

## WTNV114 - Flux hydrique sur un milieu poreux saturé

---

### Résumé :

On étudie le comportement hydraulique d'un milieu poreux saturé. Neuf modélisations sont effectuées : deux modélisations bidimensionnelles (modélisations A et B) et sept modélisations tridimensionnelles (modélisations C, D, E, F, G, H, I).

La distinction entre les modélisations réside dans la loi de comportement du fluide (`LIQU_SATU` pour les modélisations A, C, G, H, I et `LIQU_GAZ_ATM` pour les modélisations B, D, E, F).

Ce test consiste à appliquer un flux hydrique sur la face supérieure du modèle et à étudier l'effet de ce flux sur la distribution de la pression du fluide dans le milieu saturé. Il s'agit d'un problème évolutif.

Les huit premiers modèles étudiés sont 2D plans (`HM_DPQ8`) et 3D volumiques (`HM_HEX20` ou `HM_PYRAM13`) avec un comportement linéaire. Le dernier modèle est HM-XFEM.

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

## 1 Problème de référence

On étudie dans ce cas test le comportement hydraulique d'un milieu poreux saturé constitué par un seul fluide : l'eau dans sa phase liquide. Il s'agit dans *Code\_Aster* d'une modélisation HM. La loi de comportement du fluide associée est selon les modélisations soit de type LIQU\_SATU (modélisations A et C) soit de type LIQU\_GAZ\_ATM (modélisations B et D).

### 1.1 Géométrie

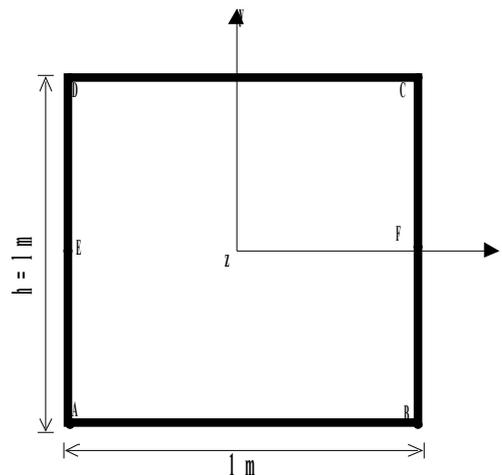


Illustration 1: Géométrie

Coordonnées des points ( $m$ ) :

$A(-0.5, -0.5)$  ;  $C(0.5, 0.5)$   
 $B(0.5, -0.5)$  ;  $D(-0.5, 0.5)$

## 1.2 Propriétés du matériau

Eau liquide	Masse volumique ( $kg.m^{-3}$ )	$10^3$
	Viscosité dynamique de l'eau liquide ( $Pa.s$ )	0.001
	1/Compressibilité ( $Pa^{-1}$ )	$K_e = 3.7710^{-9}$
Solide	Module d'Young drainé $E(Pa)$	$225 \cdot 10^6$
	Coefficient de Poisson	0
Etat initial	Porosité	0.4
	Température ( $K$ )	273
	Pression liquide ( $Pa$ )	0
	Pression de vapeur ( $Pa$ )	1
Constantes	Constante des gaz parfaits	8.32
Coefficients homogénéisés	Masse volumique homogénéisée ( $kg.m^{-3}$ )	1600
	Isotherme de sorption	$S(P_c) = 1$
	Coefficient de Biot	1
	Perméabilité intrinsèque ( $m^2$ )	$K_{int} = 10^{-18}$

Tableau 1.2-1: Données matériaux

La gravité de l'eau est négligée.

## 1.3 Conditions aux limites et chargements

Élément complet :

déplacements bloqués  $u_x = u_y = u_z = 0$

(il s'agit ici d'un cas purement hydraulique la mécanique étant bloquée).

Face supérieure :

flux hydrique :  $Q_{lq} = 0.005 \text{ kg.s}^{-1} . m^{-2}$

Face inférieure :

flux hydrique  $Q_{lq} = 0$

Faces latérales :

Ailleurs : flux nul

## 1.4 Conditions initiales

Les champs de déplacement, de pression de liquide sont initialement nuls et la température de référence vaut  $T_0 = 273 \text{ }^\circ K$ .

