WTNP128 – Essai de fendage par coin du béton sous pression fluide

Résumé :

Le test présenté ici permet de vérifier le bon fonctionnement des éléments de joints avec couplage hydromécanique et utilisation des lois cohésives.

L'essai modélisé est un essai de fendage par coin avec pression de fluide dans la fissure.
On dispose pour cet essai de comparaisons avec des essais expérimentaux et numériques.

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

1 Problème de référence

L'essai de fendage (« wedge splitting test ») a été proposé initialement par Brühwiler et Wittmann[bw] afin d'obtenir une propagation de fissure stable et ainsi déterminer les propriétés de rupture du béton. Slowik et Saouma[ss] ont ensuite utilisé cet essai afin d'étudier l'effet d'une pression de fluide dans la fissure. Segura et Carol[sc] ont modélisé cet essai de fendage sous pression de fluide. On reprend ici l'essai réalisé par Slowik et Saouma.

Un dispositif, dit de « coin », permet d'appliquer une force aux points B et B' (voir figure 1.1-a) afin de séparer l'échantillon en deux. L'expérience est contrôlée par le CMOD (Crack Mouth Opening Displacement), c'est-à-dire le déplacement imposé entre B et B'.

1.1 Géométrie

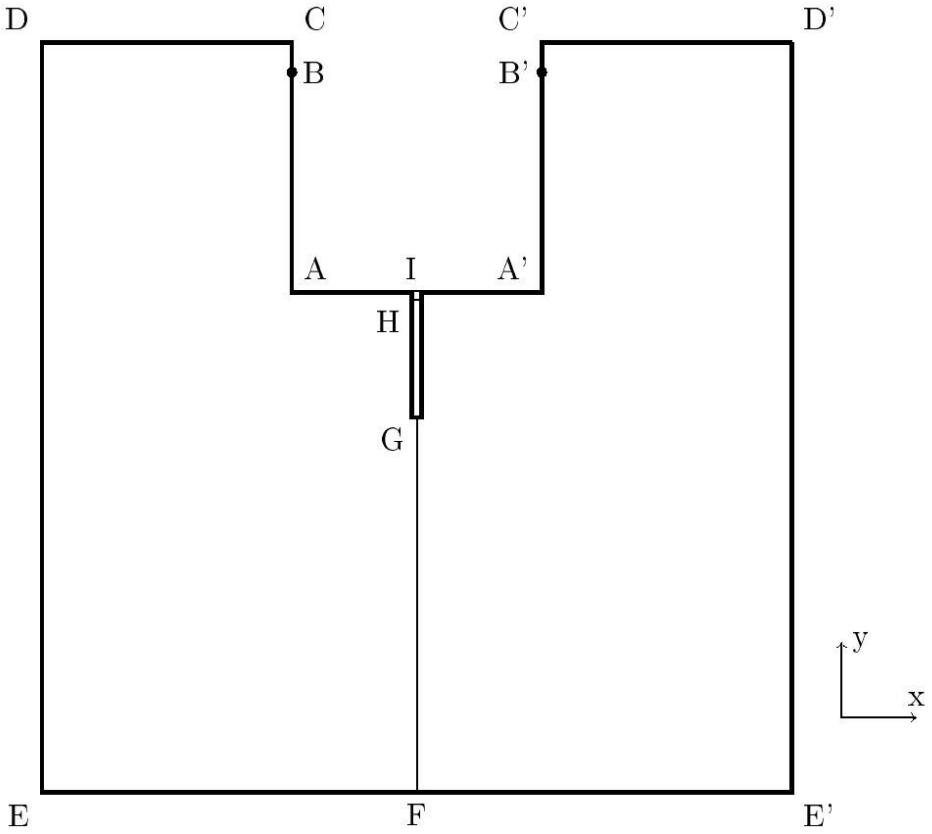


Figure 1.1-a: Géométrie de l'échantillon

Coordonnées des points (en mm) :

	x	y		x	y
A	-50	51	A'	50	51
B	-50	138	B'	50	138
C	-50	150	C'	50	150
D	-150	150	D'	150	150
E	-150	-150	E'	150	-150
F	0	-150	G	0	0

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

H 0 50 I 0 51

L'échantillon a une épaisseur de $100\,mm$.

