

## 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\_HEX20, modélisations G et H : éléments THM\_HEX20, I : THM\_HEX20D et J : THM\_HEX20S).

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.

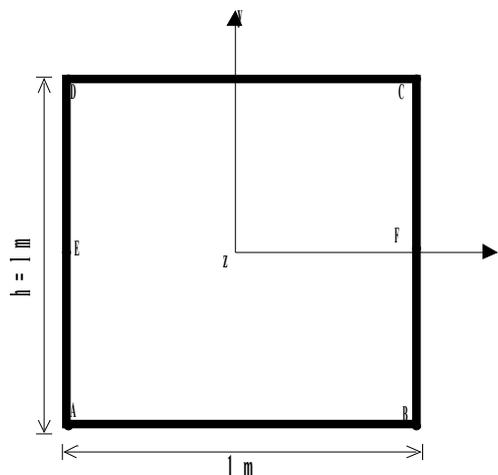
La solution de référence est unidimensionnelle car elle ne dépend que de la coordonnée verticale.

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

## 1.3 Propriétés du matériau

solide	Masse volumique ( $kg.m^{-3}$ )	$2. \times 10^3$
	Module d'Young drainé $E(Pa)$	$225. \times 10^6$
	Coefficient de Poisson	0.
Fluide (eau liquide)	Masse volumique ( $kg.m^{-3}$ )	$10^3$
	Compressibilité du liquide ( $Pa$ )	$2.65 \times 10^8$
	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 <i>Biot</i>	1.
	Porosité	0.4
Coefficients homogénéisés	Masse volumique homogénéisée ( $kg.m^{-3}$ )	$1.6 \times 10^3$
	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*,  $T=0^\circ$  .

## 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  $T_0=273^\circ K$

## 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 :

$$\frac{dm_i}{dt} + \text{Div } \mathbf{M}_i = 0 \quad i \text{ variant de } 1 \text{ au nombre de constituants} \quad (1)$$

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

$$\frac{dm_e}{dt} + \text{Div } \mathbf{M}_e = 0 \quad (2)$$

Le flux de fluide a pour expression :

$$\mathbf{M}_e = \rho_e \lambda_e (-\nabla p_e + \rho_e \mathbf{g}) \quad (3)$$

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  $\phi$ , du coefficient de Biot  $b$ , de la perméabilité du liquide  $K_e$  et de l'élasticité de la matrice solide  $K_s$ .

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

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

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

$$\int_{\Omega} N_{ee} \frac{dp_e}{dt} P_e^* + \int_{\Omega} \lambda_e \nabla p_e \cdot \nabla P_e^* = \int_{\Omega} \lambda_e \rho_e \mathbf{g} \cdot \nabla P_e^* - \int_{\partial\Omega} \frac{M_e^{ext}}{\rho_e} P_e^* \quad (6)$$

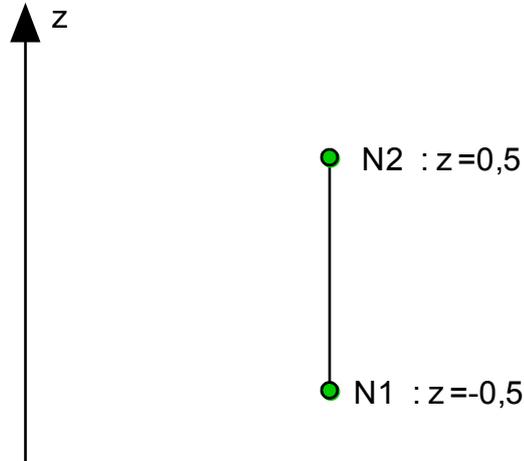
#### Discrétisation

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.

