pression de gaz est maintenue constante  $PRE2 = 10^5 Pa$ . Ensuite, on maintient la pression  $P$  sur les faces latérales et on augmente la pression verticale jusqu'à  $\sigma_{T_{ii}} = 11 \cdot 10^5 Pa$  en compression de façon à obtenir un état de contrainte biaxial de révolution. La pression capillaire et la pression de gaz sont maintenues constantes. On franchit alors le seuil plastique dans le domaine contractant. Pour la modélisation  $C$ , on poursuit le chargement en effectuant une décharge de la contrainte déviatorique (de  $11 \cdot 10^5 Pa$  à  $6 \cdot 10^5 Pa$ ), puis une décharge hydrostatique (de  $6 \cdot 10^5 Pa$  à  $1,5 \cdot 10^5 Pa$ ) et enfin une recharge déviatorique de façon à plastifier dans le domaine dilatant.

## 1.4 Conditions initiales

La contrainte initiale (contrainte effective de Bishop) est choisie de telle façon que la contrainte utilisée dans le comportement ( $\sigma = \sigma_T + p_{gz} 1^d$ ) ne viole pas le critère. La pression capillaire initiale, est égale à  $2 \cdot 10^5 Pa$ .

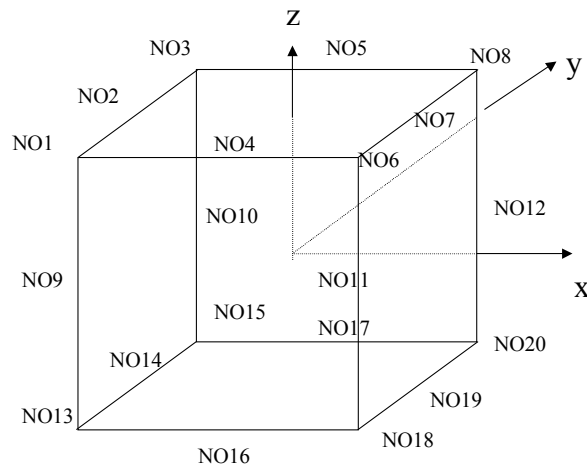
## 2 Solution de référence

Une solution exacte pour le déplacement existe tant que le chargement est hydrostatique. Pour le deuxième trajet la solution analytique n'est pas disponible, on effectue un test de non régression.

## 3 Modélisation A

### 3.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 3D



### 3.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 20  
Nombre de mailles : 1 de type HEXA20  
6 de type QUAD8

On définit les mailles suivantes :

*DROITE* NO3 NO5 NO8 NO10 NO12 NO15 NO17 NO20  
*GAUCHE* NO1 NO4 NO6 NO9 NO11 NO13 NO16 NO18  
*DEVANT* NO6 NO7 NO8 NO11 NO12 NO18 NO19 NO20  
*DERRIERE* NO1 NO2 NO3 NO9 NO10 NO13 NO14 NO15  
*BAS* NO13 NO14 NO15 NO16 NO17 NO18 NO19 NO20  
*HAUT* NO1 NO2 NO3 NO4 NO5 NO6 NO7 NO8

Pour représenter le  $1/8^{\text{ème}}$  de la structure, les conditions aux limites imposées en déplacement sont :

Sur la face *BAS* :  $DZ = 0$   
Sur la face *GAUCHE* :  $DY = 0$   
Sur la face *DERRIERE* :  $DX = 0$

Le chargement est constitué de la même pression répartie en compression sur les 3 mailles : *HAUT*, *DROITE* et *DEVANT* pour simuler un essai hydrostatique. Ensuite, la pression répartie est maintenue constante sur les faces latérales *DROITE* et *DEVANT*, la pression verticale augmente sur la face *HAUT*.