1.2 Propriétés du matériau

- Propriétés du fluide interstitiel (eau liquide) :

Masse volumique	$1.10^{-6}\,kg.mm^{-3}$
Viscosité	$1.10^{-9}\,MPa.s$

On considère que l'eau est incompressible.

- Propriétés du massif :

Le massif en béton est élastique et a les propriétés suivantes :

Module d'Young	$27500\,MPa$
Coefficient de Poisson	$0,2$

Étant données les échelles de temps considérées et la perméabilité de la fissure très élevée comparativement, le béton est supposé imperméable. Il est donc modélisé par des éléments D_PLAN classiques.

- Propriétés de la discontinuité :

La discontinuité est décomposée en trois parties :

- La membrane de caoutchouc qui assure l'étanchéité de l'encoche ;
- L'encoche dans laquelle on impose une pression constante ;
- Le chemin de fissuration le long duquel la fissure se propage.

La membrane a un comportement élastique linéaire. On utilise la loi de comportement JOINT_BANDIS avec la paramètre $\gamma = 0$ afin de la rendre linéaire. Les propriétés de la membrane sont les suivantes :

Rigidité normale initiale K_{ni}	$20\,MPa.mm^{-1}$
Coefficient γ	0

Pour l'encoche, on utilise la loi CZM_LIN_REG en initialisant les variables internes de manière à avoir des éléments initialement cassés.

Pour la fissure, on utilise la loi CZM_EXP_REG avec les paramètres suivants :

Énergie de fissuration G_c	$0,150\,MPa.mm$
Contrainte critique σ_c	$3,25\,MPa$

Les paramètres numériques des éléments de joints avec loi cohésive sont

PENA_ADHERENCE	1.10^{-3}

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

PENA_CONTACT	1

- Propriétés de la pointe de fissure

Module de Biot N	$0,3.10^{-3}\ MPa.mm^{-1}$
Ouverture fictive OUV_FICT	10 mm

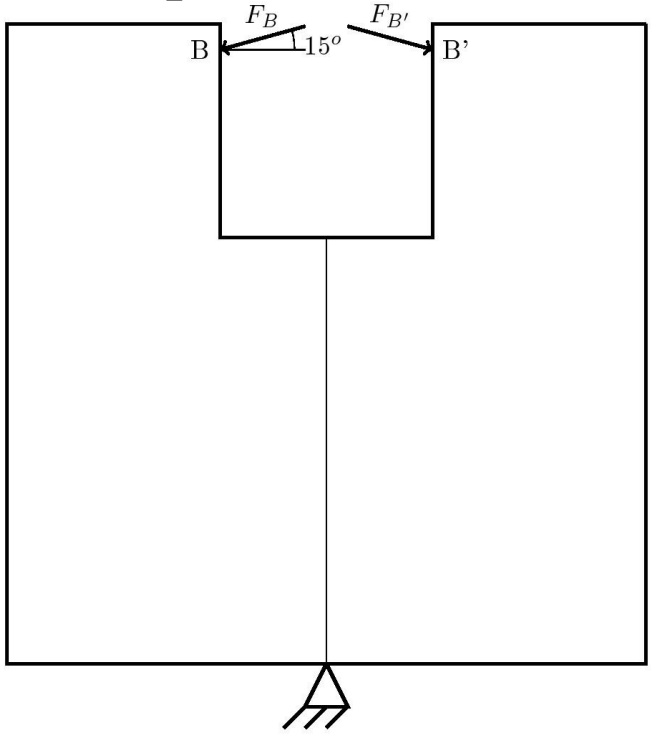
1.3 Conditions initiales

La pression de fluide est initialement de $0,21\ MPa$ dans l'encoche et $0,0\ MPa$ dans la future fissure.

1.4 Conditions aux limites

Les conditions aux limites mécaniques et hydrauliques sont les suivantes :

- En F : déplacements bloqués dans toutes les direction et pression nulle imposée ;
- Dans l'encoche $[GH]$: pression imposée de $0,21\ MPa$;
- Dans la membrane $[HI]$: pression imposée de $0,0\ MPa$;
- En B et B', les déplacements sont symétriques ;
- En B', on impose une force dans la direction $\begin{pmatrix}\cos(\alpha)\\-\sin(\alpha)\end{pmatrix}$, dont l'intensité est pilotée par la composante DX du déplacement au point B'. À chaque instant t, la composante horizontale du déplacement en B' doit être égale à $u_x=-\frac{q}{2}t$, où q est la vitesse de chargement. On utilise donc le pilotage avec l'option DDL_IMPO.



