SSNP168 - Endommagement d'éprouvettes béton de type Nooru-Mohamed

Résumé :

Le but de ce cas-test est de valider des modèles d'endommagement et de caractériser le béton utilisé dans le cadre du projet VerCoRs (Vérification du Confinement des Réacteurs). Il regroupe les résultats de trois essais d'endommagement menés sur des éprouvettes entaillées. Les conditions aux limites sont celles obtenues par corrélation d'images suite aux travaux de A. Carpiuc-Prisacari durant sa thèse [bib1].

Ces travaux se sont fondés sur les essais de Nooru-Mohamed réalisés sur des éprouvettes en béton doublement entaillées et sollicitées en mode mixte de fissuration [bib2]. Dans le cas présent, les chargements mécaniques sont appliqués par un hexapode, une machine d'essai à six degrés de liberté. Pour obtenir la précision exigée, la machine est pilotée en temps réel en 3D par mesures de champ. Du fait du chargement non trivial et d'une géométrie d'éprouvette complexe, ce test est très discriminant. Il est cependant riche car il y a une zone de propagation stable de fissure mais également parce que les mesures de champ, à la fois 2D et 3D, sont réalisées par corrélation d'images numériques (CIN) constituant une base de données expérimentale considérable. Ces champs de déplacements expérimentaux sont utilisés pour réaliser des simulations numériques avec un modèle d'endommagement.

On utilise la modélisation D_PLAN_GRAD_VARI, qui permet d'effectuer des calculs d'endommagement régularisés par le gradient d'endommagement pour les problèmes sous hypothèse de déformations planes.

Essai n°1 : chargement proportionnel sur éprouvette doublement entaillée :
Modélisation A : chargement proportionnel sur la face A et loi ENDO_SCALAIRE
Modélisation B : chargement proportionnel sur la face A et loi ENDO_FISS_EXP
Modélisation C : chargement proportionnel sur la face B et loi ENDO_SCALAIRE

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

Modélisation D : chargement proportionnel sur la face B et loi ENDO_FISS_EXP

Essai n°2 : chargement non-proportionnel sur éprouvette doublement entaillée :

Modélisation E : chargement non-proportionnel sur la face A et loi ENDO_SCALAIRE

Modélisation F : chargement non-proportionnel sur la face A et loi ENDO_FISS_EXP

Modélisation G : chargement non-proportionnel sur la face B et loi ENDO_SCALAIRE

Modélisation H : chargement non-proportionnel sur la face B et loi ENDO_FISS_EXP

Essai n°3 : chargement non-proportionnel en zigzag sur éprouvette simplement entaillée :

Modélisation I : chargement non proportionnel en zigzag sur la face A et loi ENDO_SCALAIRE

Modélisation J : chargement non proportionnel en zigzag sur la face A et loi ENDO_FISS_EXP

Modélisation K : chargement non proportionnel en zigzag sur la face B et loi ENDO_SCALAIRE

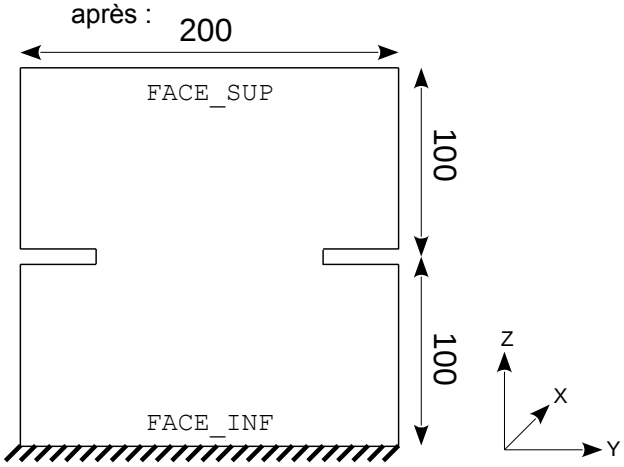
Modélisation L : chargement non proportionnel en zigzag sur la face B et loi ENDO_FISS_EXP

