WTNV113 – Écoulement gravitaire dans un milieu poreux saturé

Résumé:

Ce test consiste à étudier l'influence d'un écoulement gravitaire sur la distribution de la pression du fluide du milieu saturé. Il s'agit d'un problème évolutif. Le comportement hydraulique d'un milieu poreux saturé par un seul liquide est étudié

Dix modélisations sont effectuées : quatre modélisations bidimensionnelles (modélisations A, B : éléments HM_DPQ8, modélisations E, F : éléments THM_DPQ8) et six modélisations tridimensionnelles (modélisations C et D : éléments HM_HEXA20, modélisations G et H : éléments THM_HEXA20,I : THM_HEXA20D et J : THM_HEXA20S).

La distinction entre les modélisations A et B (respectivement C et D, E et F, G et H) réside dans la loi de comportement du fluide.
Les modélisations I et J sont des variantes en modélisation sélective et lumpé de G, elles ont des résultats qui diffèrent de la solution analytique proposée (l'intégration est différente), et sont donc de non régression.

La solution de référence est unidimensionnelle car elle ne dépend que de la coordonnée verticale.

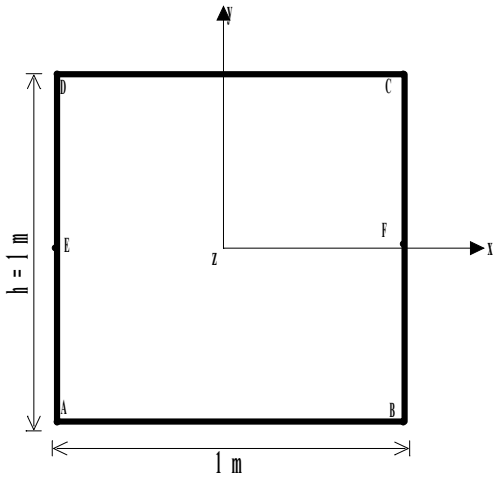
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1 Problème de référence

1.1 Présentation

On étudie dans ce cas test le comportement hydraulique d'un milieu poreux saturé par un seul fluide : l'eau dans sa phase liquide. Il s'agit dans *Code_Aster* d'une modélisation HM ou THM en bloquant la température. La loi de comportement du fluide associée est selon les modélisations soit de type LIQU_SATU (modélisations A, C, E, G, I, J) soit de type LIQU_GAZ_ATM (modélisations B, D, F, H).

1.2 Géométrie



Coordonnées des points (m) :

Points	X	Y
A	$-0,5$	$-0,5$
B	$0,5$	$-0,5$
C	$0,5$	$0,5$
D	$-0,5$	$0,5$

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

1.3 Propriétés du matériau

solide	Masse volumique $(kg.m^{-3})$	$2.\times10^{3}$
	Module d'Young drainé $E(Pa)$	$225.\times10^{6}$
	Coefficient de Poisson	$0.$
Fluide (eau liquide)	Masse volumique $(kg.m^{-3})$	10^{3}
	Compressibilité du liquide (Pa)	2.65×10^{8}
	Viscosité dynamique de l'eau liquide $(Pa.s)$	10^{-3}
	Dérivée de la viscosité du fluide par rapport à la température	$0.$
Coefficients d'homogénéisation	Coefficient de $Biot$	$1.$
	Porosité	0.4
Coefficients homogénéisés	Masse volumique homogénéisée $(kg.m^{-3})$	1.6×10^{3}
	Saturation	$1.$
	Dérivée de la saturation par rapport à la pression	$0.$
	Pesanteur suivant X	$0.$
	Pesanteur suivant Y	-10 en $2D$, 0 en $3D$
	Pesanteur suivant Z	-10 en $3D$, 0 en $2D$
	Perméabilité intrinsèque (m^2)	10^{-18}
	Perméabilité relative au liquide (m^2)	$1.$

1.4 Conditions aux limites et chargements

- Élément complet :
- Déplacements $u_x=0.0\,m\,,u_y=0.0\,m\,,u_z=0.0\,m$.
- Pour les modélisations THM, $T=0º$.

1.5 Conditions initiales

Les champs de déplacement, de pression capillaire sont initialement nuls, la pression d'air sec est égale à la pression atmosphérique et la température de référence vaut $T_0=273\,°\,K$

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

2 Solution de référence

2.1 Méthode de calcul utilisée pour la solution de référence

L'équation de conservation de la masse fluide est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{dm_i}{dt} + Div\,\boldsymbol{M_i} = 0 \qquad i \text{ variant de } 1 \text{ au nombre de constituants} \tag{1}$$

Dans notre exemple, le modèle est constitué d'un fluide : l'eau liquide. L'équation (1) s'applique donc à ce constituant:

$$\frac{dm_e}{dt} + Div\,\boldsymbol{M_e} = 0 \tag{2}$$

Le flux de fluide a pour expression :

$$M_e = \rho_e \lambda_e (-\nabla p_e + \rho_e g) \tag{3}$$

Or l'apport massique de fluide est défini par l'équation (4) où les termes N_{ee} et N_{ea} (équation (5)) dépendent du degré de saturation S, de la porosité ϕ, du coefficient de Biot b, de la perméabilité du liquide K_e et de l'élasticité de la matrice solide K_s.

$$\frac{dm_e}{dt} = \rho_e N_{ee} \frac{dp_e}{dt} + \rho_e N_{ea} \frac{dp_a}{dt} \tag{4}$$

$$\begin{cases} N_{ee} = -\varphi \dfrac{\partial S}{\partial p_c} + S\left(\dfrac{\varphi}{K_e} + \dfrac{b-\varphi}{K_s} S\right) \\ N_{ea} = N_{ae} = \varphi \dfrac{\partial S}{\partial p_c} + (1-S)\left(\dfrac{b-\varphi}{K_s} S\right) \end{cases} \tag{5}$$

Le matériau est saturé, $S=1$ et $\frac{\partial S}{\partial P_c} = 0$. $\Rightarrow N_{ee} = S\left(\frac{\varphi}{K_e} + \frac{b-\varphi}{K_s} S\right)$ et $N_{ea} = 0$.