Par ailleurs, le massif étant imperméable on bloque les échanges de fluide entre fissure et massif. Les pressions de fluide sur les bords de l'élément de joint et les multiplicateurs de Lagrange hydrauliques sont bloqués à zéro.

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

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

2 Solution de référence

La solution de référence est issue des résultats expérimentaux de Slowik et Saouma [2]

2.1 Bibliographie

1. Brühwiler, E., Witmann, F. H., The wedge splitting test, a new method of performing stable fracture mechanics tests, *Engineering Fracture Mechanics*,1990,35,1/2/3,117-125

2. Slowik, V., Saouma, V. E., Water Pressure in Propagating Concrete Cracks, *Journal of Structural Engineering*,2000,126,2,235-242

3. Segura, J. M., Carol, I., Numerical Modelling of pressurized fracture evolution in concrete using zero-thickness interface elements, *Engineering Fracture Mechanics*,2010,77,9,1386-1399

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

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation A

La modélisation est réalisée en déformations planes avec 3644 éléments TRI3 pour le massif et 201 éléments QU4 pour la discontinuité. La loi cohésive adopté est CZM_EXP_REG. Le chargement mécanique est lent : la vitesse de chargement q_t est de $0{,}002\,\mu\, m.s^{-1}$.

Discrétisation en temps : 29 pas de temps de $10\,s$.

3.2 Grandeurs testées et résultats

On compare les résultats de la modélisation numérique avec ceux obtenus expérimentalement par Slowik et Saouma[ss].

La figure 3.2-a montre la force appliquée par le coin en fonction du CMOD et la figure 3.2-b donne les profils de pression dans la fissure.

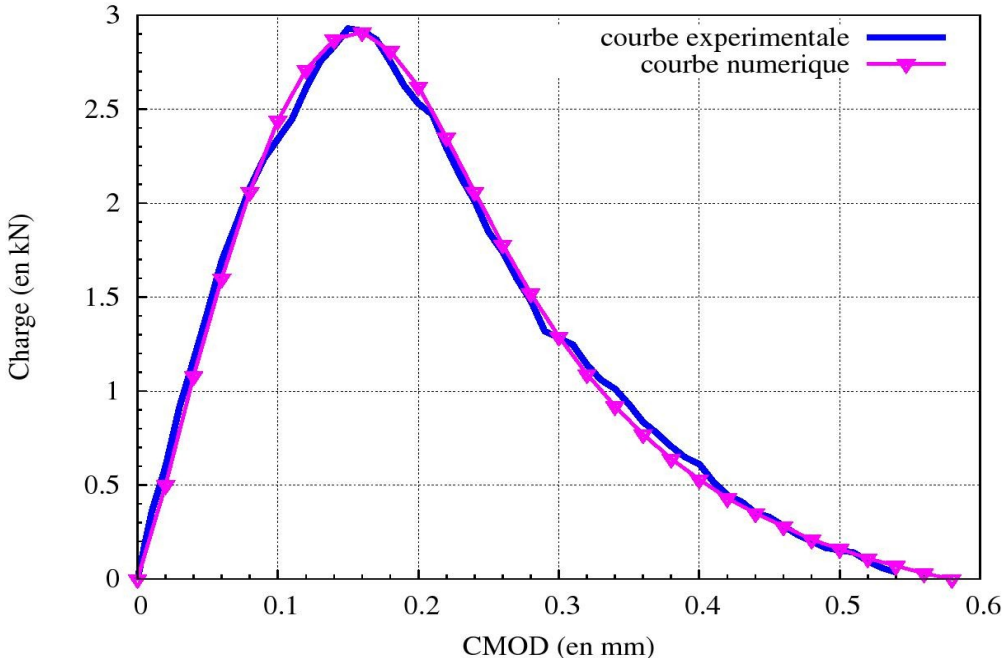


Figure 3.2-a: Courbe force-CMOD obtenue numériquement et comparaison avec les résultats expérimentaux de Slowik et Saouma