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

**Discretisation linéaire :**



On écrira :

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

Avec :

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

En introduisant alors les matrices et vecteurs :

$$\begin{aligned} [A] &= [A_{ij}] \quad ; \quad A_{ij} = \int_{-1/2}^{1/2} \lambda_i \lambda_j dz \\ [B] &= [B_{ij}] \quad ; \quad B_{ij} = \int_{-1/2}^{1/2} \frac{d\lambda_i}{dz} \frac{d\lambda_j}{dz} dz \\ \{F_g\} &= \{F_{gi}\} \quad ; \quad F_{gi} = \int_{-1/2}^{1/2} \frac{d\lambda_i}{dz} dz \end{aligned} \quad (9)$$

Et en notant :

$$\{p_e\} = \begin{pmatrix} p_e^1 \\ p_e^2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\{M_e^{ext}\} = \begin{pmatrix} M_{e1}^{ext} \\ M_{e2}^{ext} \end{pmatrix} \quad (11)$$

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 :

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

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

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

Et on pose :

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

On trouve :

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

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

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 :

$$p_e(x, t=0) = p_a^0 - p_c^0 \quad \text{uniformes en espace ;}$$

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

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

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 :

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

On trouve en revenant aux variables nodales :

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \alpha_1 - \alpha_2 \\ \alpha_1 + \alpha_2 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix}_{eau} = \begin{Bmatrix} P_a^0 - p_c^0 + \frac{\rho_e g}{2} \left( 1 - \exp\left(-12 \frac{\lambda_e}{N_{ee}} t\right) \right) \\ P_a^0 - p_c^0 - \frac{\rho_e g}{2} \left( 1 - \exp\left(-12 \frac{\lambda_e}{N_{ee}} t\right) \right) \end{Bmatrix} \quad (22)$$

## 2.2 Grandeur de référence

- 1) Évolution de la pression capillaire en fonction du temps aux points :

$C, D$  ( $z = h$ )

$A, B$  ( $z = 0$ )

- 1) Pour la discrétisation quadratique : Vérification de la valeur constante de la pression aux

nœuds  $E, F$  ( $z = \frac{h}{2}$ ).

## 2.3 Incertitudes

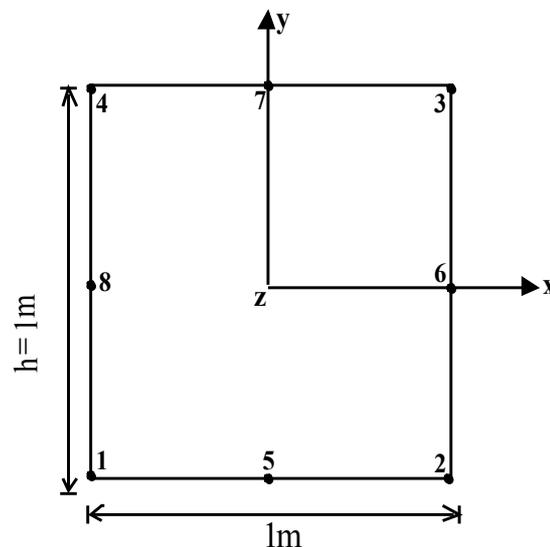
Solution analytique sur l'équation d'hydraulique, les incertitudes sont donc négligeables.

### 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 ( $\theta = 1$ ) .

Liste des instants de calcul en secondes :

1, 5, 10, 50, 100, 500,  $10^3$ ,  $5 \cdot 10^3$ ,  $10^4$ ,  $5 \cdot 10^4$ ,  $10^5$ ,  $5 \cdot 10^5$ ,  $10^6$ ,  $5 \cdot 10^6$ ,  $10^7$ ,  $10^{10}$  .

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.