## 2 Solution de référence

### 2.1 Méthode de calcul

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

L'équation de conservation de la masse d'eau  $m_l$  est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{d m_l}{d t} + \text{Div } M_l = 0 \quad (1)$$

avec  $M_l$  le flux d'eau tel que, si on néglige la gravité :

$M_l = \rho_l \lambda_l (-\nabla p_l)$  avec  $p_l$  la pression de liquide,  $\rho_l$  sa masse volumique et  $\lambda_l$  sa conductivité hydraulique telle que  $\lambda_l = \frac{K_{int}}{\mu}$ .  $K_{int}$  est la perméabilité intrinsèque et  $\mu$  la viscosité du liquide.

En considérant un solide indéformable, on peut écrire que

$\frac{d m_l}{d t} = \rho_l \frac{\phi}{K_l} \frac{d p_l}{d t}$  avec  $\phi$  la porosité et  $K_l$  la compressibilité de l'eau. On note  $N = \frac{\phi}{K_l}$ .

L'équation (1) devient alors :

$$\rho_l N \frac{d p_l}{d t} + \text{Div}(\rho_l \lambda_l (-\nabla p_l)) = 0$$

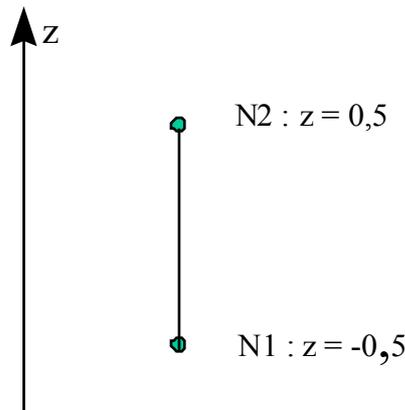
dont la formulation variationnelle est la suivante :

$$\int_{\Omega} N \frac{d p_l}{d t} \cdot \hat{p}_l + \int_{\Omega} \lambda_l \nabla p_l \nabla \hat{p}_l = - \int_{\partial \Omega} \frac{M^{ext}}{\rho_l} \hat{p}_l \quad (2)$$

avec  $M^{ext}$  le chargement extérieur.

Pour établir la solution on se place dans le cas unidimensionnel et on adopte une discrétisation correspondant à un unique élément de degré 1 puisque en modélisation THM la partie hydraulique est traitée sur des éléments linéaires. On suppose également que les non linéarités sont faibles dans ce cas et que les coefficients  $N$  et  $\rho_l$  sont constants ce qui suppose une variation relativement faibles de la pression.

Soit un élément linéaire :



On écrit alors la pression sur la base des fonctions de formes tel que :

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

avec

$$\lambda_1(z) = 0,5(1 + 2z)$$

$$\lambda_2(z) = 0,5(1 - 2z)$$

On introduit alors les matrices suivantes :

$$[A] = [A_{ij}]; A_{ij} = \int_{-0,5}^{0,5} \lambda_i \lambda_j dz$$

$$[B] = [B_{ij}]; B_{ij} = \int_{-0,5}^{0,5} \frac{\partial \lambda_i}{\partial z} \frac{\partial \lambda_j}{\partial z} dz$$

ce qui conduit à

et

$$[A] = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad [B] = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

On note ensuite classiquement :

$$\{p_i\} = \begin{Bmatrix} P_i^1 \\ P_i^2 \end{Bmatrix} \quad \{M^{ext}\} = \begin{Bmatrix} M^{ext1} \\ M^{ext2} \end{Bmatrix}$$

Sachant qu'on injecte un flux d'eau Q sur la face supérieure, on a donc

$$\{M^{ext}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -Q \end{Bmatrix}$$

L'équation (2) devient

$$\frac{N}{\lambda_i} [A] \left\{ \frac{dp_i}{dt} \right\} + [B] \{p_i\} = \frac{-1}{\lambda_i \rho} \{M^{ext}\}$$

Considérant que pour des variations de temps courts  $\Delta t$ , l'évolution de p est quasiment linéaire, on peut écrire que

$$\left\{ \frac{dp_i}{dt} \right\} = \frac{1}{\Delta t} \begin{Bmatrix} P_i^1 - p_0^1 \\ P_i^2 - p_0^2 \end{Bmatrix}$$

et comme on part ici d'un état initial de pression nulle, on aura

$$\left\{ \frac{dp_i}{dt} \right\} = \frac{1}{\Delta t} \begin{Bmatrix} P_i^1 \\ P_i^2 \end{Bmatrix}$$