La formulation variationnelle de l'équation (2), en tenant compte de (3) et (4) est :
$\forall P_e^*$ vérifiant les conditions aux limites en pression :

$$\int_\Omega N_{ee} \frac{dp_e}{dt} p_e^* + \int_\Omega \lambda_e \nabla p_e . \nabla p_e^* = \int_\Omega \lambda_e \rho_e g . \nabla p_e^* - \int_{\partial\Omega} \frac{M_e^{ext}}{\rho_e} p_e^* \tag{6}$$

Discrétisation

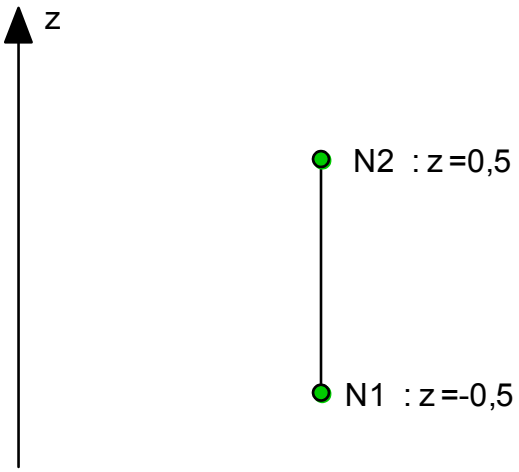
Pour le calcul de la solution analytique, on se place dans un cas unidimensionnel et on considère une discrétisation à un seul élément de degré 2 (HEXA20, DPQ8). On précise que toute modélisation HM étant de type $P2P1$, même si le maillage est quadratique, la modélisation hydraulique est quant à elle linéaire.

On suppose dans les deux cas que la pesanteur est orientée selon les z négatifs.

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

On suppose d'autre part que les non-linéarités sont faibles et que les coefficients N, λ, ρ sont constants. Il faut donc que les variations de pression soient suffisamment faibles pour que N et ρ puissent être supposés constants.

- **Discrétisation linéaire :**



On écrira :

$$p(z,t)=\sum_{i=1}^{2} p^i(t)\lambda_i(z) \tag{7}$$

Avec :

$$\begin{cases} \lambda_1=\frac{1}{2}-z \\ \lambda_2=\frac{1}{2}+z \end{cases} \tag{8}$$

En introduisant alors les matrices et vecteurs :

(9)

$$[A]=[A_{ij}] \quad ; \quad A_{ij}=\int_{-1/2}^{1/2} \lambda_i \lambda_j dz$$

$$[B]=[B_{ij}] \quad ; \quad B_{ij}=\int_{-1/2}^{1/2} \frac{d\lambda_i}{dz}\frac{d\lambda_j}{dz} dz$$

$$\{F_g\}=\{F_{gi}\} \quad ; \quad F_{gi}=\int_{-1/2}^{1/2} \frac{d\lambda_i}{dz} dz$$

Et en notant :

$$\{p_e\}=\begin{Bmatrix} P_e^1 \\ p_e^2 \end{Bmatrix} \tag{10}$$

$$\{M_e^{ext}\}=\begin{Bmatrix} M_{e\ 1}^{ext} \\ M_{e\ 2}^{ext} \end{Bmatrix} \tag{11}$$

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

L'équation (6) devient :

$$\frac{N_{ee}}{\lambda_e}[A]\left\{\frac{dp_e}{dt}\right\}+[B]\{p_e\}=\rho_e\{F_g\}-\frac{1}{\lambda_e\rho_e}\{M_e^{ext}\} \quad (12)$$

Le calcul des matrices $[A]$ et $[B]$ et du vecteur $\{f_g\}$ donne :

$$[A]=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & 1/2\\ 1/2 & 1\end{bmatrix} \quad ; \quad [B]=\begin{bmatrix}1 & -1\\ -1 & 1\end{bmatrix} \quad ; \quad \{F\}=\begin{Bmatrix}-1\\ 1\end{Bmatrix} \quad (13)$$

On définit alors les vecteurs propres $[A]^{-1}[B]$ de : $\{v_1\},\{v_2\}$ qui ont les propriétés d'orthogonalité suivantes :

$$\{v_i\}^T[A]\{v_j\}=\{v_i\}^T[B]\{v_j\}=0 \quad si \quad i\neq j \quad (14)$$

Et on pose :

$$a_i=\{v_i\}^T[A]\{v_i\} \ , \ b_i=\{v_i\}^T[B]\{v_i\} \ , \ f_i=\{v_i\}^T\{F_g\} \ et \ M^i=\{v_i\}^T\{M^{ext}\} \quad (15)$$

On trouve :

$$\{v_1\}=\begin{Bmatrix}1\\ 1\end{Bmatrix} \quad ; \quad \{v_2\}=\begin{Bmatrix}-1\\ 1\end{Bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{cases}a_1=1 \quad ; \quad b_1=0 \quad ; \quad f_1=0\\ a_2=\frac{1}{3} \quad ; \quad b_2=4 \quad ; \quad f_2=-2g\end{cases} \quad (17)$$

On décompose alors $\{p_e\}$ sur la base des $\{v_i\}$:

$$\{p_e\}=\sum_{i=1}^{2}\alpha_e^i\{v_i\} \quad (18)$$

Compte tenu des propriétés d'orthogonalité (14), l'équation (12) s'écrit :

$$\frac{N_{ee}}{\lambda_e}a_i\frac{d\alpha_e^i}{dt}+b_i\alpha_e^i=\rho_e f_i-\frac{1}{\lambda_e\rho_e}M_e^i \quad (19)$$

Conditions initiales

On suppose que :

$p_e(x,t=0)=p_a^0-p_c^0$ uniformes en espace ;

Compte tenu des valeurs des vecteurs $\{v_1\},\{v_2\}$ (équations (16)), on voit facilement que :

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

$$\begin{cases}\alpha_e^1(t=0)=P_a^0-p_c^0\\ \alpha_e^2(t=0)=0\end{cases} \quad (20)$$

On se place dans un cas où le flux de fluide est nul ($\{M_e^{ext}\}=0$).

