WTNV145 - Application d'une pression répartie sur les lèvres d'une jonction de fissure XFEM pour le cas hydromécanique

Résumé :

Il s'agit d'un premier test de validation afin de s'assurer du bon fonctionnement de la méthode des éléments finis étendue dans le modèle de couplage HM en milieu saturé fracturé. Dans ce test nous cherchons à vérifier dans le cas où la pression de pore est prise uniformément nulle dans tout le domaine d'étude (*i.e* afin de se placer dans un cas mécanique « classique » sans couplage), qu'il existe bien une discontinuité du champ de déplacements de part et d'autre de l'interface. Les résultats sont comparés à une solution analytique et aux résultats obtenus avec un test XFEM mécanique (semblables aux tests ssnv203, modélisations F et H).

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

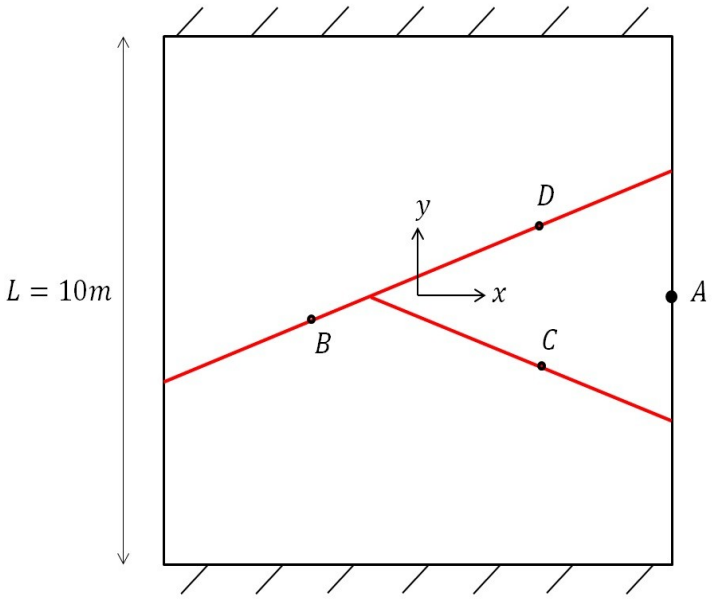
1 Problème de référence

1.1 Géométrie du problème 2D (modélisation A)

Il s'agit d'un bloc carré de côté $L=10\,m$. Ce bloc présente deux discontinuité discontinuités de type interface (interface non maillée qui est introduite dans le modèle par l'intermédiaire des level-sets grâce à l'opérateur DEFI_FISS_XFEM). La première est repérée par la level-set normale d'équation $lsn_1=Y-0.5\mathrm{X}-0.2$ et traverse entièrement la bloc dans la direction horizontale. La deuxième interface est repérée par la level-set normale d'équation $lsn_2=Y+0.5\mathrm{X}+0.2$. Elle se branche sur la lèvre inférieure de la première interface. La deuxième interface n'existe donc que dans la partie du bloc telle que $lsn_1<0$. Le point de jonction entre les deux interfaces vérifie $lsn_1=lsn_2=0$ et a pour coordonnées $(-0.4,0)$. Le domaine est ainsi découpé en 3 blocs, un bloc inférieur, un bloc supérieur et un bloc intermédiaire situé entre les deux interfaces. Les points $A(5,0)$, $B(-3,-1.3)$, $C(3,-1.7)$ et $D(3,1.7)$ seront utilisés pour l'application des conditions aux limites et l'évaluation des grandeurs testées.

On représente sur la Figure 1.1-a la géométrie du bloc.

Figure 1.1-a: Géométrie du problème 2D



1.2 Géométrie du problème 3D (modélisation B)

Il s'agit d'un bloc de hauteur $LZ=10\,m$, de longueur $LX=10\,m$ et de largeur $LY=2\,m$. Ce bloc présente deux discontinuité discontinuités de type interface (interface non maillée qui est introduite dans le modèle par l'intermédiaire des level-sets grâce à l'opérateur DEFI_FISS_XFEM). La première est repérée par la level-set normale d'équation $lsn_1=Z-0.5\mathrm{X}-0.2$ et traverse entièrement la bloc dans la direction horizontale. La deuxième interface est repérée par la level-set normale d'équation $lsn_2=Z+0.5\mathrm{X}+0.2$. Elle se branche sur la lèvre inférieure de la première interface. La deuxième interface n'existe donc que dans la partie du bloc telle que $lsn_1<0$. La