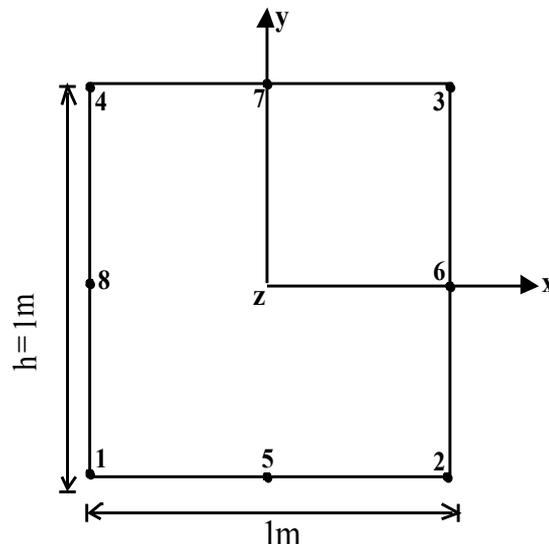
Nœud / point	Numéro d'ordre / instant (s)	Valeur	Référence (Pa)	Tolérance (%)
N1/A	1 (t=1 s)	PREI	$3,98.10^{-2}$	1.0
	2 (t=5 s)	PREI	$1,99.10^{-1}$	1.0
	3 (t=10 s)	PREI	$3,98.10^{-1}$	1.0
	4 (t=50 s)	PREI	1,99	1.0
	8 (t=5.10 <sup>3</sup> s)	PREI	$1,95.10^{+2}$	1.0
	16 (t=10 <sup>10</sup> s)	PREI	$5.10^{+3}$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

## 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,  $10^3$ ,  $5 \cdot 10^3$ ,  $10^4$ ,  $5 \cdot 10^4$ ,  $10^5$ ,  $5 \cdot 10^5$ ,  $10^6$ ,  $5 \cdot 10^6$ ,  $10^7$ ,  $10^{10}$

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.

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

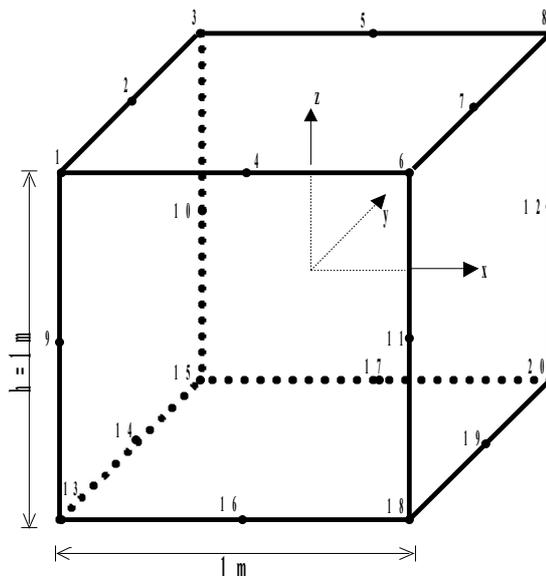
- la pression *PREI* évaluée dans le code est la pression de l'eau pour le comportement THMC=LIQU\_SATU,
- *PREI* est égale à la pression capillaire pour le comportement THMC=LIQU\_GAZ. La pression capillaire est égale à la différence entre la pression de gaz et la pression liquide. Dans le cas particulier 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.

## 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\_HEX20



### 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 ( $\theta=1$ ).

Liste des instants de calcul en secondes:

1, 5, 10, 50, 100, 500,  $10^3$ ,  $5 \cdot 10^3$ ,  $10^4$ ,  $5 \cdot 10^4$ ,  $10^5$ ,  $5 \cdot 10^5$ ,  $10^6$ ,  $5 \cdot 10^6$ ,  $10^7$ ,  $10^{10}$

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.

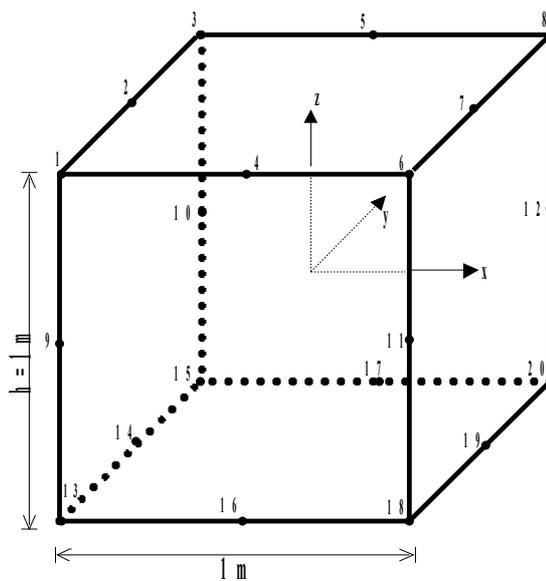
Nœud	Numéro d'ordre	Pression	Référence (Pa)	Tolérance (%)
NO20	1 (t=1 s)	PREI	$3,98.10^{-2}$	1.0
	2 (t=5 s)	PREI	$1,99.10^{-1}$	1.0
	3 (t=10 s)	PREI	$3,98.10^{-1}$	1.0
	4 (t=50 s)	PREI	1,99	1.0
	8 (t= $5.10^3$ s)	PREI	$1,95.10^{+2}$	1.0
	16 (t= $10^{10}$ s)	PREI	$5.10^{+3}$	1.0
NOI	1 (t=1 s)	PREI	$-3,98.10^{-2}$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