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

1 Problème de référence

1.1 Géométries

La géométrie des éprouvettes utilisées pour les essais expérimentaux est donnée par la figure 1 ci-après :



Cette éprouvette de dimension $200\,mm \times 200\,mm$ et d'épaisseur $50\,mm$ possède une ou deux entailles de largeur et de profondeur variées suivant les essais réalisés. Durant les essais, l'éprouvette est encastrée selon FACE_INF et les chargements sont appliqués sur FACE_SUP grâce à l'hexapode.



Figure 1 : Géométrie de l'éprouvette réelle utilisée pour les essais expérimentaux

Les mesures de champs de déplacements expérimentaux, obtenues par corrélation d'images, sont utilisées pour réaliser les simulations numériques. Cependant, du fait de la complexité de l'expérience, les valeurs de déplacement récupérées ne sont pas exactement celles extraites de FACE_SUP et FACE_INF mais de FC_HAUT et FC_BAS plus proches du centre de l'éprouvette comme l'illustre la figure 2 ci-dessous :

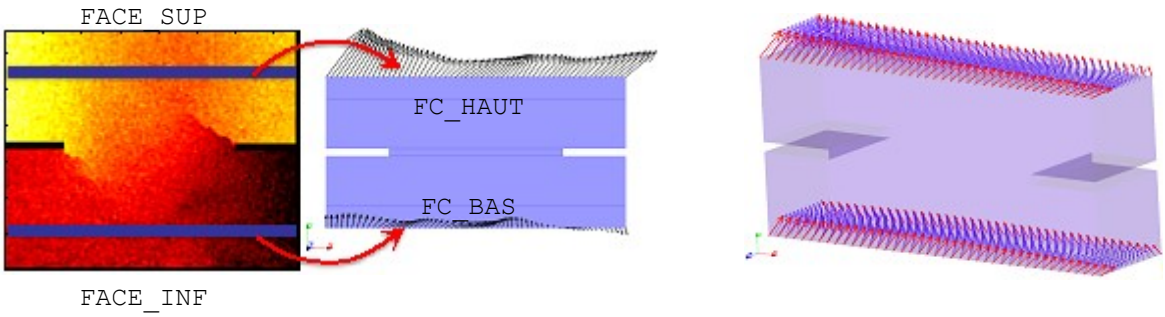


Figure 2 : **Conditions aux limites mesurées puis appliquées aux simulations numériques**

De ce fait, les géométries retenues pour les deux simulations numériques sont légèrement différentes (diminution de la hauteur). De plus, du fait que les champs de déplacements sont extraits sur FC_BAS au lieu de FACE_INF et du fait de l'élasticité du béton, FC_BAS n'est plus encastré et subit désormais un champ de déplacements.

Les géométries retenues pour les simulations numériques, dépendantes des mesures de corrélation d'images, sont présentées dans les figures suivantes :

