WTNV147 - Couplage hydromécanique dans une colonne poro-élastique et fracturée : utilisation de la méthode XFEM

Résumé :

Le but de ce test est de s'assurer du bon fonctionnement du couplage hydrodynamique entre l'interface cohésive et la matrice poreuse pour des éléments hydromécaniques couplés avec XFEM. Ce test est donc purement hydrodynamique, tous les degrés de liberté de déplacements sont bloqués à zéro. La modélisation A est bidimensionnelle tandis que la modélisation B est tridimensionnelle.

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

1 Problème de référence

1.1 Géométrie du problème

Il s'agit d'une colonne de hauteur $LZ=5\,m$, de longueur $LX=1\,m$ et de largeur $LY=1\,m$. Cette colonne présente en $Z=\frac{LZ}{2}$ une discontinuité de type interface. La colonne est ainsi entièrement traversée par la discontinuité.

On représente sur la Figure 1.1-a la géométrie de la colonne.

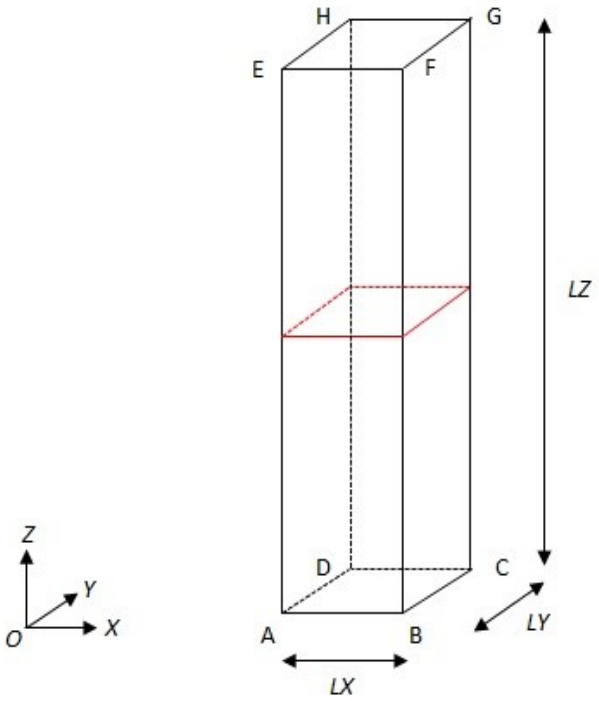


Figure 1.1-a: Géométrie du problème

1.2 Propriétés matériaux

Les paramètres donnés dans le Tableau 1.2-1, correspondent aux paramètres utilisés pour la modélisation dans le cas couplé hydromécanique. La loi de couplage utilisée est `'LIQU_SATU'`. Les paramètres spécifiques à cette loi de couplage sont donnés mais n'ont aucune influence sur la solution (car nous avons choisi de prendre une pression de pore uniformément nulle dans tout le domaine). Seuls les paramètres élastiques ont une influence sur la solution du problème pseudo-couplé.

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

Liquide (eau)	Viscosité $\mu_w(en\ Pa.s)$	1,0
	Module de compressibilité $\frac{1}{K_w}(en\ Pa^{-1})$	5.10^{-10}
	Densité du liquide $\rho_w(en\ kg/m^3)$	1
Paramètres élastiques	Module de Young $E(en\ MPa)$	5800
	Coefficient de Poisson ν	0
	Coefficient de dilatation thermique $\alpha(en\ K^{-1})$	0
Paramètres de couplage	Coefficient de Biot b	1
	Masse volumique homogénéisée initiale $r_0(en\ kg/m^3)$	2,5
	Perméabilité intrinsèque $K^{\text{int}}(en\ m^2)$	$1,01937^{-9}$
Paramètres de la loi cohésive	Contrainte critique $\sigma_c(en\ MPa)$	1.1
	Energie cohésive $G_c(en\ Pa.m)$	900
	Coefficient d'augmentation r	10

Tableau 1.2-1 : Propriétés du matériau

D'autre part, les forces liées à la pesanteur (dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement) sont négligées. La pression de pore de référence est prise nulle $p_1^{\text{ref}}=0\ MPa$ et la porosité du matériau est $\varphi = 0,15$.