## 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\_HEX20



### 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 ( $\theta=1$ ).

Liste des instants de calcul en secondes :

1, 5, 10, 50, 100, 500,  $10^3$ ,  $5 \cdot 10^3$ ,  $10^4$ ,  $5 \cdot 10^4$ ,  $10^5$ ,  $5 \cdot 10^5$ ,  $10^6$ ,  $5 \cdot 10^6$ ,  $10^7$ ,  $10^{10}$

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.

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

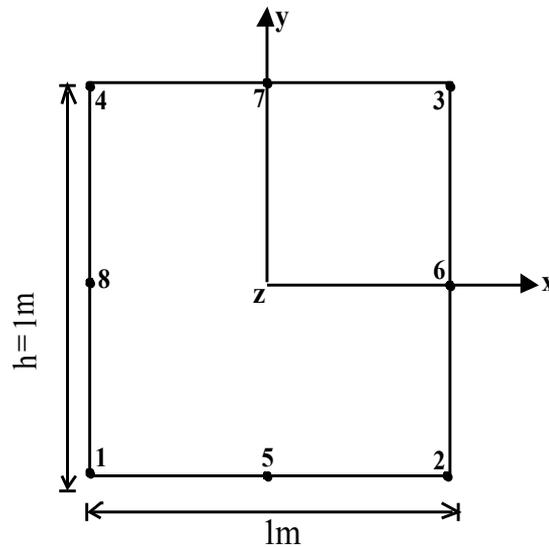
- pour le comportement THMC=LIQU\_SATU, la pression PREI évaluée dans le code est la pression de l'eau ,
- et pour le comportement THMC=LIQU\_GAZ, PREI est égale à la pression capillaire. La pression capillaire est égale à la différence entre la pression de gaz et la pression liquide. Dans le cas particulier 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.

## 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 ( $\theta=1$ ).

Liste des instants de calcul en secondes :

1, 5, 10, 50, 100, 500,  $10^3$ ,  $5 \cdot 10^3$ ,  $10^4$ ,  $5 \cdot 10^4$ ,  $10^5$ ,  $5 \cdot 10^5$ ,  $10^6$ ,  $5 \cdot 10^6$ ,  $10^7$ ,  $10^{10}$

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.

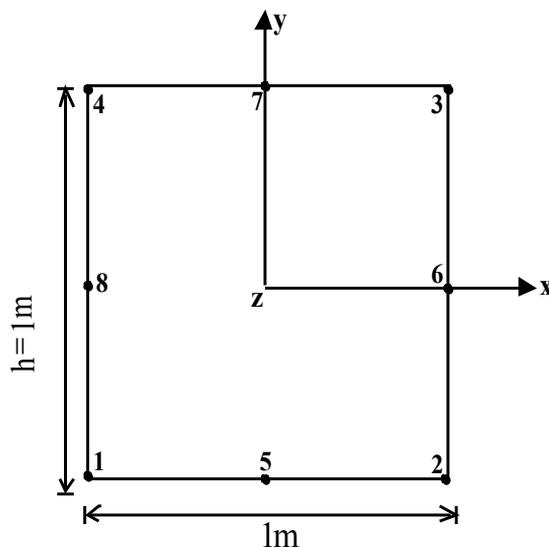
Nœud / point	Numéro d'ordre	Pression	Référence (Pa)	Tolérance (%)
<i>N1/A</i>	1 (t=1 s)	<i>PRE1</i>	$3,98.10^{-2}$	1.0
	2 (t=5 s)	<i>PRE1</i>	$1,99.10^{-1}$	1.0
	3 (t=10 s)	<i>PRE1</i>	$3,98.10^{-1}$	1.0
	4 (t=50 s)	<i>PRE1</i>	1,99	1.0
	8 (t= $5.10^3$ s)	<i>PRE1</i>	$1,95.10^{+2}$	1.0
	16 (t= $10^{10}$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