Compte tenu de (20) , de $f_1=0$ (équations (17)), la solution du système d'équations (19) est :

$$\begin{cases}\alpha_e^1=P_a^0-p_c^0\\ \alpha_e^2=\dfrac{f_2}{b_2}\rho_e\left(1-\exp\left(-\dfrac{b_2}{a_2}\dfrac{\lambda_e}{N_{ee}}t\right)\right)\end{cases} \quad (21)$$

On trouve en revenant aux variables nodales :

$$\begin{Bmatrix}P_1\\ p_2\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\alpha_1-\alpha_2\\ \alpha_1+\alpha_2\end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix}P_1\\ p_2\end{Bmatrix}_{eau}=\begin{Bmatrix}P_a^0-p_c^0+\dfrac{\rho_e g}{2}\left(1-\exp(-12\dfrac{\lambda_e}{N_{ee}}t)\right)\\ P_a^0-p_c^0-\dfrac{\rho_e g}{2}\left(1-\exp(-12\dfrac{\lambda_e}{N_{ee}}t)\right)\end{Bmatrix} \quad (22)$$

2.2 Grandeur de référence

1) Évolution de la pression capillaire en fonction du temps aux points :
   - $C , D \quad (z=h)$
   - $A , B \quad (z=0)$
1) Pour la discrétisation quadratique : Vérification de la valeur constante de la pression aux nœuds $E , F\,(z=\dfrac{h}{2})$.

2.3 Incertitudes

Solution analytique sur l'équation d'hydraulique, les incertitudes sont donc négligeables.

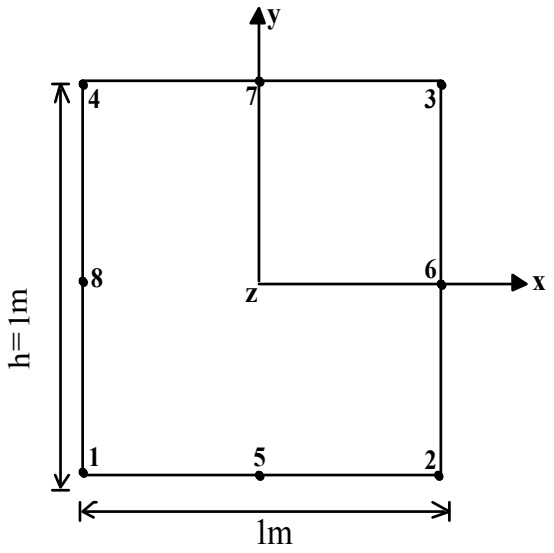
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

3 Modélisation A

Comportement du fluide: THMC = LIQU_SATU

3.1 Caractéristiques de la modélisation A

Modélisation plane D_PLAN_HM



1 maille DPQ8 de la modélisation D_PLAN_HM : HM_ DPQ8

3.2 Grandeurs testées et résultats

Discrétisation en temps : Plusieurs pas de temps (16) pour étudier l'évolution de la pression pendant la phase transitoire jusqu'à se stabiliser. Le schéma en temps est implicite $(\vartheta = 1)$.

Liste des instants de calcul en secondes :
$1, 5, 10, 50, 100, 500, 10^3, 5.10^3, 10^4, 5.10^4, 10^5, 5.10^5, 10^6, 5.10^6, 10^7, 10^{10}$.

Les inconnues nodales, pressions de fluide évaluées dans Code_Aster, sont des variations par rapport aux pressions initiales de référence définies sous le mot clé THM_INIT, c'est pourquoi ce tableau présente des variations de pression dans notre comparaison entre le calcul Code_Aster et la solution de référence.

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

Nœud / point	Numéro d'ordre / instant (s)	Valeur	Référence (Pa)	Tolérance $(\%)$
$N1/A$	$1(t=1\,s)$	$PRE1$	3,98.10 -2	1.0
	$2(t=5\,s)$	$PRE1$	1,99.10 -1	1.0
	$3(t=10\,s)$	$PRE1$	3,98.10 -1	1.0
	$4(t=50\,s)$	$PRE1$	1,99	1.0
	$8(t=5.10^3\,s)$	$PRE1$	1,95.10 +2	1.0
	$16(t=10^{10}\,s)$	$PRE1$	5.10 +3	1.0
$N3/C$	$1(t=1\,s)$	$PRE1$	-3,98.10 -2	1.0
	$2(t=5\,s)$	$PRE1$	-1,99.10 -1	5.0
	$3(t=10\,s)$	$PRE1$	-3,98.10 -1	2.0
	$4(t=50\,s)$	$PRE1$	-1,99	2.0
	$8(t=5.10^3\,s)$	$PRE1$	-1,95.10 +2	1.0
	$16(t=10^{10}\,s)$	$PRE1$	-5.10 +3	1.0

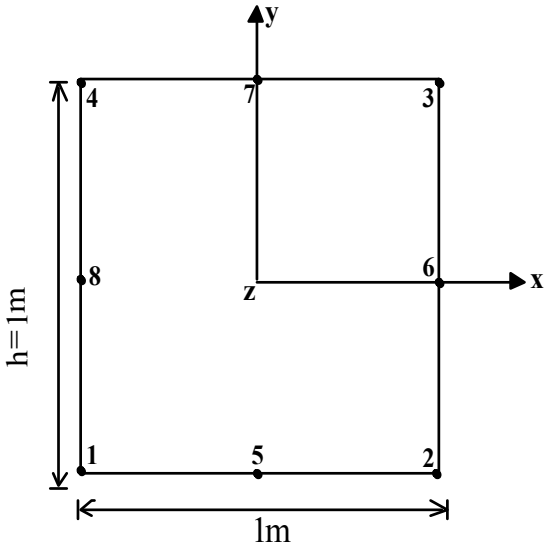
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4 Modélisation B