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

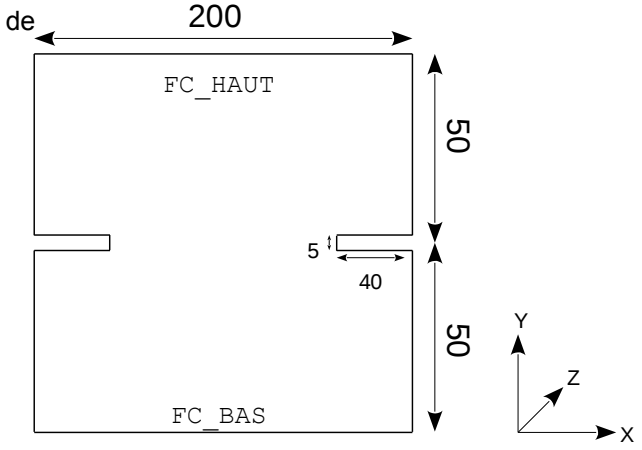


Figure 3 : Géométrie d'éprouvette des essais 1 et 2

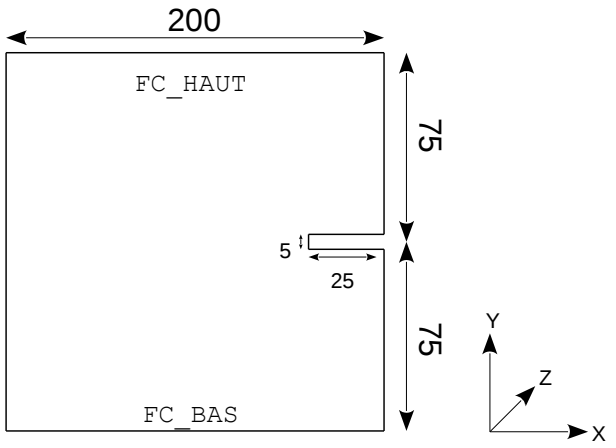


Figure 4 : Géométrie d'éprouvette de l'essai 3

Pour plus de lisibilité, le repère global de l'éprouvette a été modifié entre les essais expérimentaux et les simulations numériques de telle sorte que les efforts de traction évoluent selon l'axe Y et les efforts de cisaillement selon l'axe X.

Essai n°1 et 2 : éprouvette doublement entaillée (modélisation A B C D E F G et H)

On considère une plaque 2D de dimension $L=200\,mm\times H=100\,mm$ doublement entaillée. Chacune des deux entailles a une hauteur de $5\,mm$ et une profondeur de $40\,mm$ et est symétrique par rapport à l'axe médian horizontal et vertical.

Essai n°3 : éprouvette simplement entaillée et chargement en zigzag (modélisation I J K et L)

On considère une plaque 2D de dimension $L=200\,mm\times H=150\,mm$ doublement entaillée. L'entaille est positionnée sur le coté droit de l'éprouvette, a une hauteur de $5\,mm$ et une profondeur de $25\,mm$ et est symétrique par rapport à l'axe médian horizontal.

1.2 Propriétés du matériau

Le matériau considéré est assimilé au béton (on travaille à l'échelle millimétrique).

Caractéristiques élastiques :

$E=2.1\text{E}10\,\text{Pa}=2.1\text{E}4\,\text{N/mm}^2$

$\nu=0.2$

Limite d'élasticité en traction de la loi d'endommagement :

$\sigma_t=3.9\text{E}6\,\text{Pa}=3.9\,\text{N/mm}^2$

Limite d'élasticité en compression de la loi d'endommagement :

$\sigma_c=85.\text{E}6\,\text{Pa}=85\,\text{N/mm}^2$ pour la loi ENDO_SCALAIRE

$\sigma_c=28.5\text{E}6\,\text{Pa}=28.5\,\text{N/mm}^2$ pour la loi ENDO_FISS_EXP

Limite d'élasticité en cisaillement pur de la loi d'endommagement :

$\tau=3.25\text{E}6\,\text{Pa}=3.25\,\text{N/mm}^2$

Taux de restitution d'énergie par surface de fissure (constante de Griffith) :

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

$$G_f = 100\ \mathrm{J/m^2} = 0.1\ \mathrm{N/mm}$$

1.3 Conditions aux limites et chargements

Chargements :

Comme vu précédemment, les chargements (champs de déplacements) sont extraits d'essais expérimentaux par corrélation d'images. Ces chargements ne sont pas ceux réellement extraits de FACE_SUP et FACE_INF mais de sections plus proches du centre de l'éprouvette nommées FC_HAUT et FC_BAS.

Bord rigide :

Les premières simulations numériques font apparaître de l'endommagement parasite sur les bords de l'éprouvette. Par la suite, l'endommagement va se propager en suivant les deux interfaces horizontales comme illustré dans la figure 5. Cet endommagement n'est pas observé sur les essais expérimentaux.