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

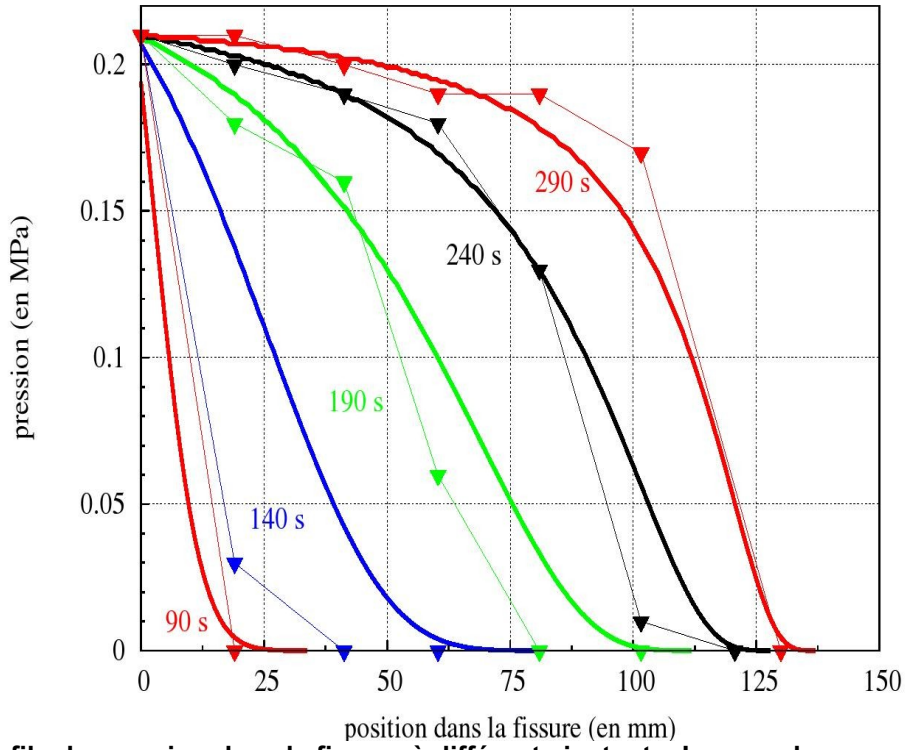


Figure 3.2-b: Profils de pression dans la fissure à différents instants. Les courbes numériques sont les courbes épaisses. Les mesures expérimentales (Slowik et Saouma) sont figurées par les triangles pleins.

La courbe force-CMOD obtenue numériquement est très proche de la courbe expérimentale. De plus, les tendances d'évolution de la pression dans la fissure sont également bien reproduites.

On note également que ces résultats sont très similaires à ceux obtenus numériquement par Segura et Carol[sc].

On effectue un test de comparaison avec l'expérience sur la composante selon x de la force appliquée en B' (option FORC_NODA) ainsi que sur la pression en un point de la fissure.

Point	Temps (s)	Fx (kN/mm^2) référence	Fx (kN/mm^2) Aster	Différence (%)
B'	100	-12,65	-13,08	3,4
B'	150	-6,41	-6,46	0,76
B'	250	-0,765	-0,792	3,5

X (mm)	Y (mm)	Temps (s)	$PRE1$ (Mpa) référence	$PRE1$ (MPa) Aster	Différence (%)
0	-41	140	0,155	0,149	3,8
0	-41	190	0,190	0,188	0,86
0	-41	240	0,200	0,202	0,81

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

On ajoute les test de non-régression suivants :

X (mm)	Y (mm)	**Temps** (s)	$PRE1$ (Mpa) **Aster**
0	-41	140	0,1491
0	-41	190	0,1884
0	-41	240	0,2016

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

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

Les caractéristiques de la modélisation B sont identiques à celles de la modélisation A, exceptées :

- la vitesse de chargement, qui est 100 fois plus élevées : q_t est égale à $0{,}2\,\mu\, m.s^{-1}$.
- les paramètres matériaux suivants

Module d'Young	$39000\, MPa$
Énergie de fissuration G_c	$0{,}178\, MPa.mm$
Contrainte critique σ_c	$3{,}30\, MPa$
Module de Biot de la zone cohésive N	$0{,}5.10^{-3}\, MPa.mm^{-1}$

Discrétisation en temps : 42 pas de temps de $0{,}1\, s$.

4.2 Grandeurs testées et résultats

La figure 4.2-a montre la force appliquée par le coin en fonction du CMOD.

La figure 4.2-b donne les profils de pression le long de la fissure. Conformément à ce qui est attendu et le chargement étant plus rapide, le front de fluide s'est propagé moins loin à CMOD donné.