Comportement du fluide : THMC = LIQU_GAZ_ATM avec une saturation constante $S=1$

4.1 Caractéristiques de la modélisation B

Modélisation plane : D_PLAN_HM



1 maille DPQ8 de la modélisation D_PLAN_HM : HM_ DPQ8

4.2 Grandeurs testées et résultats

Discrétisation en temps : Plusieurs pas de temps (16) pour étudier l'évolution de la pression pendant la phase transitoire jusqu'à se stabiliser. Le schéma en temps est implicite $(\vartheta=1)$.

Liste des instants de calcul en secondes :
$1,5,10,50,100,500,10^3,5.10^3,10^4,5.10^4,10^5,5.10^5,10^6,5.10^6,10^7,10^{10}$

Les inconnues nodales de pression de fluide évaluées dans Code_Aster sont des variations par rapport aux pressions initiales de référence définies sous le mot clé THM_INIT, c'est pourquoi ce tableau présente des variations de pression dans notre comparaison entre le calcul Code_Aster et la solution de référence.

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

Nœud / point	Numéro d'ordre	Pression	Référence (Pa)	Tolérance $(\%)$
$N1/A$	1 (t=1 s)	$PRE1$	-3,98.10 $^{-2}$	1.0
	2 (t=5 s)	$PRE1$	-1,99.10 $^{-1}$	1.0
	3 (t=10 s)	$PRE1$	-3,98.10 $^{-1}$	1.0
	4 (t=50 s)	$PRE1$	-1,99	1.0
	8 (t=5.10 ^{3} s)	$PRE1$	-1,95.10 $^{+2}$	1.0
	16 (t=10 ^{10} s)	$PRE1$	-5.10 $^{+3}$	1.0
$N3/C$	1 (t=1 s)	$PRE1$	3,98.10 $^{-2}$	1.0
	2 (t=5 s)	$PRE1$	1,99.10 $^{-1}$	1.0
	3 (t=10 s)	$PRE1$	3,98.10 $^{-1}$	2.0
	4 (t=50 s)	$PRE1$	1,99	2.0
	8 (t=5.10 ^{3} s)	$PRE1$	1,95.10 $^{+2}$	1.0
	16 (t=10 ^{10} s)	$PRE1$	5.10 $^{+3}$	1.0

4.3 Remarques

On remarque que les pressions calculées pour les deux comportements précédents (THMC=LIQU_SATU (modèle A) et THMC=LIQU_GAZ_ATM (modèle B)) sont égales en valeurs absolues. La différence de signes est due au fait que :

- la pression $PRE1$ évaluée dans le code est la pression de l'eau pour le comportement THMC=LIQU_SATU,
- $PRE1$ est égale à la pression capillaire pour le comportement THMC=LIQU_GAZ. La pression capillaire est égale à la différence entre la pression de gaz et la pression liquide. Dans le cas particulier où la pression d'air sec est la pression atmosphérique (THMC=LIQU_GAZ_ATM), la pression capillaire a pour valeur l'opposé de la pression liquide.

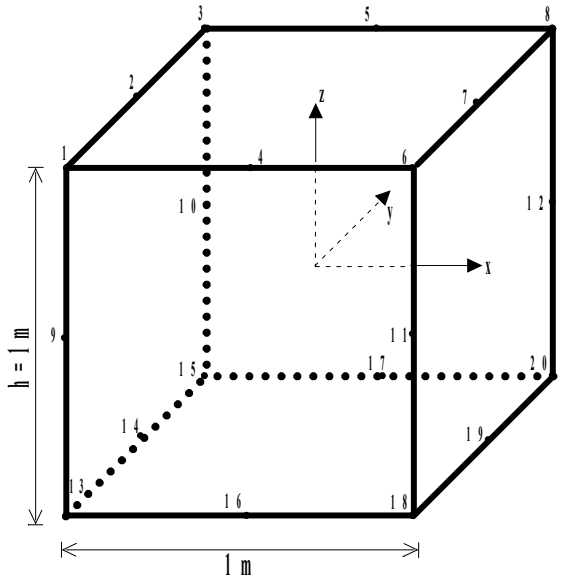
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

5 Modélisation C

Comportement du fluide : THMC = LIQU_SATU

5.1 Caractéristiques de la modélisation C

- Modélisation volumique:3D_HM
- 1 maille HEXA20 de la modélisation 3D_HM : HM_HEXA20



5.2 Grandeurs testées et résultats

Discrétisation en temps: Plusieurs pas de temps (16) pour étudier l'évolution de la pression pendant la phase transitoire jusqu'à se stabiliser. Le schéma en temps est implicite $(\vartheta = 1)$.

Liste des instants de calcul en secondes:
$1, 5, 10, 50, 100, 500, 10^3, 5.10^3, 10^4, 5.10^4, 10^5, 5.10^5, 10^6, 5.10^6, 10^7, 10^{10}$

Les inconnues nodales de pression de fluides évaluées dans Code_Aster sont des variations par rapport aux pressions initiales de référence définies sous le mot clé THM_INIT, c'est pourquoi ce tableau présente des variations de pression dans notre comparaison entre le calcul Code_Aster et la solution de référence.