Finalement on obtient le système de deux équations à deux inconnues :

$$p_i^1 \left( \frac{N}{\lambda_i \Delta t} + 6 \right) - 6p_i^2 = \frac{-2Q}{\lambda_i \rho_i}$$

$$p_i^2 \left( \frac{N}{\lambda_i \Delta t} + 6 \right) - 6p_i^1 = \frac{-4Q}{\lambda_i \rho_i}$$

On a alors le résultat suivant :

$$\begin{Bmatrix} P_i^1 \\ P_i^2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{N}{\lambda_i \Delta t} + 6 & -6 \\ -6 & \frac{N}{\lambda_i \Delta t} + 6 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{-2Q}{\lambda_i \rho_i} \\ \frac{-4Q}{\lambda_i \rho_i} \end{Bmatrix}$$

## 2.2 Grandeurs et résultats de référence

## 2.3 Incertitudes sur la solution

## 3 Modélisation A

### 3.1 Caractéristiques de la modélisation

- Modélisation en déformations planes `D_PLAN_HM`.
- Comportement hydraulique `LIQU_SATU`.

### 3.2 Caractéristique du maillage

1 éléments `Q8`.

### 3.3 Grandeurs et résultats testés

Discretisation en temps : 7 pas de temps croissant. La liste d'instant en secondes est : (1,5,10,50,100,500,1000) .

Si l'on regarde la géométrie du problème le nœud A (numéro N1) correspond à la pression  $p^1$  et le nœud C à la pression  $p^2$

Tableau de résultats aux différents instants :

$N^\circ$ NŒUD	Numéro d'ordre	$PREI(Pa)$	Tolérance (%)
$N1, A$	1	$-6.631 \times 10^3$	5
	2	$-3.315 \times 10^4$	5
	3	$-6.631 \times 10^4$	5
	4	$-3.314 \times 10^5$	5
	7	$-6.553 \times 10^5$	5
$N3, C$	1	$1.326 \times 10^4$	5
	2	$6.631 \times 10^4$	5
	3	$1.326 \times 10^5$	5
	4	$6.629 \times 10^5$	5
	7	$1.318 \times 10^7$	5

Tableau 1: Résultats

Les résultats sont en parfait accord avec la solution analytique.

## 4 Modélisation B

Il s'agit de la même modélisation mais avec une loi de comportement hydraulique `LIQU_GAZ_ATM`. On a donc une phase gazeuse constante à 1atm (hypothèse de Richard). Les résultats sont logiquement exactement les mêmes que ci-dessus.

## 5 Modélisation C

Il s'agit de la même modélisation qu'en A mais sur un cube 3D (1 élément `HEXA20`). Les conditions sur les faces de devant et de derrière sont des flux et déplacements nuls. Il s'agit donc du même cas qu'en 2D et les résultats sont logiquement identiques.

## 6 Modélisation D

Il s'agit de la même modélisation qu'en C mais avec une loi de comportement hydraulique LIQU\_GAZ\_ATM. On a donc une phase gazeuse constante à 1atm (hypothèse de Richard). Les résultats sont logiquement exactement les mêmes que ci-dessus.

## 7 Modélisation E

Exactement le même cas que la modélisation D mais en testant l'option SYME='OUI' du solveur linéaire.

Les résultats sont logiquement les mêmes que pour la modélisation D.

## 8 Modélisation F

Cette modélisation est la même que la modélisation D mais en modélisation sélective. L'intégration est donc différente : l'intégration des termes instationnaires se fait aux nœuds et celle des autres termes aux points de Gauss.

Les résultats sur un élément diffèrent donc logiquement.

Tableau de résultats aux différents instants :

N° NŒUD	Numéro d'ordre	PREI (Pa)	Tolérance (%)
N20, A	1	$8.79 \times 10^{-6}$	5
	2	$1.84 \times 10^{-4}$	5
	3	$6.24 \times 10^{-4}$	5
	4	0.018	5
	7	6.20	5
NI, C	1	$6.63 \times 10^3$	5
	2	$3.31 \times 10^4$	5
	3	$6.63 \times 10^4$	5
	4	$3.31 \times 10^5$	5
	7	$6.68 \times 10^6$	5

Tableau 8-1: Résultats

## 9 Modélisation G

Avec la modélisation G, on entreprend de valider la maille PYRAM13 pour les modélisations HM. On compare le comportement d'un HEXA20 de la modélisation H par rapport à 6 PYRAM13.