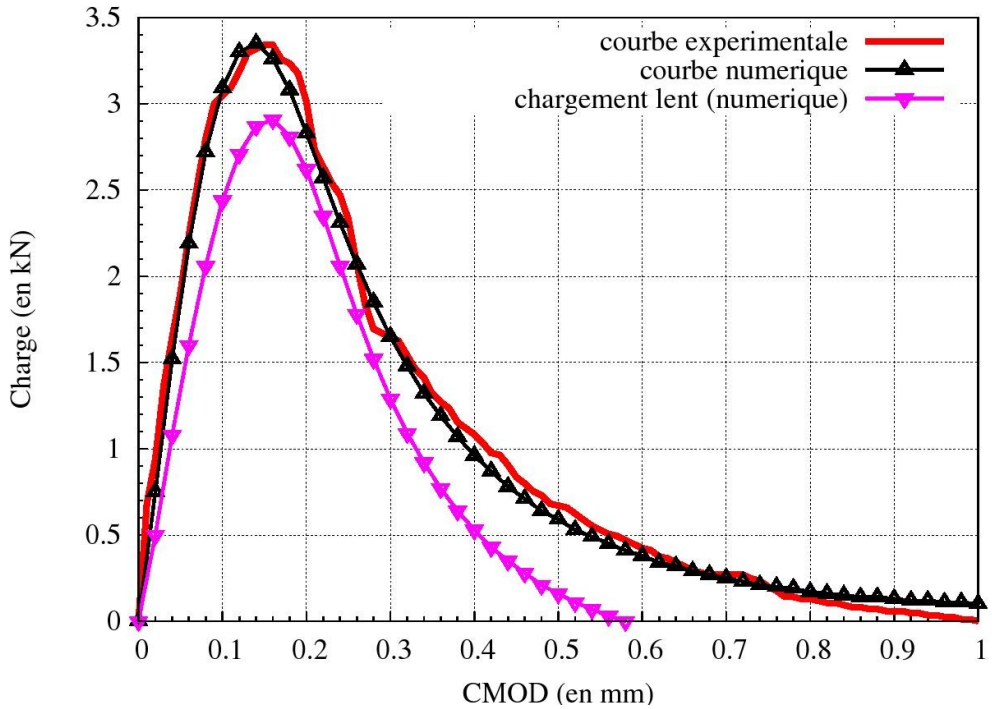


Figure 4.2-a: Courbe force-CMOD obtenue numériquement et comparaison avec les résultats expérimentaux de Slowik et Saouma. La courbe obtenue avec un chargement plus lent (modélisation A) a été ajoutée pour comparaison.