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

courbe de jonction entre les deux interfaces vérifie $lsn_1 = lsn_2 = 0$ et a pour équation $\begin{cases} X = -0.4 \\ Z = 0 \end{cases}$. Le domaine est ainsi découpé en 3 blocs, un bloc inférieur, un bloc supérieur et un bloc intermédiaire situé entre les deux interfaces. Les points $A_1(5,-1,0)$, $A_2(5,1,0)$ $B(-3,-1,-1,3)$, $C(3,-1,-1.7)$ et $D(3,-1,1.7)$ seront utilisés pour l'application des conditions aux limites et l'évaluation des grandeurs testées.

On représente sur la Figure 1.2-a la géométrie du bloc.

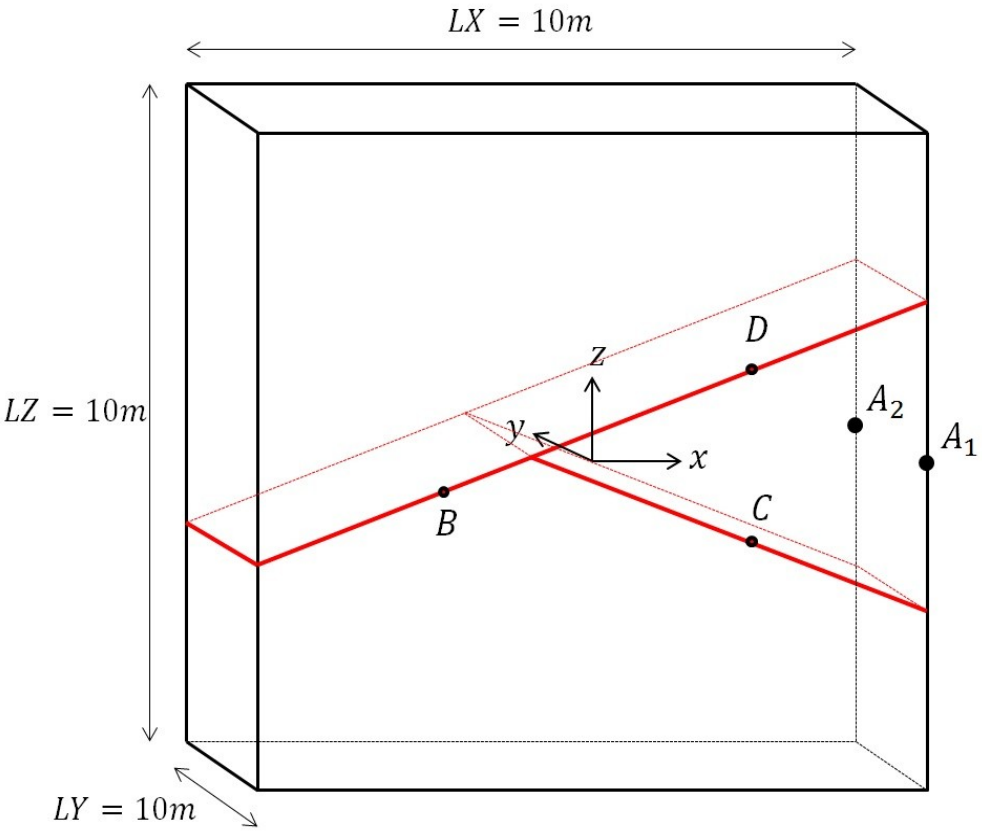


Figure 1.2-a: Géométrie du problème 3D

1.3 Propriétés des matériaux

Les paramètres donnés dans le Tableau 1.3-1 , correspondent aux paramètres utilisés pour la modélisation dans le cas couplé hydro-mécanique. La loi de couplage utilisée est `'LIQU_SATU'` .

Liquide (eau)	Viscosité $\mu_w(en\ Pa.s)$	10^{-3}
	Module de compressibilité $\frac{1}{K_w}(en\ Pa^{-1})$	5.10^{-10}
	Densité du liquide $\rho_w(en\ kg/m^3)$	1

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

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 $K^{int}(en\,m^2/s)$	$1{,}01937^{-19}$

Tableau 1.3-1 : 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 $p_1^{ref}=0\,MPa$ et la porosité du matériau est $\varphi = 0{,}15$.