### 9.1 Caractéristiques de la modélisation

- Modélisation en déformations planes 3D\_HM.
- Comportement hydraulique LIQU\_SATU.

### 9.2 Caractéristique du maillage

6 éléments P13.

Le maillage est représenté sur la figure 9-1.

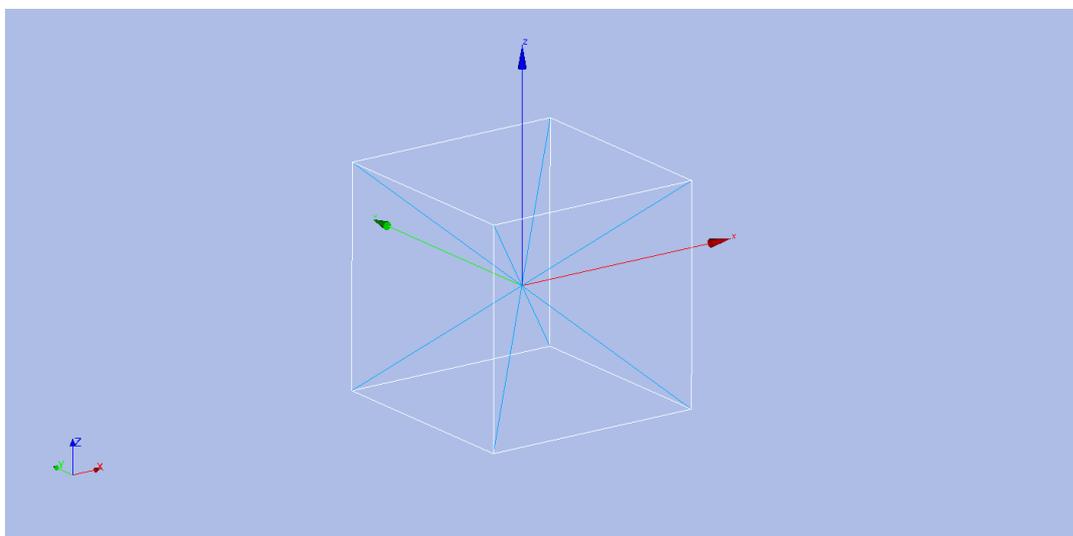


Figure 9-1 : Maillage pyramidal

Le régime transitoire d'établissement du flux étant très sensible à la structure, on diminue l'inverse de la compressibilité du fluide qui passe à  $1.0 E - 18$  et on réalise les tests au pas de temps 8 (10000) de manière à dépasser le régime transitoire.

### 9.3 Grandeurs testées et résultats

On teste en non-régression les valeurs minimales et maximales de la pression de pore sur la face inférieure et la face supérieure du cube.

## 10 Modélisation H

---

### 10.1 Caractéristiques de la modélisation

- Modélisation en déformations planes 3D\_HM.
- Comportement hydraulique LIQU\_SATU.

### 10.2 Caractéristique du maillage

Le cube est composé d'un HEXA20 au lieu de 6 PYRAM13.

### 10.3 Grandeurs testées et résultats

On teste en non-régression les valeurs minimales et maximales de la pression de pore sur la face inférieure et la face supérieure du cube.

Ces résultats, très proches de ceux obtenus dans la modélisation G, assurent que le comportement hydraulique des mailles HM\_PYRAM13 est identique à celui des mailles HM\_HEX20.

## 11 Modélisation I

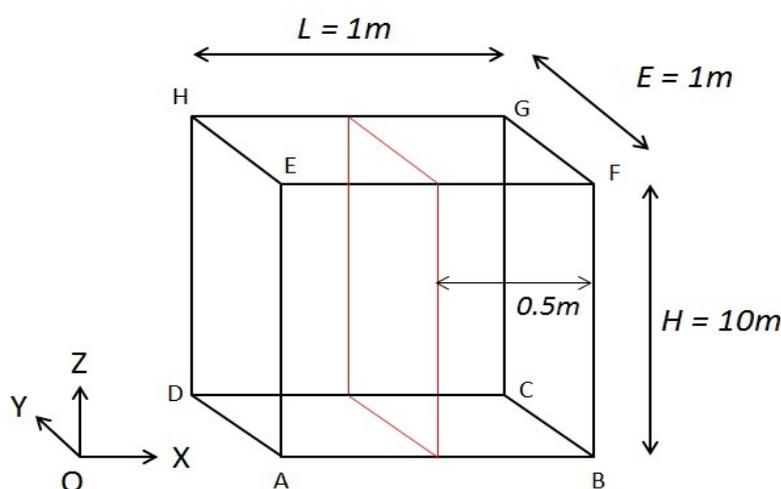
### 11.1 Caractéristiques de la modélisation