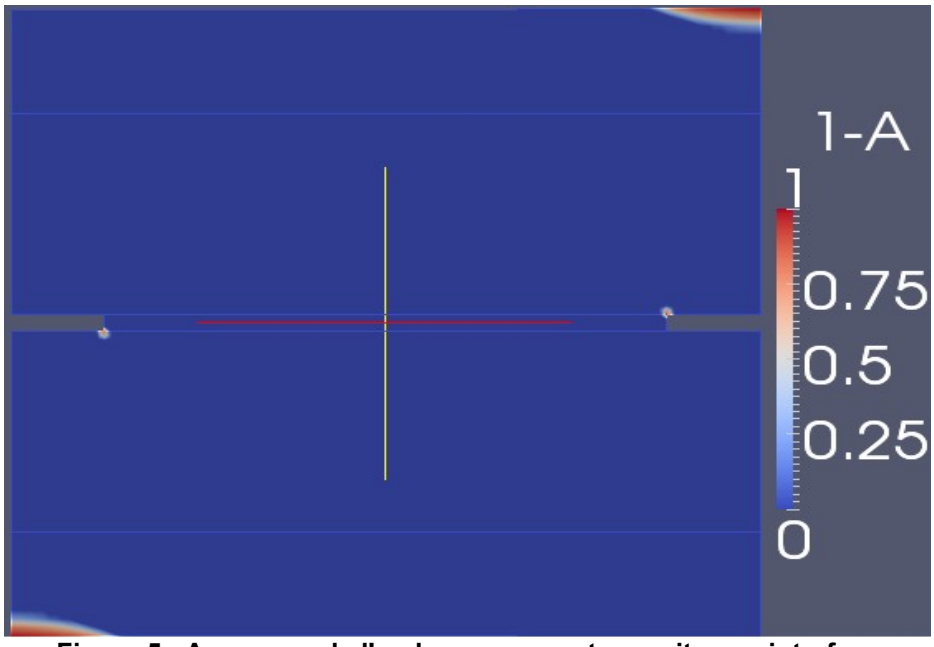


Figure 5 : Amorçage de l'endommagement parasite aux interfaces

Pour que cet endommagement soit artificiellement bloqué, on crée deux couches au niveau des interfaces FC_HAUT et FC_BAS. Ces deux couches, nommées respectivement SINGU_H et SINGU_B dans le maillage, sont constituées d'un matériau plus résistant que le béton. Cette méthode peut-être équivalente au cas réel via les traitements de surfaces.

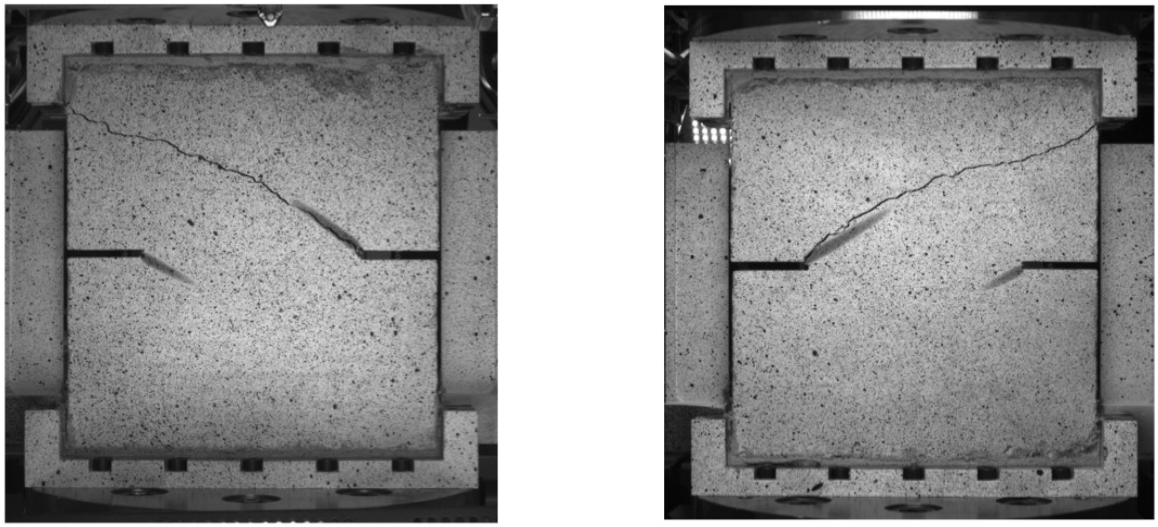
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2 Solution de référence