On prend $\nu=0$ afin d'avoir un problème unidimensionnel.

1.4 Conditions aux limites et chargements

Cas 2D

Les conditions aux limites que l'on peut appliquer sur le domaine sont de deux types :
- conditions de type Dirichlet,
- conditions de type Neuman.

Les conditions de Dirichlet sont :
- les déplacements suivants x sont bloqués dans tout le domaine. Le problème est ainsi unidirectionnel suivant y ,
- les déplacements suivant y sont bloqués sur la face inférieure et la face supérieure du bloc,
- afin de bloquer les déplacements de corps rigide du bloc situé entre les deux interfaces, on encastre le point A .

Les conditions de Neuman sont :
- on applique une pression mécanique répartie constante $P=10\,MPa$ sur chacune des lèvres des interfaces,
- la pression de pore est fixée à $p_1=0.2\,MPa$ dans le bloc inférieur,
- la pression de pore est fixée à $p_2=0.4\,MPa$ dans le bloc intermédiaire situé entre les deux interfaces,
- la pression de pore est fixée à $p_3=0.6\,MPa$ dans le bloc supérieur.

Cas 3D

Les conditions aux limites que l'on peut appliquer sur le domaine sont de deux types :
- conditions de type Dirichlet,
- conditions de type Neuman.

Les conditions de Dirichlet sont :

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

- les déplacements suivants x et les déplacements suivant y sont bloqués dans tout le domaine. Le problème est ainsi unidirectionnel suivant z ,
- les déplacements suivant z sont bloqués sur la face inférieure et la face supérieure du bloc,
- afin de bloquer les déplacements de corps rigide du bloc situé entre les deux interfaces, on encastre les points A_1 et A_2 .

Les conditions de Neuman sont :

- on applique une pression mécanique répartie constante $P=10\,MPa$ sur chacune des lèvres des interfaces,
- la pression de pore est fixée à $p_1=0.2\,MPa$ dans le bloc inférieur,
- la pression de pore est fixée à $p_2=0.4\,MPa$ dans le bloc intermédiaire situé entre les deux interfaces,
- la pression de pore est fixée à $p_3=0.6\,MPa$ dans le bloc supérieur.

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

2 Solution de référence

2.1 Méthode de calcul

Compte tenu des conditions aux limites, les déplacements peuvent être obtenus à partir de la résolution analytique de l'équation de conservation de la quantité de mouvement.

En négligeant la pesanteur, l'équation s'écrit (en contraintes totales) :

$$\mathbf{Div}(\sigma)=\mathbf{0}$$

Dans le cas d'une modélisation couplée, le tenseur des contraintes totales s'écrit :

$$\sigma=\sigma'-bp\mathbf{1}$$

σ' est le tenseur des contraintes dans le squelette, b le coefficient de Biot et p et la pression de pore dans le massif. Le module de Poisson ν étant nul , et étant dans le cas élastique, on a $\sigma'=E\epsilon$.

ν étant nul, les conditions aux limites et le chargement rendent le problème unidimensionnel selon y . Seul ϵ_{yy} est non nul et donc dans chaque bloc:

$$\sigma=E\,\epsilon_{yy}\,\boldsymbol{e_y}\otimes\boldsymbol{e_y}-bp_i\mathbf{1}$$

avec p_i la pression de pore imposée dans le bloc courant.

Donc dans chaque bloc, le tenseur des contraintes totales s'écrit sous la forme :

$$\sigma=\sigma_{xx}\,\boldsymbol{e_x}\otimes\boldsymbol{e_x}+\sigma_{yy}\,\boldsymbol{e_y}\otimes\boldsymbol{e_y}$$

