

Manuel de Validation**Fascicule V7.31 : Thermo-hydro-mécanique en milieu poreux saturé****Document : V7.31.123**

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). Il existe en particulier deux mécanismes d'écrouissage en pression et succion complètement couplés. La surface de charge du modèle de Barcelone se présente (dans le diagramme pression hydrostatique-déviateur et pour une succion 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 succion. 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 succion étant fixée à une valeur correspondant à un degré de saturation de 90% :

- 1) un trajet de compression hydrostatique
- 2) un trajet maintenant les contraintes latérales sur l'échantillon et 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.

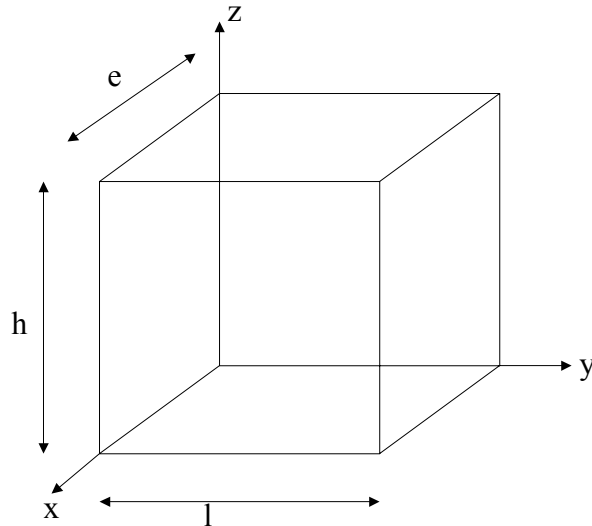
La modélisation B reprend la modélisation A mais avec un critère de convergence de l'équilibre sur chaque contrainte généralisée.

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

Propriétés thermo-élastiques :

$$E = 22.4 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$
$$\nu = 0.3$$

Paramètres spécifiques au modèle de CAM_CLAY :

- Porosité initiale $PORO = 0.14$
- Module de compressibilité plastique en saturé $\lambda = 0.25$,
- Module de compressibilité élastique $\kappa = 0.05$,
- Pente de la droite critique $M = 0.9$,
- Pression critique égale à la moitié de la pression de consolidation à saturation $PRES_CRIT = 3 \cdot 10^7 \text{ Pa}$,
- Pression de référence $PA = 10^5 \text{ Pa}$

Paramètres spécifiques à BARCELONE :

- Paramètres permettant de calculer le module de compressibilité en fonction de la succion $\lambda(p_c) = \lambda(0)[(1-r)\exp(-\beta p_c) + r]$
 $r = 0.75, \beta = 12.5 \cdot 10^{-6}$
- Pente de cohésion $k_c = 0.6$
- Seuil initial de la succion $PC0_INIT \quad p_{c0}(0) = 4.882 \cdot 10^7$

- Module de compressibilité élastique de la succion $\kappa_s = 0.01$
- Module de compressibilité plastique de la succion $\lambda_s = 0.05$

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 (kg.m ⁻³)	1.10 ³
	Chaleur à pression constante (J.K ⁻¹)	4180
	coefficient de dilatation thermique du liquide (K ⁻¹)	10 ⁻⁴
Squelette	Capacité calorifique à contrainte constante	800
Etat initial	Porosité	0,14
	Température	293°K
	Pression capillaire	1.51 10 ⁷
	Pression de gaz	10 ⁵
	Saturation initiale en liquide	0,9
Constantes	Constante des gaz parfaits	8,315
Coefficients homogénéisés	Masse volumique homogénéisée	2400
	Courbe capillaire	$S(P_c) = 0.99(1 - 6.10^{-9} p_c)$
	Coefficient de Biot	1

1.3 Conditions aux limites et chargements

Pour toutes les modélisations, on commence par un trajet de chargement hydrostatique , avec une pression capillaire constante $PRE1 = 1.51 \cdot 10^7 \text{ Pa}$ à partir d'un état initial hydrostatique jusqu'à une pression hydrostatique totale de $\sigma_T = 4 \cdot 10^7 \text{ Pa}$. La pression de gaz est maintenue constante $PRE2 = 10^5 \text{ Pa}$. Ensuite, on maintient la pression P sur les faces latérales et on augmente la pression verticale jusqu'à $\sigma_{T_{11}} = 7 \cdot 10^7 \text{ Pa}$ 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 $7 \cdot 10^7 \text{ Pa}$ à $4 \cdot 10^7 \text{ Pa}$), puis une décharge hydrostatique (de $4 \cdot 10^7 \text{ Pa}$ à $1.75 \cdot 10^7 \text{ Pa}$) et enfin une recharge déviatorique de façon à plastifier dans le domaine dilatatant.