1.3 Conditions aux limites

On applique les conditions de Dirichlet suivantes :

- dans l'ensemble du domaine, les déplacements sont bloqués à zéro ($u_x=0$, $u_y=0$ et $u_z=0$ dans le cas tridimensionnel),
- sur les faces [ABCD] et [EFGH], la pression de pore est bloquée à zéro,
- dans l'interface cohésive, on impose une pression de fluide $p_f=10\ MPa$.

La pression de pore initiale dans la matrice est nulle. On effectue le test sur une durée totale $t=10\ s$. Le paramètre θ est pris égal à $0,56999999$.

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

2 Solution de référence

2.1 Méthode de calcul

Il s'agit d'une solution analytique. La pression de fluide p_f imposée dans l'interface cohésive est transmise à la pression de pore au niveau des lèvres de l'interface cohésive (cf Documentation [R7.02.18]). Compte tenu des conditions aux limites, tout se passe comme si un échelon de pression de pore était imposé à l'extrémité des deux sous colonnes formées par l'interface cohésive. Le problème est donc unidirectionnel. Ces deux sous colonnes sont figées car les déplacements sont bloqués. En négligeant la pesanteur, l'équation de conservation de la masse dans la matrice poreuse s'écrit de la manière suivante :

$$\frac{\partial m_w}{\partial t}+\nabla\cdot\boldsymbol{M}=0$$

avec $m_w=\rho\varphi\left(1+\epsilon_v\right)$ les apports massiques dans la matrice poreuse et $\boldsymbol{M}=\frac{-\rho K^{\text{int}}}{\mu_w}\nabla p$ le flux de fluide Darcéen dans la matrice poreuse. Les déplacements étant bloqués, la déformation volumique ϵ_v est nulle. Par ailleurs, $d\varphi=(b-\varphi)(d\epsilon_v+\frac{dp}{K_s})$ avec K_s le module de compressibilité de la matrice solide. Or la matrice solide est supposée incompressible car nous avons pris $b=1$ (et $b=1-\frac{K_m}{K_s}$ avec K_S le module de compressibilité du milieu poreux). Donc finalement $d\varphi=0$. Enfin $\frac{d\rho}{\rho}=\frac{dp}{K_w}$. L'équation de conservation de la masse se réécrit donc :

$$\frac{\rho\varphi}{K_w}\frac{\partial p}{\partial t}-\frac{K^{\text{int}}}{\mu_w}[\nabla p\cdot\nabla\rho+\rho\Delta p]=0$$

En négligeant le terme du deuxième ordre $\nabla p\cdot\nabla\rho$, il vient :

$$\frac{\varphi\mu_w}{K_w K^{\text{int}}}\frac{\partial p}{\partial t}=\Delta p$$

Il s'agit d'une équation de diffusion. Le coefficient $\frac{\varphi\mu_w}{K_w K^{\text{int}}}$ à la dimension d'un temps sur une longueur au carré. Dans notre problème, la dimension caractéristique pour la diffusion est $\frac{LZ}{2}$. On en déduit un temps caractéristique de diffusion $\tau=\frac{\varphi\mu_w}{K_w K^{\text{int}}}*\left(\frac{LZ}{2}\right)^2$. Ce temps caractéristique vaut $\tau=0{,}459842\,s$. Au bout de $t=10\,s$, la diffusion est donc achevée, la pression de pore dans la matrice poreuse vérifie alors $\Delta p=0$.

D'après les conditions au limites, en dessous de l'interface :

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

- la pression de pore vaut $p(y)=\frac{2y}{LZ}p_f$ et le flux de fluide dans la matrice vaut $\boldsymbol{M}=\frac{-2\rho K^{\text{int}} p_f}{LZ\mu_w}$.