Or dans chaque bloc, les conditions aux limites au niveau des lèvres des interfaces qui délimitent les blocs s'écrivent $\sigma.\boldsymbol{n}=-P\boldsymbol{n}$, donc:

$$\begin{aligned}
&(\sigma_{xx}\,\boldsymbol{e_x}\otimes\boldsymbol{e_x}+\sigma_{yy}\,\boldsymbol{e_y}\otimes\boldsymbol{e_y}).\boldsymbol{n}=-P\,\boldsymbol{n}\\
&\sigma_{xx}(\boldsymbol{e_x}.\boldsymbol{n})\boldsymbol{e_x}+\sigma_{yy}(\boldsymbol{e_y}.\boldsymbol{n})\boldsymbol{e_y}=-P\,\boldsymbol{n}\\
&(\sigma_{xx}(\boldsymbol{e_x}.\boldsymbol{n})\boldsymbol{e_x}+\sigma_{yy}(\boldsymbol{e_y}.\boldsymbol{n})\boldsymbol{e_y}).\boldsymbol{e_y}=-P(\boldsymbol{e_y}.\boldsymbol{n})\\
&\sigma_{yy}(\boldsymbol{e_y}.\boldsymbol{n})=-P(\boldsymbol{e_y}.\boldsymbol{n})\\
&\sigma_{yy}=-P\quad\text{car}\quad\boldsymbol{e_y}.\boldsymbol{n}\neq 0
\end{aligned}$$

Finalement dans chaque bloc

$$\sigma_{yy}=E\,\epsilon_{yy}-bp_i=-P\qquad\text{soit}\qquad\epsilon_{yy}=\frac{-P+bp_i}{E}$$

avec p_i la pression de pore imposée dans le bloc courant.

2.2 Grandeurs et résultats de référence

En particulier on s'intéresse aux déplacements selon la direction y dans chaque bloc:

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

- dans le bloc inférieur, d'après les conditions aux limites, $u_y(y)=\frac{-P+bp_1}{E}*(\frac{L}{2}+y)$
- dans le bloc inférieur, les déplacements sont symétriques par rapport à l'axe (Ox) . En effet, ce bloc est symétrique par rapport à l'axe (Ox) et les conditions aux limites et les chargements qui lui sont appliquées suivent également cette symétrie (pression mécanique répartie sur les lèvres de fissure et encastrement du point A). Les déplacements verticaux s'écrivent donc : $u_y(y)=\frac{-P+bp_2}{E}*y$
- dans le bloc supérieur, d'après les conditions aux limites, $u_y(y)=\frac{-P+bp_3}{E}*(\frac{-L}{2}+y)$

2.3 Incertitude sur la solution

Aucune, il s'agit d'une solution analytique.

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.

3.2 Caractéristiques du maillage

Le bloc sur lequel on effectue la modélisation est divisé en 25 QUAD8.

3.3 Grandeurs testées et résultats

On teste la valeur des déplacement verticaux pour les nœuds B , C et D de part et d'autre de l'interface. La tolérance est fixée à 10^{-6} . Ces valeurs sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Grandeurs testées	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
DY (nœud B en dessous)	'ANALYTIQUE'	-6.251724137931E-3	1,E-06
DY (nœud B au dessus)	'ANALYTIQUE'	1.0210344827586E-2	1,E-06
DY (nœud C en dessous)	'ANALYTIQUE'	-5.575862068966E-3	1,E-06
DY (nœud C au dessus)	'ANALYTIQUE'	2.813793103448E-3	1,E-06
DY (nœud D en dessous)	'ANALYTIQUE'	-2.8137931034482E-3	1,E-06
DY (nœud D au dessus)	'ANALYTIQUE'	5.34827586206896E-3	1,E-06