2.1 Méthode de calcul

Les résultats sont expérimentaux. Les images ci-dessous montrent la propagation de fissures dans l'éprouvette selon l'essai considéré.

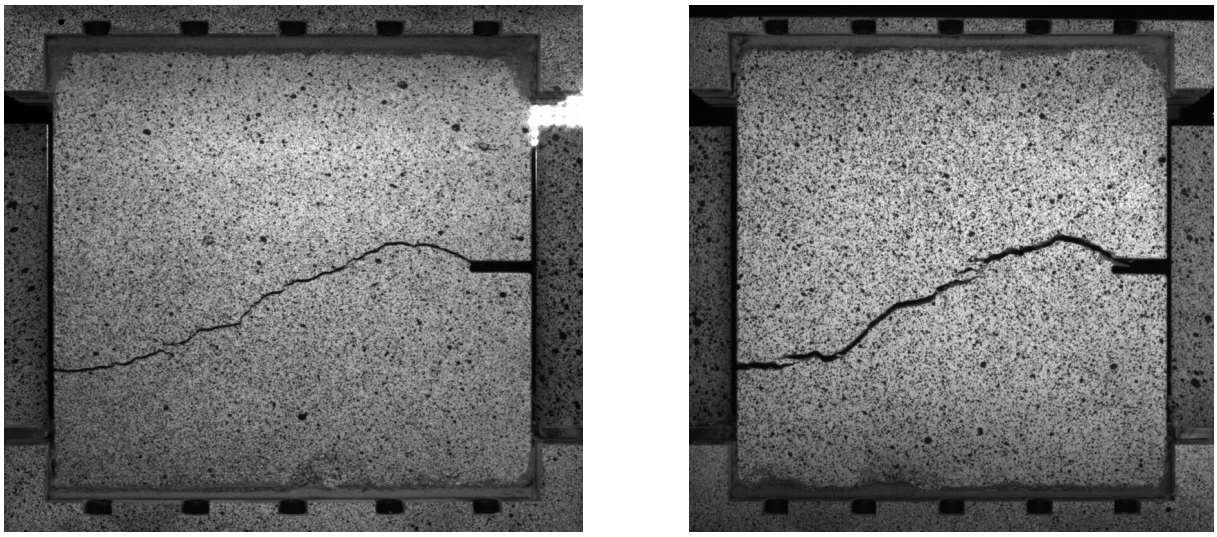
Essai n°1 : Chargement proportionnel (modélisation A B C et D)



(a) (b)

Figure 6 : **Comparaison entre les trajets de fissuration du modèle d'endommagement (lignes noires épaisses) et de l'expérience (lignes noires fines) de la face 1 (a), et de la face 2 (b).**

Essai n° 3 : Chargement non proportionnel zigzag (modélisation I J K et L)



(a) (b)