Et au dessus de l'interface :

- la pression de pore vaut $p(y)=(1-\frac{y}{LZ})2p_f$ et le flux de fluide dans la matrice vaut $\boldsymbol{M}=\frac{2\rho K^{\text{int}} p_f}{LZ\mu_w}$.

2.2 Grandeurs et résultats de référence

On teste la valeur des flux sortants de l'interface cohésive vers les parties inférieures et supérieures de de la colonne poreuse ainsi que la valeur de la pression de pore en $z=4\,m$ et $z=6\,m$.

Grandeurs testées	Valeur
LAG_FLI (Flux sortant de l'interface vers la partie inférieure de la colonne)	4,07748 kg·m²/s
LAG_FLS (Flux sortant de l'interface vers la partie supérieure de la colonne)	4,07748 kg·m²/s
PRE1 (à Z=4m)	8Mpa
PRE1 (à Z=6m)	8Mpa

2.3 Incertitudes sur la solution

La solution de référence est analytique.

2.4 Références bibliographiques

[1] Documentation de référence R7.02.18 (Éléments hydromécaniques couplés avec la méthode des Éléments Finis Étendue).

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

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit d'une modélisation D_PLAN_HM utilisant des éléments HM-XFEM quadratiques. Le barreau sur lequel on effectue la modélisation est divisé en 5 QUAD8. L'interface est non maillée et coupe l'élément central. Ainsi on a 3 éléments HM-XFEM et 2 éléments HM classiques. Comme indiqué sur la Figure 3.1-a, les 3 éléments XFEM subissent un sous découpage en sous triangles (pour effectuer l'intégration de Gauss-Legendre de part et d'autre des lèvres de l'interface, mais ces sous-éléments triangulaires ne sont pas des éléments du maillage).

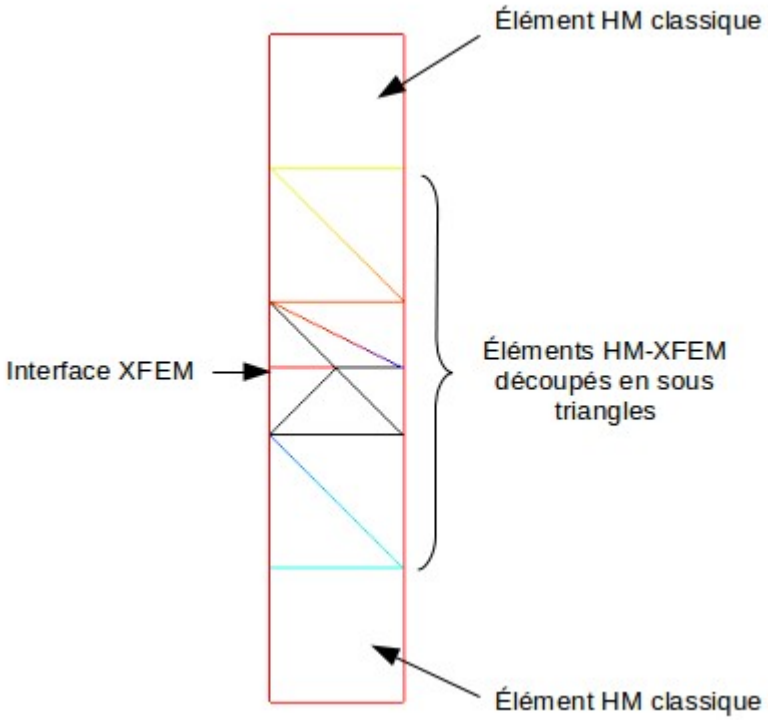


Figure 3.1-a: Caractéristiques de la modélisation

3.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est constitué de 5 mailles quadrangles quadratiques (QUAD8).

3.3 Grandeurs testées et résultats

Les résultats (résolution avec STAT_NON_LINE) sont synthétisés dans le tableau ci-dessous. Pour tester tous les nœuds du barreau en même temps, on calcule le MIN et le MAX.