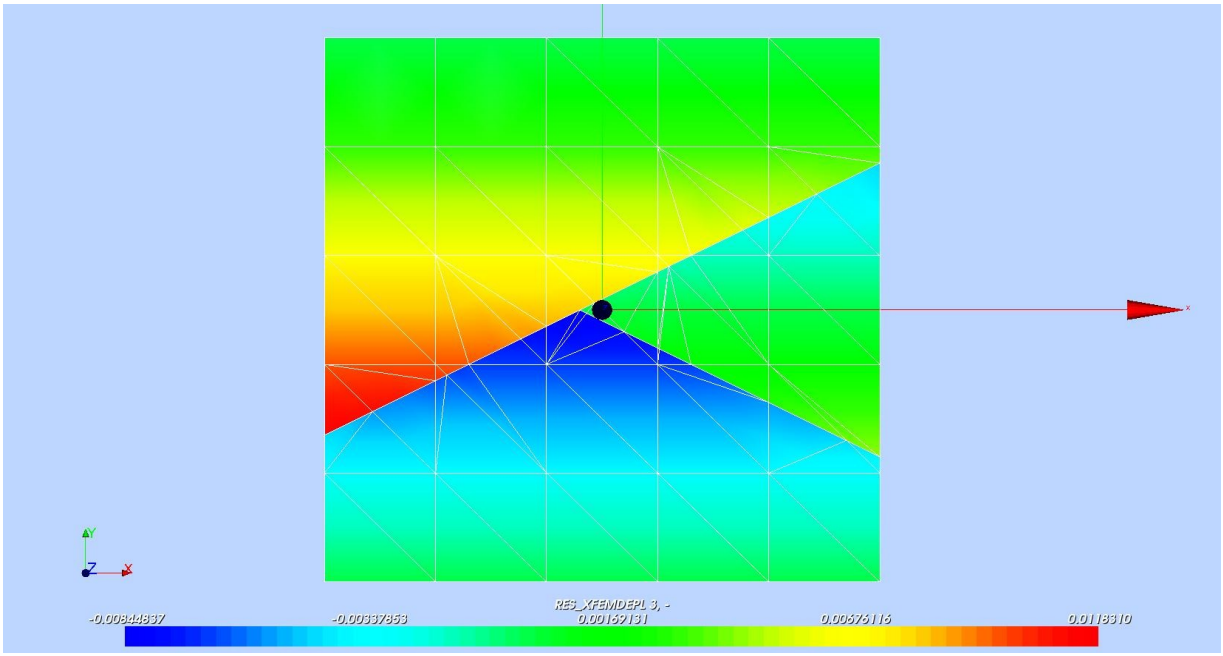
3.4 Remarques

On a également post-traité le champ de déplacements selon la direction y (Figure 3.4-a) grâce à SALOME.

On peut alors constater (à partir de la Figure 3.4-a) une discontinuité franche du champ de déplacements liée à la présence des interfaces traversant le massif. Cela suggère la bonne prise en compte de l'enrichissement dans l'approximation du champ de déplacements, y compris au niveau de la jonction des interfaces.

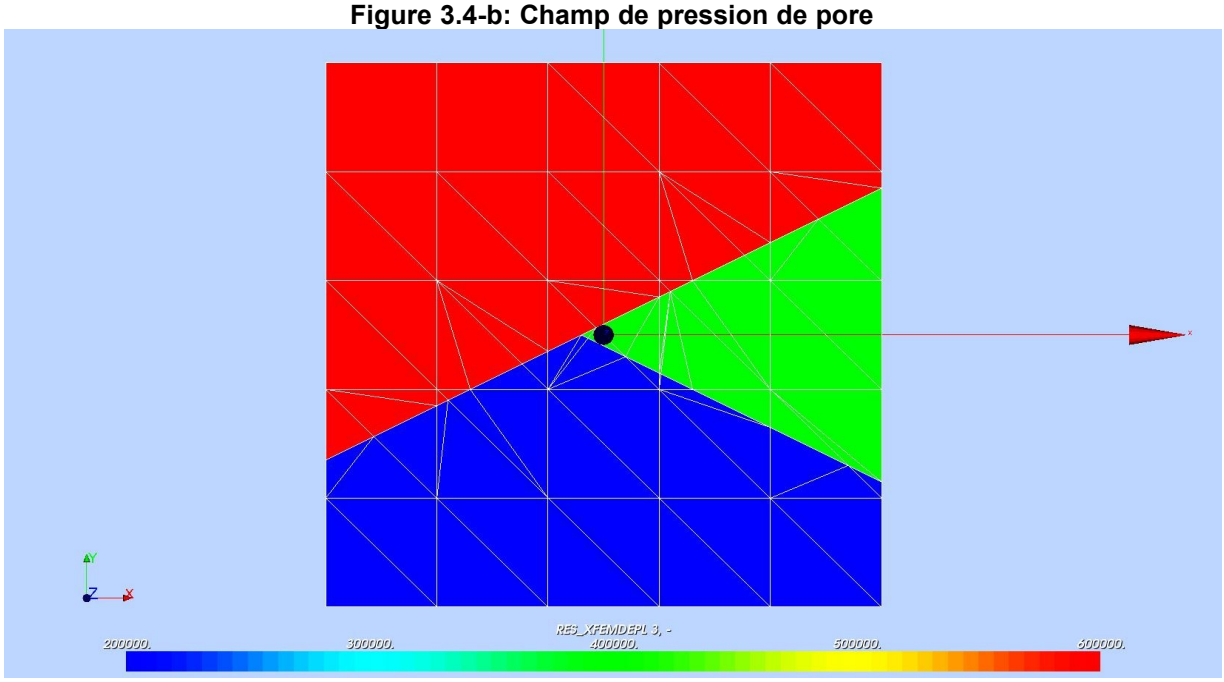
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Figure 3.4-a: Champ de déplacements selon la direction (Oy)