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

Nœud	Numéro d'ordre	Pression	Référence (Pa)	Tolérance $(\%)$
NO20	1 (t=1 s)	*PRE1*	3,98.10 $^{-2}$	1.0
	2 (t=5 s)	*PRE1*	1,99.10 $^{-1}$	1.0
	3 (t=10 s)	*PRE1*	3,98.10 $^{-1}$	1.0
	4 (t=50 s)	*PRE1*	1,99	1.0
	8 (t=5.10 ^{3} s)	*PRE1*	1,95.10 $^{+2}$	1.0
	16 (t=10 ^{10} s)	*PRE1*	5.10 $^{+3}$	1.0
NO1	1 (t=1 s)	*PRE1*	-3,98.10 $^{-2}$	1.0
	2 (t=5 s)	*PRE1*	-1,99.10 $^{-1}$	1.0
	3 (t=10 s)	*PRE1*	-3,98.10 $^{-1}$	2.0
	4 (t=50 s)	*PRE1*	-1,99	2.0
	8 (t=5.10 ^{3} s)	*PRE1*	-1,95.10 $^{+2}$	1.0
	16 (t=10 ^{10} s)	*PRE1*	-5.10 $^{+3}$	1.0

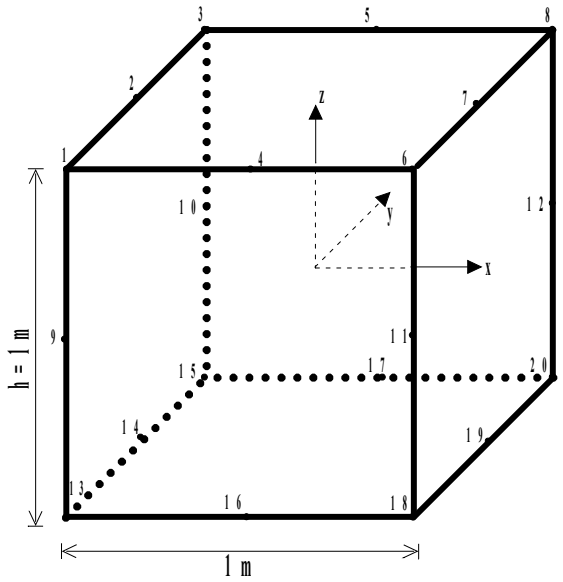
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

6 Modélisation D

Comportement du fluide : THMC = LIQU_GAZ_ATM avec une saturation constante $S=1$

6.1 Caractéristiques de la modélisation D

- Modélisation volumique: 3D_HM
- 1 maille HEXA20 de la modélisation 3D_HM : HM_HEXA20



6.2 Grandeurs testées et résultats

Discrétisation en temps : Plusieurs pas de temps (16) pour étudier l'évolution de la pression pendant la phase transitoire jusqu'à se stabiliser. Le schéma en temps est implicite ($\vartheta=1$).

Liste des instants de calcul en secondes :
$1,5,10,50,100,500,10^3,5.10^3,10^4,5.10^4,10^5,5.10^5,10^6,5.10^6,10^7,10^{10}$

Les inconnues nodales de pression de fluide évaluées dans Code_Aster sont des variations par rapport aux pressions initiales de référence définies sous le mot clé THM_INIT, c'est pourquoi ce tableau présente des variations de pression dans notre comparaison entre le calcul Code_Aster et la solution de référence.

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

Nœud	Numéro d'ordre	Pression	Référence (Pa)	Tolérance $(\%)$
NO20	1 (t=1 s)	*PRE1*	-3,98.10 $^{-2}$	1.0
	2 (t=5 s)	*PRE1*	-1,99.10 $^{-1}$	1.0
	3 (t=10 s)	*PRE1*	-3,98.10 $^{-1}$	1.0
	4 (t=50 s)	*PRE1*	-1,99	1.0
	8 (t=5.10 ^{3} s)	*PRE1*	-1,95.10 $^{+2}$	1.0
	16 (t=10 ^{10} s)	*PRE1*	-5.10 $^{+3}$	1.0
NO1	1 (t=1 s)	*PRE1*	3,98.10 $^{-2}$	1.0
	2 (t=5 s)	*PRE1*	1,99.10 $^{-1}$	1.0
	3 (t=10 s)	*PRE1*	3,98.10 $^{-1}$	2.0
	4 (t=50 s)	*PRE1*	1,99	2.0
	8 (t=5.10 ^{3} s)	*PRE1*	1,95.10 $^{+2}$	1.0
	16 (t=10 ^{10} s)	*PRE1*	5.10 $^{+3}$	1.0

6.3 Remarques

De même que pour la modélisation bidimensionnelle, on remarque que les pressions calculées pour les deux comportements précédents (THMC=LIQU_SATU (modèle C) et THMC=LIQU_GAZ_ATM (modèle D)) sont égales en valeurs absolues. La différence de signes est due au fait que :

- pour le comportement THMC=LIQU_SATU, la pression $PRE1$ évaluée dans le code est la pression de l'eau ,
- et pour le comportement THMC=LIQU_GAZ, $PRE1$ est égale à la pression capillaire. La pression capillaire est égale à la différence entre la pression de gaz et la pression liquide. Dans le cas particulier où la pression d'air sec est la pression atmosphérique (THMC=LIQU_GAZ_ATM), la pression capillaire a pour valeur l'opposé de la pression liquide.

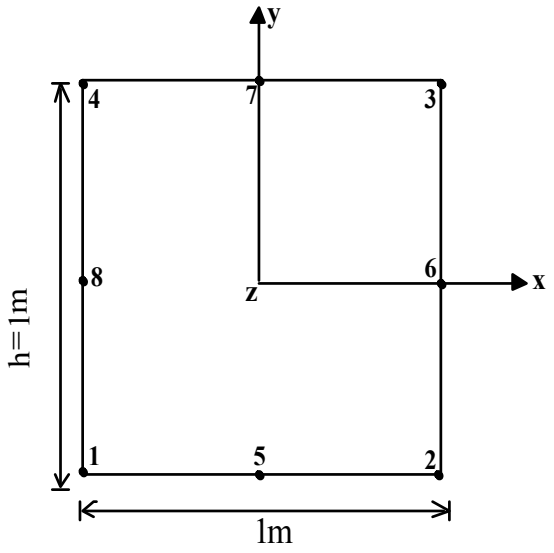
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

7 Modélisation E

Comportement du fluide : THMC = LIQU_SATU

7.1 Caractéristiques de la modélisation E

- Modélisation plane
- 1 maille DPQ8 de la modélisation D_PLAN_THM : THM_ DPQ8



7.2 Grandeurs testées et résultats

Discrétisation en temps : Plusieurs pas de temps (16) pour étudier l'évolution de la pression pendant la phase transitoire jusqu'à se stabiliser. Le schéma en temps est implicite ($\vartheta = 1$).