## 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,  $10^3$ ,  $5 \cdot 10^3$ ,  $10^4$ ,  $5 \cdot 10^4$ ,  $10^5$ ,  $5 \cdot 10^5$ ,  $10^6$ ,  $5 \cdot 10^6$ ,  $10^7$ ,  $10^{10}$

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.

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

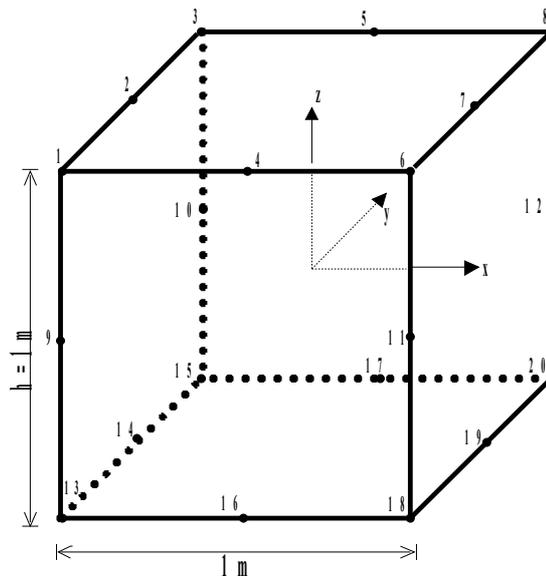
- la pression *PREI* évaluée dans le code est la pression de l'eau pour le comportement THMC=LIQU\_SATU,
- *PREI* est égale à la pression capillaire pour le comportement THMC=LIQU\_GAZ. La pression capillaire est égale à la différence entre la pression de gaz et la pression liquide. Dans le cas particulier 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.

## 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\_HEX20



### 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,  $10^3$ ,  $5 \cdot 10^3$ ,  $10^4$ ,  $5 \cdot 10^4$ ,  $10^5$ ,  $5 \cdot 10^5$ ,  $10^6$ ,  $5 \cdot 10^6$ ,  $10^7$ ,  $10^{10}$

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.

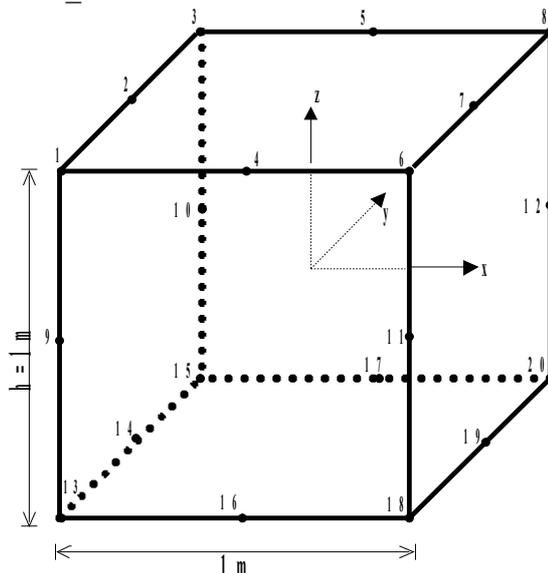
Nœud	Numéro d'ordre	Pression	Référence (Pa)	Tolérance (%)
NO20	1 (t=1 s)	PREI	$3,98.10^{-2}$	1.0
	2 (t=5 s)	PREI	$1,99.10^{-1}$	1.0
	3 (t=10 s)	PREI	$3,98.10^{-1}$	1.0
	4 (t=50 s)	PREI	1,99	1.0
	8 (t= $5.10^3$ s)	PREI	$1,95.10^{+2}$	1.0
	16 (t= $10^{10}$ s)	PREI	$5.10^{+3}$	1.0
NOI	1 (t=1 s)	PREI	$-3,98.10^{-2}$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