Enfin on a post-traité le champ de pression de pore p (Figure 3.4-b) grâce à SALOME. Là encore, on observe une discontinuité nette au niveau des interfaces séparant les blocs. La pression de pore est bien constante dans chacun des blocs.

Figure 3.4-b: Champ de pression de pore



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.

4.2 Caractéristiques du maillage

Le bloc sur lequel on effectue la modélisation est divisée en 25 HEXA20.

4.3 Grandeurs testées et Résultats

On teste la valeur des déplacement verticaux pour les nœuds B , C et D de part et d'autre de l'interface. La tolérance est fixée à 10^{-6} . Ces valeurs sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Grandeurs testées	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
DZ (nœud B en dessous)	'ANALYTIQUE'	-6.251724137931E-3	1,E-06
DZ (nœud B au dessus)	'ANALYTIQUE'	1.0210344827586E-2	1,E-06
DZ (nœud C en dessous)	'ANALYTIQUE'	-5.575862068966E-3	1,E-06
DZ (nœud C au dessus)	'ANALYTIQUE'	2.813793103448E-3	1,E-06
DZ (nœud D en dessous)	'ANALYTIQUE'	-2.8137931034482E-3	1,E-06
DZ (nœud D au dessus)	'ANALYTIQUE'	5.34827586206896E-3	1,E-06

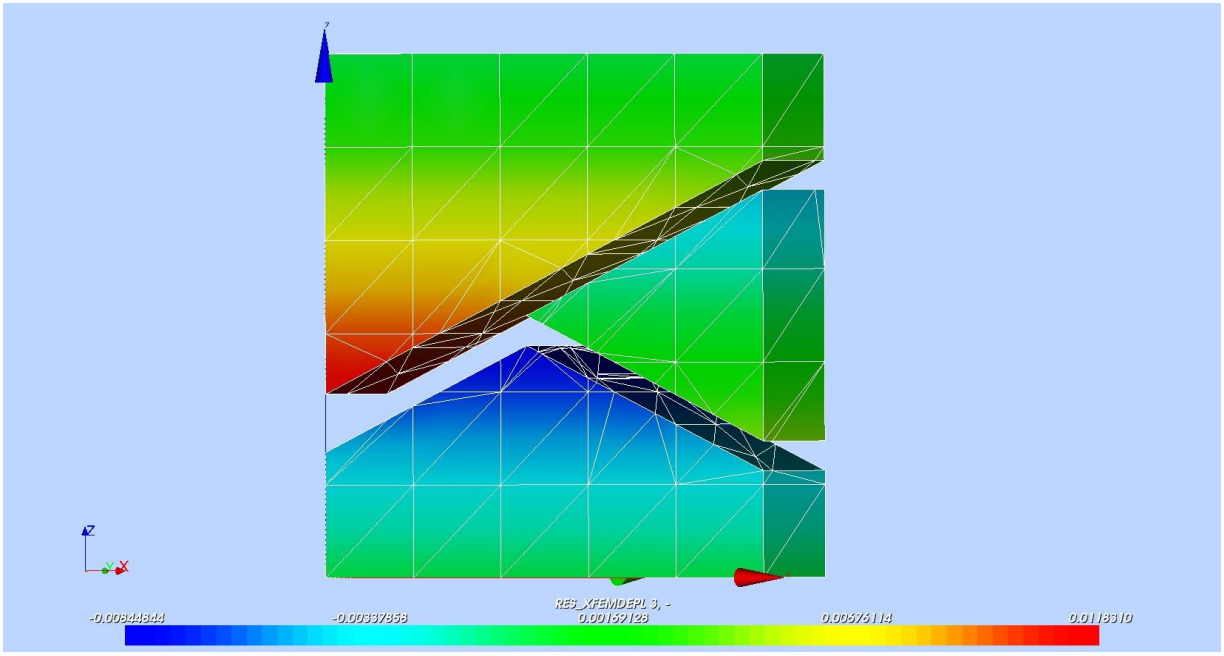
4.4 Remarques

On a également post-traité le champ de déplacements selon la direction z (Figure 4.4-a) grâce à SALOME.