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, correspondant à un degré de saturation de 0.9, est égale à 15.1 MPa.

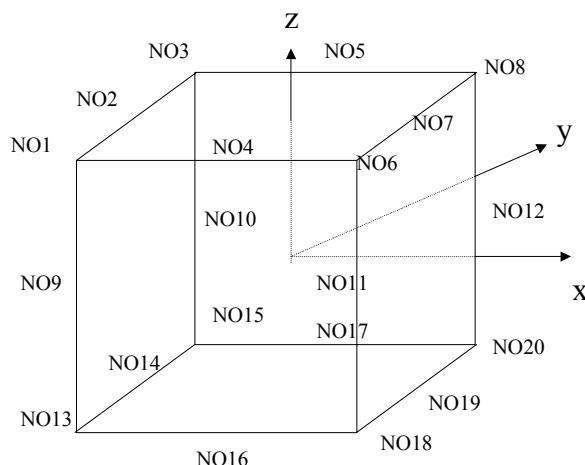
2 Solution de référence

Une solution exacte pour le déplacement existe tant que le chargement est hydrostatique. Pour le deuxième trajet la solution analytique n'est pas disponible.

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 HEXA 20
6 de type QUAD 8

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 la 1/8^{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 Fonctionnalités testées

Commandes

DEFI MATERIAU	BARCELONE	
STAT_NON_LINE	COMP_INCR	RELATION='KIT_HHM' 'RELATION_KIT'= 'BARCELONE' 'LIQU_SATU' 'HYDR_UTIL' MATRICE = TANGENTE
	NEWTON	

3.4 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 8 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.

Valeurs de u_z :

	Instant	Référence	Aster	Différence (%)
1 ^{er} chargement	6.	-7.031-02	-7.03158-02	5.25 10 ⁻⁵
2eme chargement	20.	X	-2.06016-01	

Indicateur plastique (seuil mécanique, seuil hydrique):

	Instant	Référence	Aster	Différence (%)
1 ^{er} chargement	6.	0	0	0
2eme chargement	20.	1	1	0

Pression critique en condition de saturation:

	Instant	Référence	Aster	Différence (%)
1 ^{er} chargement	6.	3.+07	3+07	-7.45 10 ⁻¹⁴
2eme chargement	20.	X	3.4371+07	

Valeur du seuil hydrique:

	Instant	Référence	Aster	Différence (%)
1 ^{er} chargement	6.	4.882+07	4.882+07	-4.58 10 ⁻¹⁴
2eme chargement	20.	X	7.79806+07	

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 dilatant.

5.2 Fonctionnalités testées

Commandes

DEFI MATERIAU	BARCELONE	
STAT_NON_LINE	COMP_INCR	RELATION='KIT_HHM' 'RELATION_KIT'= 'BARCELONE' 'LIQU_SATU' 'HYDR_UTIL' MATRICE = TANGENTE
	NEWTON	

5.3 Grandeurs testées et résultats

On teste le déplacement u_z au nœud 8 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	Référence	Aster	Différence (%)
1 ^{er} chargement	6.	-7.031-02	-7.03158-02	3.41 10 ⁻⁵
2 ^{eme} chargement	20.	X	-2.06016-01	
3 ^{eme} chargement	34.	X	-8.67365-02	
4 ^{eme} chargement	46	X	-7.48391-02	
5 ^{eme} chargement	60	X	-3.73485-01	

Indicateur plastique (seuil mécanique) :

	Instant	Référence	Aster	Différence (%)
1 ^{er} chargement	6.	0	0	0
2 ^{eme} chargement	20.	1	1	0
3 ^{eme} chargement	34.	0	0	0
4 ^{eme} chargement	46	0	0	0
5 ^{eme} chargement	60	1	1	0

Pression critique en condition de saturation :

	Instant	Référence	Aster	Différence (%)
1 ^{er} chargement	6.	3.+07	3.+07	-7.45 10 ⁻¹⁴
2 ^{eme} chargement	20.	X	3.4371+07	
3 ^{eme} chargement	34.	X	3.4371+07	
4 ^{eme} chargement	46	X	3.4371+07	
5 ^{eme} chargement	60	X	3.34488+07	

Valeur du seuil hydrique:

	Instant	Référence	Aster	Différence (%)
1 ^{er} chargement	6.	4.882+07	4.882+07	-4.58 10 ⁻⁴
2 ^{eme} chargement	20.	X	7.79804+07	
3 ^{eme} chargement	34.	X	7.79804+07	
4 ^{eme} chargement	46	X	7.79804+07	
5 ^{eme} chargement	60	X	7.1012+07	

6 Synthèse des résultats

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