## 3.3 Grandeurs testées et résultats

Il s'agit d'un essai homogène, le lieu d'observation des champs est indifférent. On testera le déplacement  $u_z$  au nœud  $NO8$  à l'instant 6 (fin du trajet hydrostatique) ainsi qu'à l'instant 20 (fin de l'essai) ainsi que les variables internes d'indicateur de plasticité et pression critique au même nœud.

| Identification                                                                                | Type de référence | Valeur      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------|
| $u_z$ à l'instant 6.<br>(1 <sup>er</sup> chargement)                                          | 'NON_REGRESSION'  | -1.84046E-2 |
| $u_z$ à l'instant 20.<br>(2 <sup>eme</sup> chargement)                                        | 'NON_REGRESSION'  | -6.9675E-2  |
| Indicateur plastique à l'instant 6.                                                           | 'NON_REGRESSION'  | 1.0         |
| Indicateur plastique à l'instant 20.                                                          | 'NON_REGRESSION'  | 1.0         |
| Pression critique en condition de saturation à l'instant 6.<br>(1 <sup>er</sup> chargement)   | 'NON_REGRESSION'  | 3.5E+5      |
| Pression critique en condition de saturation à l'instant 20.<br>(2 <sup>eme</sup> chargement) | 'NON_REGRESSION'  | 4.48913E+5  |
| Valeur du seuil hydrique à l'instant 6.<br>(1 <sup>er</sup> chargement)                       | 'NON_REGRESSION'  | 3.6876E+5   |
| Valeur du seuil hydrique à l'instant 20.<br>(2 <sup>eme</sup> chargement)                     | 'NON_REGRESSION'  | 6.4522E+5   |

On teste l'extraction d'une variable interne au nœud  $N_1$  de la maille  $M_1$  (champ 'VAEX\_ELNO') :

| Identification                                         | Type de référence | Valeur     |
|--------------------------------------------------------|-------------------|------------|
| $X_1$ Au numéro d'ordre 1 du résultat <i>PCR</i> .     | 'NON_REGRESSION'  | 3.21424E+5 |
| $X_1$ Au numéro d'ordre 1 du résultat <i>SEUIL</i> .   | 'NON_REGRESSION'  | 3.0E+5     |
| $X_1$ Au numéro d'ordre 24 du résultat <i>INDETA</i> . | 'NON_REGRESSION'  | 1.0        |
| $X_1$ Au numéro d'ordre 24 du résultat <i>SEUIL</i> .  | 'NON_REGRESSION'  | 0.0        |

---

## 4 Modélisation B

---

Il s'agit exactement de la même modélisation que précédemment mais avec un test de convergence sur chaque contrainte généralisée. Les résultats sont sensiblement les mêmes.

## 5 Modélisation C

### 5.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit toujours de la même modélisation mais avec un prolongement du chargement jusqu'à plastification dans le domaine dilatatant.

### 5.2 Grandeurs testées et résultats

On teste le déplacement  $u_z$  au nœud *NO8* à l'instant 34 (décharge déviatorique), à l'instant 46 (décharge hydrostatique) et enfin à l'instant 60 ainsi que les variables internes d'indicateur de plasticité et pression critique et seuil hydrique au même nœud et aux mêmes instants.

Valeurs de  $u_z$  :

|                             | Instant | Type de référence | Référence    |
|-----------------------------|---------|-------------------|--------------|
| 1 <sup>er</sup> chargement  | 6.      | NON REGRESSION    | -1.84049-02  |
| 2 <sup>eme</sup> chargement | 20.     | NON REGRESSION    | -6.95388-02  |
| 3 <sup>eme</sup> chargement | 34.     | NON REGRESSION    | -7.812751-03 |
| 4 <sup>eme</sup> chargement | 46      | NON REGRESSION    | -1.74106-02  |
| 5 <sup>eme</sup> chargement | 60      | NON REGRESSION    | -6.75288-02  |