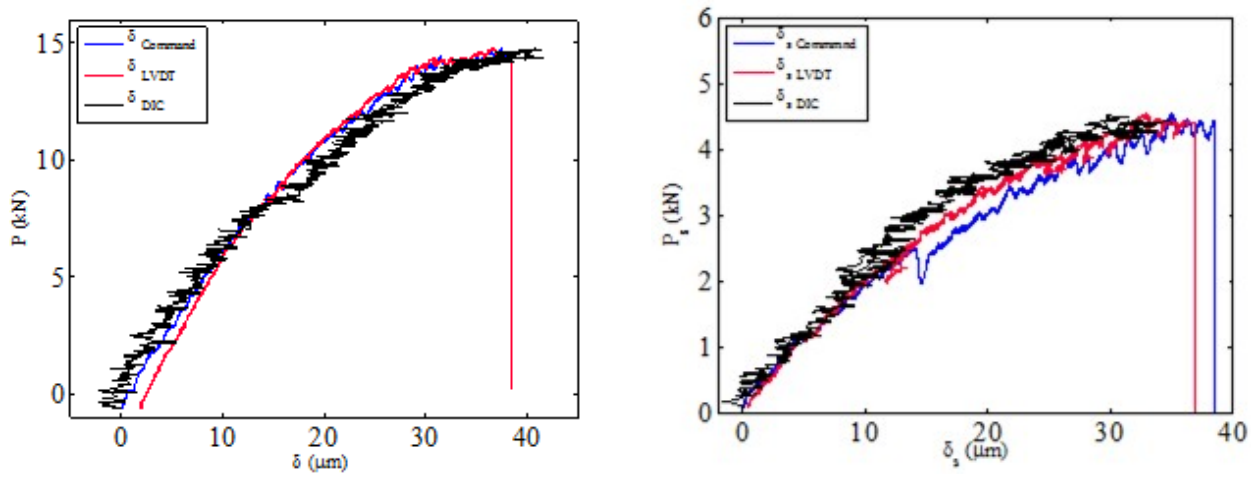
Figure 7 : **Trajets de fissuration obtenu expérimentalement pour un chargement non proportionnel de**

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

la face 1 (a), et de la face 2 (b).

Réponse force-déplacement

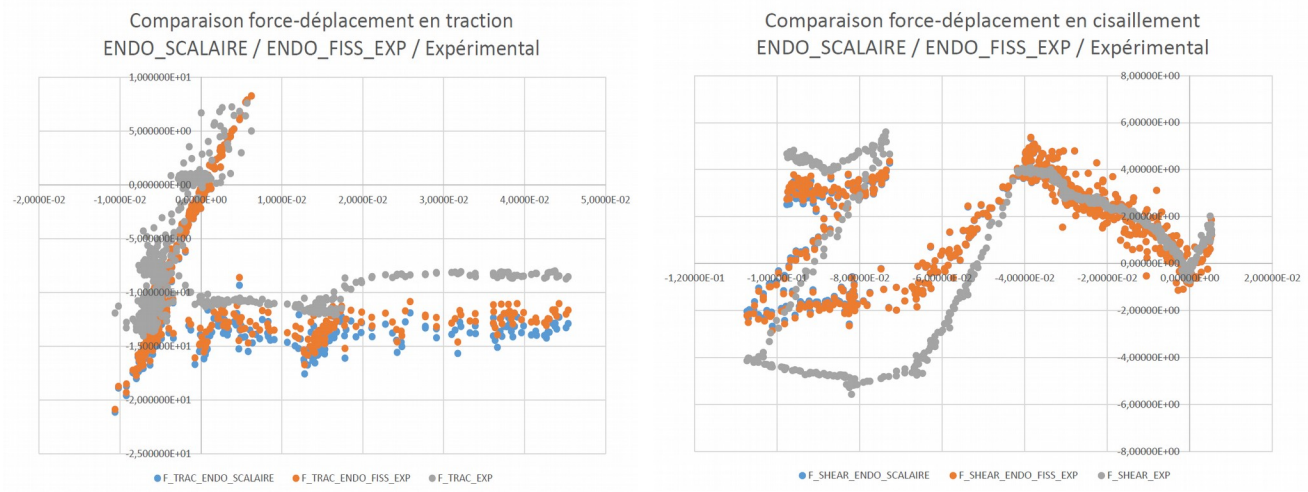
Essai n° 1 : Chargement proportionnel (modélisation A B C et D)



(a) (b)

Figure 8 : Courbe force-déplacement expérimentale en traction(a) et en cisaillement (b).