Grandeurs testées	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance (%)
PRE1 (Y=4mand Y=6m) MIN	'ANALYTIQUE'	8 MPa	0,001
PRE1 (Y=4mand Y=6m) MAX	'ANALYTIQUE'	8 MPa	0,001
LAG_FLI (au dessous) MIN	'ANALYTIQUE'	4.07748 kg.m²/s	0,01
LAG_FLS (au dessus) MAX	'ANALYTIQUE'	4.07748 kg.m²/s	0,01

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

On peut constater (à partir de la Figure 3.3-a) une discontinuité franche de la dérivée première du champ champ de pression de pore dans l'élément central au niveau de l'interface cohésive. Cela suggère la bonne prise en compte de l'enrichissement dans l'approximation du champ de pression de pore par la fonction Heaviside. Par ailleurs, la pression de fluide dans l'interface p_f est bien « transmise » à la matrice poreuse, de part et d'autre de l'interface cohésive.

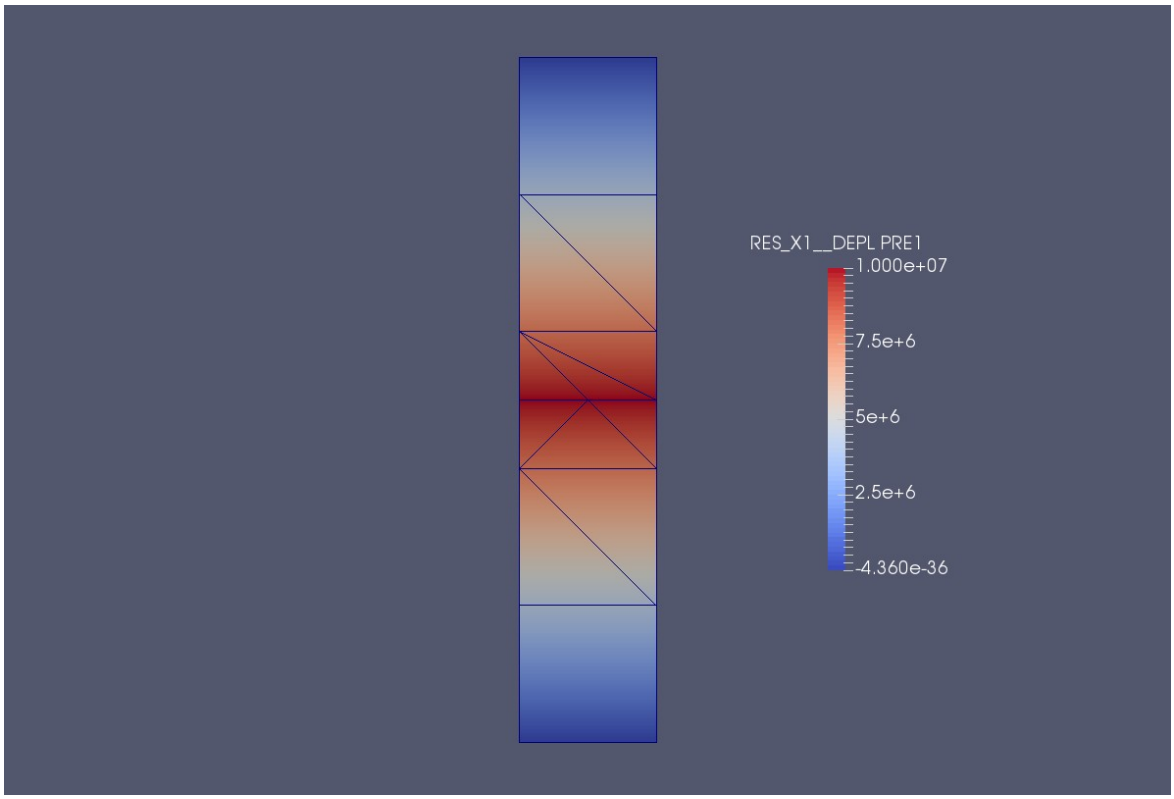


Figure 3.3-a: Champ de pression de pore à t=10s

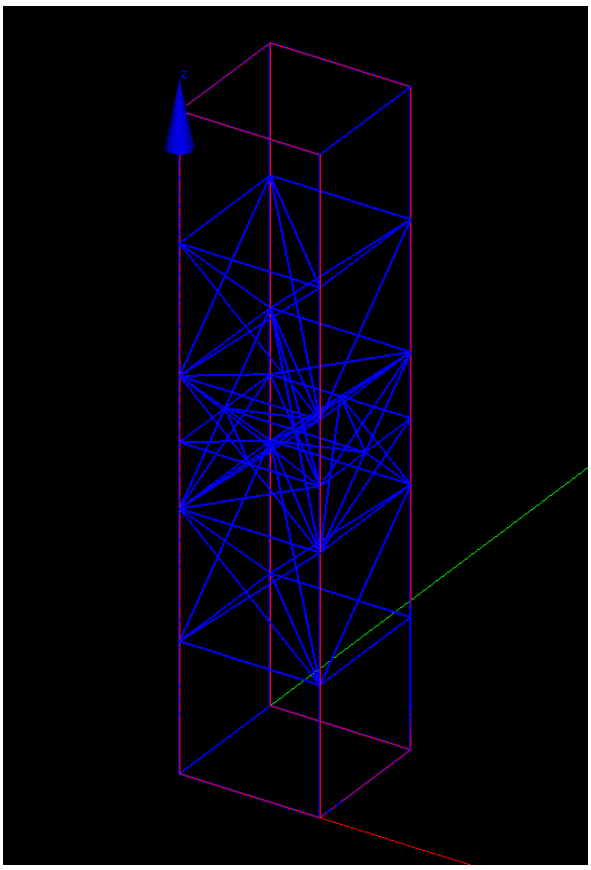
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit d'une modélisation 3D_HM utilisant des éléments HM-XFEM quadratiques. La colonne sur laquelle on effectue la modélisation est divisée en 5 HEXA20. L'interface est non maillée et coupe l'élément central. Ainsi on a 3 éléments HM-XFEM et 2 éléments HM classiques (les deux hexaèdres qui forment les extrémités de la colonne). Comme indiqué sur la Figure 4.1-a, les 3 éléments XFEM subissent un sous découpage en sous tétraèdres (pour effectuer l'intégration de Gauss-Legendre de part et d'autre des lèvres de l'interface, mais ces sous-éléments tétraèdres ne sont pas des éléments du maillage).

Figure 4.1-a: Caractéristiques de la modélisation



4.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est constitué de 5 mailles hexaédriques quadratiques (HEXA20).

4.3 Grandeurs testées et résultats

Les résultats (résolution avec STAT_NON_LINE) sont synthétisés dans le tableau ci-dessous. Pour tester tous les nœuds du barreau en même temps, on calcule le MIN et le MAX.

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

Grandeurs testées	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance (%)
PRE1 (Z=4mand Z=6m) MIN	'ANALYTIQUE'	8 MPa	0,001
PRE1 (Z=4mand Z=6m) MAX	'ANALYTIQUE'	8 MPa	0,001
LAG_FLI (au dessous) MIN	'ANALYTIQUE'	4.07748 kg.m²/s	0,01
LAG_FLS (au dessus) MAX	'ANALYTIQUE'	4.07748 kg.m²/s	0,01

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

5 Synthèse des résultats

Ce test permet de valider le couplage hydrodynamique entre l'interface cohésive et la matrice poreuse pour les éléments cohésifs HM-XFEM, en particulier via les flux sortants de l'interface cohésive LAG_FLI et LAG_FLS. On valide aussi la bonne prise en compte de l'enrichissement dans l'approximation du champ de pression de pore par la fonction Heaviside.

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