Liste des instants de calcul en secondes :
$1, 5, 10, 50, 100, 500, 10^3, 5.10^3, 10^4, 5.10^4, 10^5, 5.10^5, 10^6, 5.10^6, 10^7, 10^{10}$

Les inconnues nodales, pressions de fluide évaluées dans Code_Aster, sont des variations par rapport aux pressions initiales de référence définies sous le mot clé THM_INIT, c'est pourquoi ce tableau présente des variations de pression dans notre comparaison entre le calcul Code_Aster et la solution de référence.

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

Nœud / point	Numéro d'ordre	Pression	Référence (Pa)	Tolérance $(\%)$
$N1/A$	1 (t=1 s)	$PRE1$	3,98.10 $^{-2}$	1.0
	2 (t=5 s)	$PRE1$	1,99.10 $^{-1}$	1.0
	3 (t=10 s)	$PRE1$	3,98.10 $^{-1}$	1.0
	4 (t=50 s)	$PRE1$	1,99	1.0
	8 (t=5.10 ^{3} s)	$PRE1$	1,95.10 $^{+2}$	1.0
	16 (t=10 ^{10} s)	$PRE1$	5.10 $^{+3}$	1.0
$N3/B$	1 (t=1 s)	$PRE1$	-3,98.10 $^{-2}$	1.0
	2 (t=5 s)	$PRE1$	-1,99.10 $^{-1}$	1.0
	3 (t=10 s)	$PRE1$	-3,98.10 $^{-1}$	2.0
	4 (t=50 s)	$PRE1$	-1,99	2.0
	8 (t=5.10 ^{3} s)	$PRE1$	-1,95.10 $^{+2}$	1.0
	16 (t=10 ^{10} s)	$PRE1$	-5.10 $^{+3}$	1.0

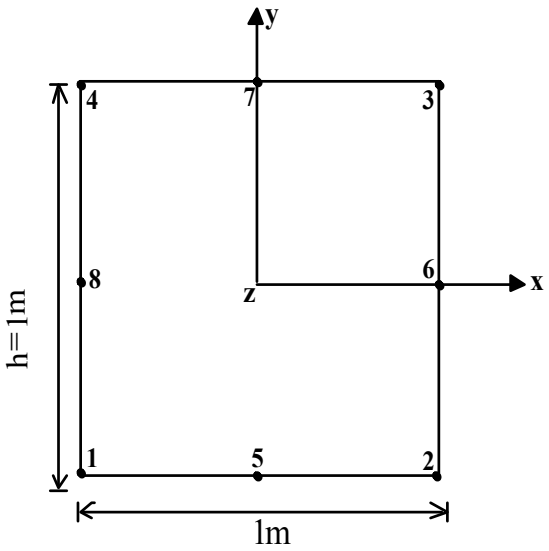
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

8 Modélisation F

Comportement du fluide : THMC = LIQU_GAZ_ATM avec une saturation constante $S=1$

8.1 Caractéristiques de la modélisation F

- Modélisation plane
- 1 maille DPQ8 de la modélisation D_PLAN_THM : THM_ DPQ8



8.2 Grandeurs testées et résultats

Discrétisation en temps : Plusieurs pas de temps (16) pour étudier l'évolution de la pression pendant la phase transitoire jusqu'à se stabiliser. Le schéma en temps est implicite ($\theta=1$).

Liste des instants de calcul en secondes :
$1,5,10,50,100,500,10^3,5.10^3,10^4,5.10^4,10^5,5.10^5,10^6,5.10^6,10^7,10^{10}$

Les inconnues nodales de pression de fluide évaluées dans Code_Aster sont des variations par rapport aux pressions initiales de référence définies sous le mot clé THM_INIT, c'est pourquoi ce tableau présente des variations de pression dans notre comparaison entre le calcul Code_Aster et la solution de référence.

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

Nœud / point	Numéro d'ordre	Pression	Référence (Pa)	Tolérance $(\%)$
$N1/A$	1 (t=1 s)	$PRE1$	-3,98.10 -2	1.0
	2 (t=5 s)	$PRE1$	-1,99.10 -1	1.0
	3 (t=10 s)	$PRE1$	-3,98.10 -1	1.0
	4 (t=50 s)	$PRE1$	-1,99	1.0
	8 (t=5.10 3 s)	$PRE1$	-1,95.10 +2	1.0
	16 (t=10 10 s)	$PRE1$	-5.10 +3	1.0
$N3/B$	1 (t=1 s)	$PRE1$	3,98.10 -2	1.0
	2 (t=5 s)	$PRE1$	1,99.10 -1	1.0
	3 (t=10 s)	$PRE1$	3,98.10 -1	2.0
	4 (t=50 s)	$PRE1$	1,99	2.0
	8 (t=5.10 3 s)	$PRE1$	1,95.10 +2	1.0
	16 (t=10 10 s)	$PRE1$	5.10 +3	1.0

8.3 Remarques

On remarque que les pressions calculées pour les deux comportements précédents (THMC=LIQU_SATU (modèle E) et THMC=LIQU_GAZ_ATM (modèle F)) sont égales en valeurs absolues. La différence de signes est due au fait que :

- la pression $PRE1$ évaluée dans le code est la pression de l'eau pour le comportement THMC=LIQU_SATU,
- $PRE1$ est égale à la pression capillaire pour le comportement THMC=LIQU_GAZ. La pression capillaire est égale à la différence entre la pression de gaz et la pression liquide. Dans le cas particulier où la pression d'air sec est la pression atmosphérique (THMC=LIQU_GAZ_ATM), la pression capillaire a pour valeur l'opposé de la pression liquide.