E ssai n° 3 : Chargement non proportionnel zigzag (m odélisation I J K et L)



(a) (b)

Figure 9 : Courbe force-déplacement expérimentale en traction(a) et en cisaillement (b).

2.2 Grandeurs et résultats de référence

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

On note respectivement $F_n(\delta_n)$ et $F_s(\delta_s)$ les deux réponses force-déplacement en traction et en cisaillement. Les valeurs de référence sont issues de données expérimentales

Essai n° 1 : Chargement proportionnel (modélisation A B C et D)

Modélisation A :

Grandeurs de référence $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence
$\delta_s=4{,}594185\,\mu m$	1.733620 kN
$\delta_s=7.245909\,\mu m$	2.494870 kN
$\delta_s=8.445596\,\mu m$	3.039000 kN

Grandeurs de référence $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence
$\delta_n=9.396203\,\mu m$	1.416780 kN
$\delta_n=2.775601\,\mu m$	3.519630 kN
$\delta_n=8.284375\,\mu m$	10.99950 kN

Modélisation B :

Grandeurs de référence $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence
$\delta_s=7.937556\,\mu m$	2.761790 kN
$\delta_s=8.445596\,\mu m$	3.039000 kN
$\delta_s=9.459026\,\mu m$	3.055320 kN

Grandeurs de référence $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence
$\delta_n=0.939620\,\mu m$	1.416780 kN
$\delta_n=8.284375\,\mu m$	11.07440 kN
$\delta_n=9.614866\,\mu m$	11.89400 kN

Modélisation C :

Grandeurs de référence $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence
$\delta_s=8.196182\,\mu m$	3.039000 kN
$\delta_s=5.670783\,\mu m$	2.332340 kN
$\delta_s=11.23708\,\mu m$	3.702100 kN

Grandeurs de référence $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence
$\delta_n=4.082746\,\mu m$	5.566070 kN
$\delta_n=5.540330\,\mu m$	7.500930 kN
$\delta_n=6.811528\,\mu m$	8.859200 kN

Modélisation D :

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

Grandeurs de référence $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence
$\delta_s=2.564460\,\mu m$	1.112780 kN
$\delta_s=7.037655\,\mu m$	2.761790 kN
$\delta_s=8.196182\,\mu m$	3.039000 kN

Grandeurs de référence $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence
$\delta_n=4.082746\,\mu m$	5.566070 kN
$\delta_n=5.540330\,\mu m$	7.500930 kN
$\delta_n=14.29160\,\mu m$	14.18560 kN

Essai n° 2 : Chargement non-proportionnel (m odélisation E F G et H)

Modélisation E :

Grandeurs de référence $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence
$\delta_s=-8.051796\,\mu m$	2.420760 kN
$\delta_s=-10.84549\,\mu m$	2.916370 kN
$\delta_s=-13.08019\,\mu m$	3.227550 kN

Grandeurs de référence $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence
$\delta_n=7.486336\,\mu m$	7.592210 kN
$\delta_n=0.8830637\,\mu m$	3.562730 kN
$\delta_n=1.303476\,\mu m$	3.544190 kN

Modélisation F :

Grandeurs de référence $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence
$\delta_s=-10.84549\,\mu m$	2.916370 kN
$\delta_s=-13.08019\,\mu m$	3.227550 kN
$\delta_s=34.64022\,\mu m$	3.506990 kN

Grandeurs de référence $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence
$\delta_n=7.486336\,\mu m$	7.592210 kN
$\delta_n=0.8830637\,\mu m$	3.562730 kN
$\delta_n=17.10412\,\mu m$	9.761750 kN