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

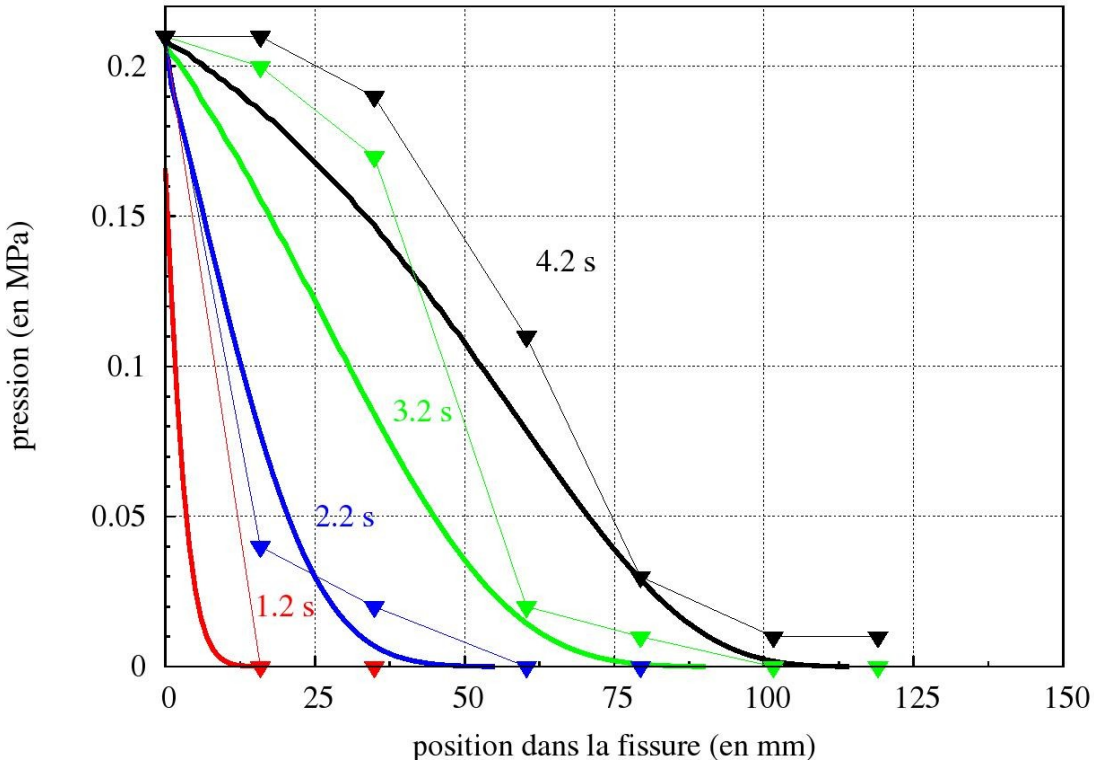


Figure 4.2-b: Profils de pression dans la fissure à différents instants. Les courbes numérique sont les courbes épaisses. Les mesures expérimentales (Slowik et Saouma) sont figurées par les triangles pleins

On compare la réponse mécanique globale obtenue aux résultats expérimentaux.

Point	Temps (s)	Fx (kN/mm^2) référence	Fx (kN/mm^2) Aster	Différence (%)
B'	1,0	-15,06	-14,16	6,0
B'	2,0	-5,41	-4,73	13,0
B'	3,8	-0,882	-0,834	5,4

On ajoute les tests de non régression suivants

X (mm)	Y (mm)	Temps (s)	$PRE1$ (MPa) référence
0	-60	3,2	$14{,}9.10^{-3}$
0	-60	4,2	$79{,}6.10^{-3}$

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

5 Modélisation C

5.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation C est presque identique à la modélisation A . Seule la loi cohésive pour la fissure est modifiée : on utilise la loi CZM_LIN_REG.

Discrétisation en temps : 24 pas de temps de 10s .

5.2 Grandeurs testées et résultats

On effectue simplement les tests de non-régression suivants :

	Point	**Temps (s)**	Fx **(kN/mm^2) Aster**
	B	100	-16,31
	B	150	-6,848

X **(mm)**	Y **(mm)**	**Temps (s)**	$PRE1$ **(MPa) Aster**
0	-41	190	0,1473
0	-41	240	0,1884

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

6 Modélisation D

6.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation D est presque identique à la modélisation A. Seuls les éléments D_PLAN du massif sont modifiés. Ils sont remplacés par des éléments D_PLAN_HMS. Ainsi, plutôt qu'un milieu totalement imperméable, on considère un milieu avec une perméabilité faible :

Perméabilité intrinsèque K^{int} $1.10-19\,m^2$

Les échanges entre fissure et massif sont autorisés pour cette modélisation.

Discrétisation en temps : 10 pas de temps de $20\,s$.

6.2 Grandeurs testées et résultats

On effectue simplement les tests de non-régression suivants :

Point	Temps (s)	Fy (kN/mm^2) Aster
B	100	-11,87
B	200	-2,10

X (mm)	Y (mm)	Temps (s)	$PRE1$ (MPa) Aster
0	-41	140	0,0737
0	-41	200	0,1679

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

7 Synthèse des résultats

Les résultats obtenus permettent de valider le bon fonctionnement des éléments de joints avec couplage hydro-mécanique avec les lois cohésives régularisées.

Les modélisations A et B testent la compatibilité de l'élément de joint avec la loi CZM_EXP_REG. Les résultats sont comparés à des résultats expérimentaux. La réponse mécanique globale de la structure ainsi que l'effet de la vitesse de chargement sur l'écoulement dans la fissure sont reproduits correctement numériquement.

La modélisation C, par des test de non-régression uniquement, valide l'utilisation de la loi CZM_LIN_REG. Les résultats sont tout à fait conformes à ce qui est attendu.

Enfin, la modélisation D permet de tester la compatibilité avec les lois cohésives en présence d'éléments surfaciques HM_DPQ8S très peu perméables dans le massif.

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