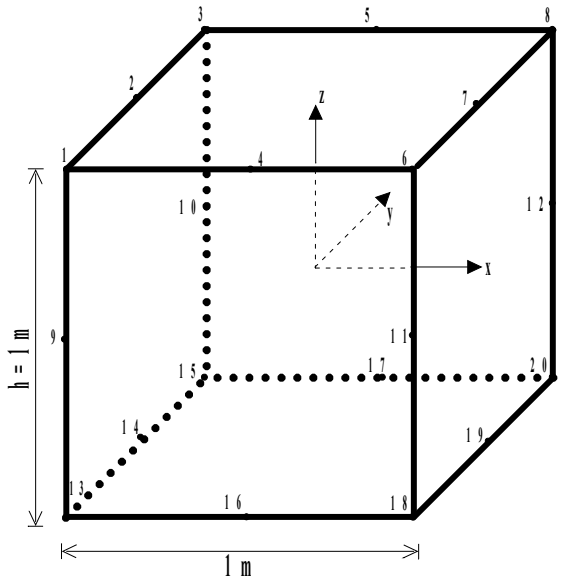
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

9 Modélisation G

Comportement du fluide : THMC = LIQU_SATU

9.1 Caractéristiques de la modélisation G

- Modélisation volumique
- 1 maille HEXA20 de la modélisation 3D_THM : THM_HEXA20



9.2 Grandeurs testées et résultats

Discrétisation en temps : Plusieurs pas de temps (16) pour étudier l'évolution de la pression pendant la phase transitoire jusqu'à se stabiliser. Le schéma en temps est implicite $(\vartheta=1)$.

Liste des instants de calcul en secondes :
$1,5,10,50,100,500,10^3,5.10^3,10^4,5.10^4,10^5,5.10^5,10^6,5.10^6,10^7,10^{10}$

Les inconnues nodales de pression de fluides évaluées dans Code_Aster sont des variations par rapport aux pressions initiales de référence définies sous le mot clé THM_INIT, c'est pourquoi ce tableau présente des variations de pression dans notre comparaison entre le calcul Code_Aster et la solution de référence.

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

Nœud	Numéro d'ordre	Pression	Référence (Pa)	Tolérance $(\%)$
NO20	1 (t=1 s)	*PRE1*	3,98.10 $^{-2}$	1.0
	2 (t=5 s)	*PRE1*	1,99.10 $^{-1}$	1.0
	3 (t=10 s)	*PRE1*	3,98.10 $^{-1}$	1.0
	4 (t=50 s)	*PRE1*	1,99	1.0
	8 (t=5.10 ^{3} s)	*PRE1*	1,95.10 $^{+2}$	1.0
	16 (t=10 ^{10} s)	*PRE1*	5.10 $^{+3}$	1.0
NO1	1 (t=1 s)	*PRE1*	-3,98.10 $^{-2}$	1.0
	2 (t=5 s)	*PRE1*	-1,99.10 $^{-1}$	1.0
	3 (t=10 s)	*PRE1*	-3,98.10 $^{-1}$	2.0
	4 (t=50 s)	*PRE1*	-1,99	2.0
	8 (t=5.10 ^{3} s)	*PRE1*	-1,95.10 $^{+2}$	1.0
	16 (t=10 ^{10} s)	*PRE1*	-5.10 $^{+3}$	1.0

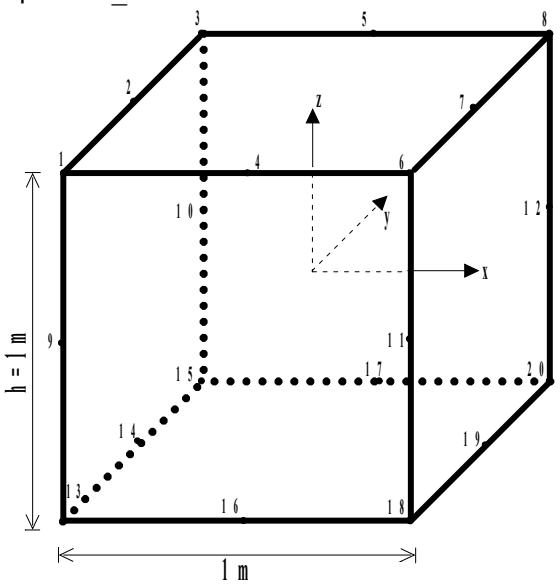
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

10 Modélisation H

Comportement du fluide : THMC = LIQU_GAZ_ATM avec une saturation constante $S=1$

10.1 Caractéristiques de la modélisation H

- Modélisation volumique : 3D_THM



1 maille HEXA20 de la modélisation 3D_THM : THM_HEXA20

10.2 Grandeurs testées et résultats

Discrétisation en temps : Plusieurs pas de temps (16) pour étudier l'évolution de la pression pendant la phase transitoire jusqu'à se stabiliser. Le schéma en temps est implicite $(\vartheta=1)$.

Liste des instants de calcul en secondes :
$1,5,10,50,100,500,10^3,5.10^3,10^4,5.10^4,10^5,5.10^5,10^6,5.10^6,10^7,10^{10}$

Les inconnues nodales de pression de fluide évaluées dans Code_Aster sont des variations par rapport aux pressions initiales de référence définies sous le mot clé THM_INIT , c'est pourquoi ce tableau présente des variations de pression dans notre comparaison entre le calcul Code_Aster et la solution de référence.