On peut alors constater (à partir de la Figure 4.4-a) une discontinuité franche du champ de déplacements liée à la présence des interfaces traversant le massif. Cela suggère la bonne prise en compte de l'enrichissement dans l'approximation du champ de déplacements, y compris au niveau de la jonction des interfaces.

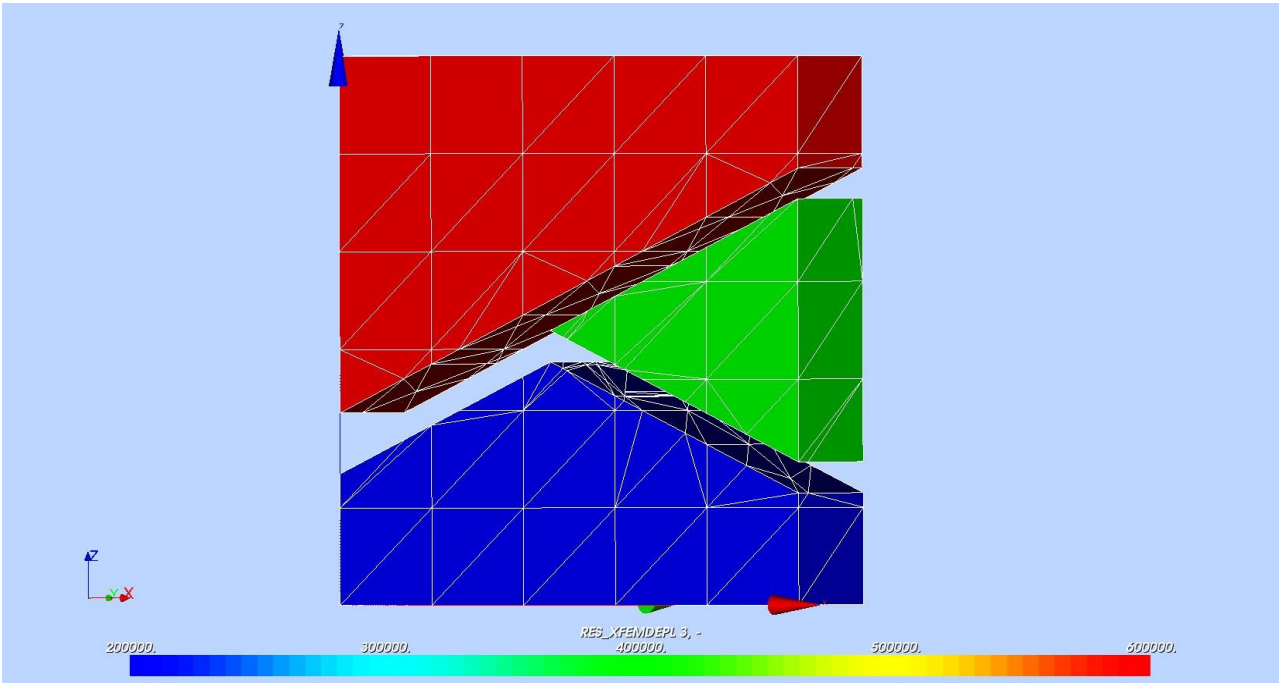
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Figure 4.4-a: Champ de déplacements selon la direction (Oz) et déformée



Enfin on a post-traité le champ de pression de pore p (Figure 4.4-b) grâce à SALOME. Là encore, on observe une discontinuité nette au niveau des interfaces séparant les blocs. La pression de pore est bien constante dans chacun des blocs.

Figure 4.4-b: Champ de pression de pore et déformée



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

5 Conclusion

Pour la modélisation D_PLAN_HM et la modélisation 3D_HM, les résultats concordent avec la solution analytique. Pour les éléments HM-XFEM multi-Heaviside, les fonctionnalités suivantes sont désormais validées :

- MODI_MODELE_XFEM
- CHAR_MECA_PRES
- POST_CHAM_XFEM
- le calcul des matrices et vecteurs élémentaires dans le cas où les degrés de liberté Heaviside mécaniques et hydrauliques ont été introduits dans les développements du modèle de couplage HM.

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