## 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\_HEX20

### 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 ( $\theta=1$ ) .

Liste des instants de calcul en secondes :

1, 5, 10, 50, 100, 500,  $10^3$ ,  $5 \cdot 10^3$ ,  $10^4$ ,  $5 \cdot 10^4$ ,  $10^5$ ,  $5 \cdot 10^5$ ,  $10^6$ ,  $5 \cdot 10^6$ ,  $10^7$ ,  $10^{10}$

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.

Nœud	Numéro d'ordre	Pression	Référence (Pa)	Tolérance (%)
NO20	1 (t=1 s)	PREI	$-3,98.10^{-2}$	1.0
	2 (t=5 s)	PREI	$-1,99.10^{-1}$	1.0
	3 (t=10 s)	PREI	$-3,98.10^{-1}$	1.0
	4 (t=50 s)	PREI	-1,99	1.0
	8 (t=5.10 <sup>3</sup> s)	PREI	$-1,95.10^{+2}$	1.0
	16 (t=10 <sup>10</sup> s)	PREI	$-5.10^{+3}$	1.0
NO1	1 (t=1 s)	PREI	$3,98.10^{-2}$	1.0
	2 (t=5 s)	PREI	$1,99.10^{-1}$	1.0
	3 (t=10 s)	PREI	$3,98.10^{-1}$	2.0
	4 (t=50 s)	PREI	1,99	2.0
	8 (t=5.10 <sup>3</sup> s)	PREI	$1,95.10^{+2}$	1.0
	16 (t=10 <sup>10</sup> s)	PREI	$5.10^{+3}$	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 *PREI* évaluée dans le code est la pression de l'eau ,
- et pour le comportement THMC=LIQU\_GAZ, *PREI* 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.

## 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\_HEX20D

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.

Discretisation 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 :  $5 \cdot 10^3, 10^{10}$

Nœud	Numéro d'ordre	Pression	Référence (Pa)	Tolérance (%)
NO20	8 (t= $5 \cdot 10^3$ s)	PRE1	65	1.0
	16 (t= $10^{10}$ s)	PRE1	$5 \cdot 10^{+3}$	1.0
NO1	8 (t= $5 \cdot 10^3$ s)	PRE1	-65	1.0
	16 (t= $10^{10}$ s)	PRE1	$-5 \cdot 10^{+3}$	1.0

## 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 :  $5 \cdot 10^3, 10^{10}$

Nœud	Numéro d'ordre	Pression	Référence (Pa)	Tolérance (%)
NO20	8 (t=5.10 <sup>3</sup> s)	PREI	65	1.0
	16 (t=10 <sup>10</sup> s)	PREI	5.10 <sup>+3</sup>	1.0
NO1	8 (t=5.10 <sup>3</sup> s)	PREI	-65	1.0
	16 (t=10 <sup>10</sup> s)	PREI	-5.10 <sup>+3</sup>	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 <sup>10</sup> s)	2886.7983561532	1.00E-006
2	16 (t=10 <sup>10</sup> s)	-4999.9526983562	1.00E-006
3	16 (t=10 <sup>10</sup> s)	-9.74094E-18	1,00E-012 (absolu)
4	16 (t=10 <sup>10</sup> s)	-6.21766E-17	1,00E-012 (absolu)
5 - MINI_ABS	16 (t=10 <sup>10</sup> s)	4999.9526983751	1.00E-006
6 - MAXI_ABS	16 (t=10 <sup>10</sup> s)	5000.0469320954	1.00E-006

## 13 Synthèse des résultats

---

Les valeurs du *Code\_Aster* sont en très bon accord avec les valeurs de référence.