Indicateur plastique (seuil mécanique) :

|                             | Instant | Type de référence | Référence |
|-----------------------------|---------|-------------------|-----------|
| 1 <sup>er</sup> chargement  | 6.      | NON REGRESSION    | 1         |
| 2 <sup>eme</sup> chargement | 20.     | NON REGRESSION    | 1         |
| 3 <sup>eme</sup> chargement | 34.     | NON REGRESSION    | 0         |
| 4 <sup>eme</sup> chargement | 46      | NON REGRESSION    | 0         |
| 5 <sup>eme</sup> chargement | 60      | NON REGRESSION    | 0         |

Pression critique en condition de saturation :

|                             | Instant | Type de référence | Référence  |
|-----------------------------|---------|-------------------|------------|
| 1 <sup>er</sup> chargement  | 6.      | NON REGRESSION    | 3.5+05     |
| 2 <sup>eme</sup> chargement | 20.     | NON REGRESSION    | 4.48913+05 |
| 3 <sup>eme</sup> chargement | 34.     | NON REGRESSION    | 4.48913+05 |
| 4 <sup>eme</sup> chargement | 46      | NON REGRESSION    | 4.48913+05 |
| 5 <sup>eme</sup> chargement | 60      | NON REGRESSION    | 4.48913+05 |

Valeur du seuil hydrique:

|                             | Instant | Type de référence | Référence  |
|-----------------------------|---------|-------------------|------------|
| 1 <sup>er</sup> chargement  | 6.      | NON REGRESSION    | 3.68765+05 |
| 2 <sup>eme</sup> chargement | 20.     | NON REGRESSION    | 6.45223+05 |
| 3 <sup>eme</sup> chargement | 34.     | NON REGRESSION    | 6.45223+05 |
| 4 <sup>eme</sup> chargement | 46      | NON REGRESSION    | 6.45223+05 |
| 5 <sup>eme</sup> chargement | 60      | NON REGRESSION    | 6.45223+05 |

---

## 6 Modélisation D

---

### 6.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit de la même modélisation que A mais avec prise en compte de la thermique (modélisation 3D\_THHM), la température étant bloquée. Cette modélisation a juste pour but de bien vérifier le bon passage dans les routines de thermiques.

### 6.2 Grandeurs testées et résultats

Les grandeurs testées et résultats sont bien sur les mêmes que pour la modélisation A.

---

## 7 Modélisation E

---

### 7.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit de la même modélisation que A mais avec prise en compte de la thermique, la température étant bloquée. On est ici en modélisation sélective (modélisation `3D_THHMS`). Cette modélisation a juste pour but de bien vérifier le bon passage dans les routines de thermiques lors de la modélisation sélective.

### 7.2 Grandeurs testées et résultats

Les grandeurs testées et résultats sont bien sur les mêmes que pour la modélisation A.

## 8 Modélisation F

### 8.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit de la même modélisation que A mais avec prise en compte de la thermique, la température étant bloquée. On est ici en modélisation lumpée (modélisation 3D\_THHMD). Cette modélisation a juste pour but de bien vérifier le bon passage dans les routines de thermique lors de la modélisation lumpée. Seul le premier trajets de chargement mécanique est ici testé.

### 8.2 Grandeurs testées et résultats

On teste l'extraction d'une variable interne au nœud  $N_1$  de la maille  $M_1$  (champ 'VAEX\_ELNO') :

| Identification                                       | Type de référence | Valeur     |
|------------------------------------------------------|-------------------|------------|
| $X_1$ Au numéro d'ordre 1 du résultat <i>PCR</i> .   | 'NON_REGRESSION'  | 3.21424E+5 |
| $X_1$ Au numéro d'ordre 1 du résultat <i>SEUIL</i> . | 'NON_REGRESSION'  | 3.0E+5     |

## 9 Synthèse des résultats

Les seuls résultats de référence concernent le premier chargement hydrostatique. Dans ce cas les déplacements et les seuils en pression et pression capillaire sont calculés avec une précision supérieure à 1%.