Cette modélisation est une modélisation HM-XFEM .

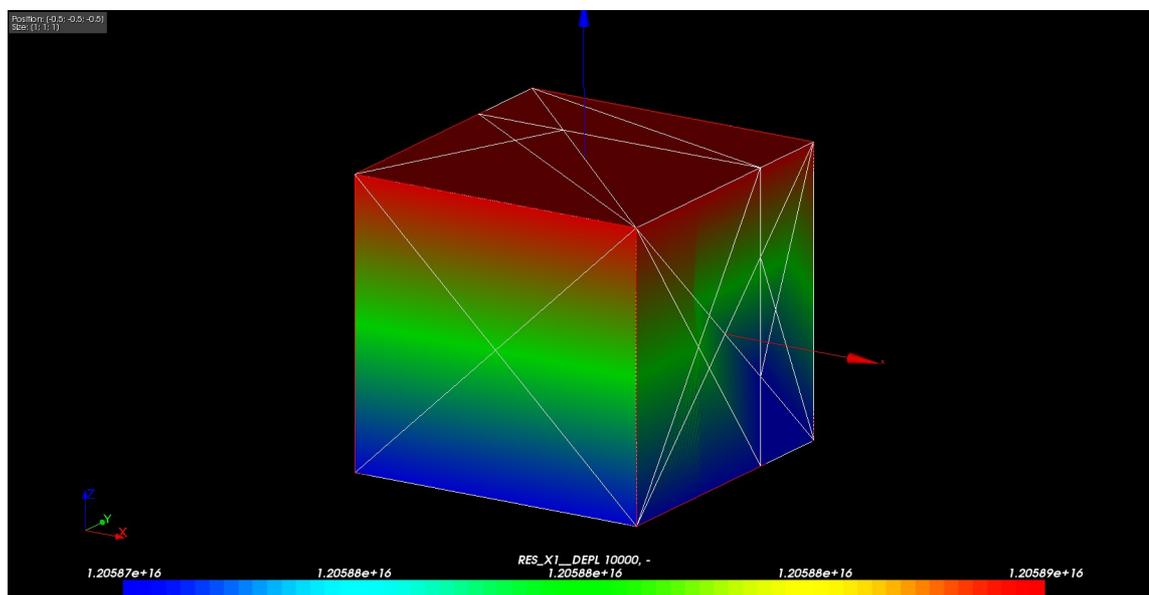
- Modélisation en déformations planes 3D\_HM ;
- Comportement hydraulique LIQU\_SATU.

### 11.2 Caractéristiques de la modélisation

Le maillage initial est le même que dans la modélisation H mais le cube est coupé en deux par une fissure verticale.



On applique les mêmes conditions aux limites que dans la modélisation H. Dans cette modélisation, les éléments de bords situés sur les faces supérieures et inférieures du cube et sur lesquels sont appliquées les conditions aux limites sont des éléments de bord HM-XFEM non conformes à la fissure. Ils sont ensuite découpés en sous-éléments de manière à être compatibles avec la fissure. Aucun chargement n'est appliqué au niveau de la fissure.



## 11.3 Grandeurs et résultats testés

On teste en non régression les valeurs minimales et maximales de la pression de pore sur la face inférieure et la face supérieure du cube.

Ces résultats, très proches de ceux obtenus dans la modélisation H, assurent que le comportement hydraulique des éléments `HM-XFEM` est similaire au comportement hydraulique des éléments HM. En particulier, l'option `CHAR_MECA_FLUX` est validée pour les éléments `HM-XFEM`.

## 12 Synthèse des résultats

---

Les résultats sont cohérents physiquement. Les modélisations A à E admettent une solution analytique qui est parfaitement vérifiée.