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.

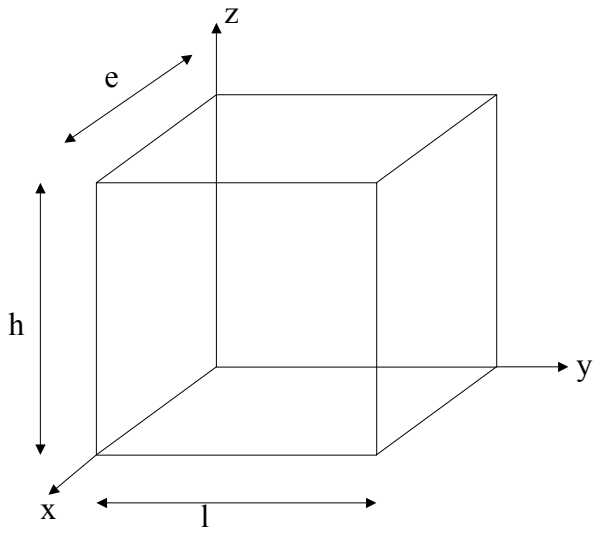
La modélisation C poursuit la modélisation B par une décharge déviatorique puis hydrostatique concluant par une recharge déviatorique plastifiant dans le domaine dilatant.

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

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1 Problème de référence

1.1 Géométrie



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

1.2 Propriétés du matériau

Module de cisaillement $\mu=2{,}76.10^{6}\,Pa$
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 $\mathrm{PRES_CRIT}=2.10^{5}\,Pa$,
Pression de référence $PA=10^{5}\,Pa$
Paramètres permettant de calculer le module de compressibilité en fonction de la pression capillaire $\lambda(p_c)=\lambda(0)(1-r)\exp(-\beta\,p_c)+r$, $r=0.75$, $\beta=12{,}5.10^{6}$
Pente de cohésion $k_c=0.6$
Seuil plastique initial de la pression capillaire PC0_INIT $p_{c0}(0)=3.10^{5}\,Pa$
Module de compressibilité élastique de la succion KAPAS $\kappa_S=0.008$
Module de compressibilité plastique de la succion LAMBDAS $\lambda_S=0.08$

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 ($kg.m^{-3}$)	1.10^3
		4180

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

	Chaleur à pression constante ($J.K^{-1}$)	10^{-4}
	coefficient de dilatation thermique du liquide (K^{-1})	
Squelette	Capacité calorifique à contrainte constante	800
Etat initial	Porosité	0,14
	Température (K)	293
	Pression capillaire (Pa)	$2.\ 10^5$
	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	$S(P_c)=0,99(1-4,49.10^{-6}p_c)$
	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 $PRE1=2.10^5\,Pa$ à partir d'un état initial hydrostatique jusqu'à une pression hydrostatique totale de $\sigma_T=8.10^5\,Pa$. 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 $\sigma_{T_{11}}=11.10^5\,Pa$ 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 $11.10^5\,Pa$ à $6.10^5\,Pa$), puis une décharge hydrostatique (de $6.10^5\,Pa$ à $1,5.10^5\,Pa$) 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 $2.10^5\,Pa$.

2 Solution de référence

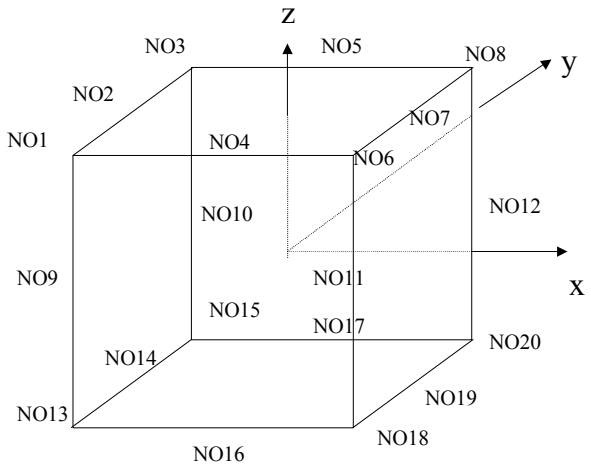
Une solution exacte pour le déplacement existe tant que le chargement est hydrostatique. Pour le deuxième trajet la solution analytique n'est pas disponible, on effectue un test de non régression.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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 $HAUT$.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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. (1 er chargement)	'NON_REGRESSION'	-1.84046E-2
u_z à l'instant 20. (2 eme 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. (1 er chargement)	'NON_REGRESSION'	3.5E+5
Pression critique en condition de saturation à l'instant 20. (2 eme chargement)	'NON_REGRESSION'	4.48913E+5
Valeur du seuil hydrique à l'instant 6. (1 er chargement)	'NON_REGRESSION'	3.6876E+5
Valeur du seuil hydrique à l'instant 20. (2 eme 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 PCR .	'NON_REGRESSION'	3.21424E+5
X_1 Au numéro d'ordre 1 du résultat $SEUIL$.	'NON_REGRESSION'	3.0E+5
X_1 Au numéro d'ordre 24 du résultat $INDETA$.	'NON_REGRESSION'	1.0
X_1 Au numéro d'ordre 24 du résultat $SEUIL$.	'NON_REGRESSION'	0.0

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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 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 er chargement	6.	NON_REGRESSION	-1.84049-02
2eme chargement	20.	NON_REGRESSION	-6.95388-02
3eme chargement	34.	NON_REGRESSION	-7.812751-03
4eme chargement	46	NON_REGRESSION	-1.74106-02
5eme chargement	60	NON_REGRESSION	-6.75288-02

Indicateur plastique (seuil mécanique) :

	Instant	*Type de référence*	*Référence*
1 er chargement	6.	NON_REGRESSION	1
2eme chargement	20.	NON_REGRESSION	1
3eme chargement	34.	NON_REGRESSION	0
4eme chargement	46	NON_REGRESSION	0
5eme chargement	60	NON_REGRESSION	0

Pression critique en condition de saturation :

	Instant	*Type de référence*	*Référence*
1 er chargement	6.	NON_REGRESSION	3.5+05
2eme chargement	20.	NON_REGRESSION	4.48913+05
3eme chargement	34.	NON_REGRESSION	4.48913+05
4eme chargement	46	NON_REGRESSION	4.48913+05
5eme chargement	60	NON_REGRESSION	4.48913+05

Valeur du seuil hydrique:

	Instant	*Type de référence*	*Référence*
1 er chargement	6.	NON_REGRESSION	3.68765+05
2eme chargement	20.	NON_REGRESSION	6.45223+05
3eme chargement	34.	NON_REGRESSION	6.45223+05
4eme chargement	46	NON_REGRESSION	6.45223+05
5eme chargement	60	NON_REGRESSION	6.45223+05

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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 modéilsation 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.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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 modéilsation 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 PCR .	'NON_REGRESSION'	3.21424E+5
X_1 Au numéro d'ordre 1 du résultat $SEUIL$.	'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%.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)