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

Nœud	Numéro d'ordre	Pression	Référence (Pa)	Tolérance $(\%)$
$NO20$	1 (t=1 s)	$PRE1$	-3,98.10 $^{-2}$	1.0
	2 (t=5 s)	$PRE1$	-1,99.10 $^{-1}$	1.0
	3 (t=10 s)	$PRE1$	-3,98.10 $^{-1}$	1.0
	4 (t=50 s)	$PRE1$	-1,99	1.0
	8 (t=5.10 ^{3} s)	$PRE1$	-1,95.10 $^{+2}$	1.0
	16 (t=10 ^{10} s)	$PRE1$	-5.10 $^{+3}$	1.0
$NO1$	1 (t=1 s)	$PRE1$	3,98.10 $^{-2}$	1.0
	2 (t=5 s)	$PRE1$	1,99.10 $^{-1}$	1.0
	3 (t=10 s)	$PRE1$	3,98.10 $^{-1}$	2.0
	4 (t=50 s)	$PRE1$	1,99	2.0
	8 (t=5.10 ^{3} s)	$PRE1$	1,95.10 $^{+2}$	1.0
	16 (t=10 ^{10} s)	$PRE1$	5.10 $^{+3}$	1.0

10.3 Remarques

De même que pour la modélisation bidimensionnelle, on remarque que les pressions calculées pour les deux comportements précédents (THMC=LIQU_SATU (modèle G) et THMC=LIQU_GAZ_ATM (modèle H)) sont égales en valeurs absolues. La différence de signes est due au fait que :

- pour le comportement THMC=LIQU_SATU, la pression $PRE1$ évaluée dans le code est la pression de l'eau ,
- et pour le comportement THMC=LIQU_GAZ, $PRE1$ est égale à la pression capillaire. La pression capillaire est égale à la différence entre la pression de gaz et la pression liquide. Dans le cas particulier où la pression d'air sec est la pression atmosphérique (THMC=LIQU_GAZ_ATM), la pression capillaire a pour valeur l'opposé de la pression liquide.

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

11 Modélisation I

Comportement du fluide : THMC = LIQU_SATU

11.1 Caractéristiques de la modélisation I

- Modélisation volumique
- 1 maille HEXA20 de la modélisation 3D_THMD : THM_HEXA20D

Ils 'agit de la même modélisation que G mais en lumpé (intégration aux sommets). Les résultats seront donc sensiblement différents du cas de référence. Il s'agit donc ici d'un cas de non régression.

11.2 Grandeurs testées et résultats

Ce test étant de non régression, on se contente d'une validation simple sur 2 instants.

Discrétisation en temps : Plusieurs pas de temps (16) pour étudier l'évolution de la pression pendant la phase transitoire jusqu'à se stabiliser. Le schéma en temps est implicite $(\vartheta = 1)$.

Liste des instants de calcul en secondes : $5.10^3, 10^{10}$

Nœud	Numéro d'ordre	Pression	Référence (Pa)	Tolérance $(\%)$
NO20	8 (t=5.10 ^{3} s)	*PRE1*	65	1.0
	16 (t=10 ^{10} s)	*PRE1*	5.10 $^{+3}$	1.0
NO1	8 (t=5.10 ^{3} s)	*PRE1*	-65	1.0
	16 (t=10 ^{10} s)	*PRE1*	-5.10 $^{+3}$	1.0

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

12 Modélisation J

Comportement du fluide : THMC = LIQU_SATU

12.1 Caractéristiques de la modélisation J

- Modélisation volumique
- 1 maille HEXA20 de la modélisation 3D_THMS : THM_HEXA20S

Ils 'agit de la même modélisation que G mais en sélectif (intégration aux sommets pour les termes évolutifs et aux points de Gauss pour les autres). Les résultats seront donc sensiblement différents du cas de référence. Il s'agit donc ici d'un cas de non régression.

12.2 Grandeurs testées et résultats

Ce test étant de non régression, on se contente d'une validation simple selon 2 instants.

Discrétisation en temps : Plusieurs pas de temps (16) pour étudier l'évolution de la pression pendant la phase transitoire jusqu'à se stabiliser. Le schéma en temps est implicite $(\vartheta = 1)$.

Liste des instants de calcul en secondes : $5.10^3 , 10^{10}$

Nœud	Numéro d'ordre	Pression	Référence (Pa)	Tolérance $(\%)$
NO20	8 (t=5.10 ^{3} s)	*PRE1*	65	1.0
	16 (t=10 ^{10} s)	*PRE1*	5.10 $^{+3}$	1.0
NO1	8 (t=5.10 ^{3} s)	*PRE1*	-65	1.0
	16 (t=10 ^{10} s)	*PRE1*	-5.10 $^{+3}$	1.0

Ce test sert aussi de validation du mot-clef OBSERVATION , sur la maille HEXA20 :

Observation	CHAMP	CMP	EVAL_ELGA	EVAL_CHAM
1	SIEF_ELGA	SIP	VALE - POINT =1	MIN
2	SIEF_ELGA	SIYY	MIN	MIN
3	SIEF_ELGA	SIZZ	MIN	MIN
3	SIEF_ELGA	SIP	MIN	MIN

Avec les résultats suivants (NON_REGRESSION) :

Observation	Numéro d'ordre	Référence (Pa)	Tolérance $(\%)$
1	16 (t=10 ^{10} s)	2886.7983561532	1,00E-006
2	16 (t=10 ^{10} s)	-4999.9526983562	1,00E-006
3	16 (t=10 ^{10} s)	-9.74094E-18	1,00E-012 (absolu)
4	16 (t=10 ^{10} s)	-6.21766E-17	1,00E-012 (absolu)
5 - MINI_ABS	16 (t=10 ^{10} s)	4999.9526983751	1,00E-006
6 - MAXI_ABS	16 (t=10 ^{10} s)	5000.0469320954	1,00E-006

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

13 Synthèse des résultats

Les valeurs du *Code_Aster* sont en très bon accord avec les valeurs de référence.

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