Modélisation G :

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

Grandeurs de référence $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence
$\delta_s=-12.66800\,\mu m$	3.339740 kN
$\delta_s=-14.47880\,\mu m$	3.332610 kN
$\delta_s=-9.405434\,\mu m$	2.524130 kN

Grandeurs de référence $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence
$\delta_n=4.509141\,\mu m$	5.098690 kN
$\delta_n=6.211120\,\mu m$	4.196010 kN
$\delta_n=6.617244\,\mu m$	4.242870 kN

Modélisation H :

Grandeurs de référence $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence
$\delta_s=-4.876392\,\mu m$	1.777070 kN
$\delta_s=-12.27014\,\mu m$	3.237000 kN
$\delta_s=8.580664\,\mu m$	2.138100 kN

Grandeurs de référence $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence
$\delta_n=3.916133\,\mu m$	3.442150 kN
$\delta_n=5.783969\,\mu m$	4.157340 kN
$\delta_n=9.773617\,\mu m$	5.942590 kN

Essai n° 3 : Chargement non-proportionnel zigzag (modélisation I J K et L)

Modélisation I :

Grandeurs de référence $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence
$\delta_s=-7.252218\,\mu m$	1.383070 kN
$\delta_s=-15.86792\,\mu m$	2.370920 kN
$\delta_s=-18.62813\,\mu m$	2.420910 kN

Grandeurs de référence $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence
$\delta_n=4.735272\,\mu m$	6.420840 kN
$\delta_n=-4.337343\,\mu m$	-8.391000 kN
$\delta_n=-2.646843\,\mu m$	-9.486920 kN

Modélisation J :

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

Grandeurs de référence $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence
$\delta_s=-7.252218\,\mu m$	1.364470 kN
$\delta_s=-12.42866\,\mu m$	2.121140 kN
$\delta_s=-18.62813\,\mu m$	2.420910 kN

Grandeurs de référence $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence
$\delta_n=4.735272\,\mu m$	6.420840 kN
$\delta_n=-3.761587\,\mu m$	-7.491850 kN
$\delta_n=-4.116827\,\mu m$	-11.44100 kN

Modélisation K :

Grandeurs de référence $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence
$\delta_s=-10.91707\,\mu m$	1.87961 kN
$\delta_s=-28.82857\,\mu m$	2.86711 kN
$\delta_s=-35.21950\,\mu m$	3.92885 kN

Grandeurs de référence $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence
$\delta_n=-4.723722\,\mu m$	-9.8967 kN
$\delta_n=-3.986515\,\mu m$	-1.1032 kN
$\delta_n=-3.443790\,\mu m$	-10.857 kN

Modélisation L :

Grandeurs de référence $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence
$\delta_s=-10.91707\,\mu m$	1.87961 kN
$\delta_s=-28.82857\,\mu m$	2.86711 kN
$\delta_s=-35.21950\,\mu m$	3.92885 kN

Grandeurs de référence $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence
$\delta_n=-4.723722\,\mu m$	-9.8967 kN
$\delta_n=-3.986515\,\mu m$	-1.1032 kN
$\delta_n=-3.443790\,\mu m$	-10.857 kN

2.3 Incertitudes sur la solution

Résultats expérimentaux.

2.4 Références bibliographiques

[bib1] A. Carpiuc-Prisacari « Innovative tests for characterizing mixed-mode fracture of concrete : from pre-defined to interactive and hybrid tests », Thèse de doctorat, EDF R&D, ENS Cachan, 2015

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

[bib2] M.B. Nooru-Mohamed, Mixed-mode fracture of concrete : an experimental approach. Thèse de Doctorat, Technische Universiteit Delft (1992).

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

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

On considère une modélisation d'endommagement D_PLAN_GRAD_VARI qui est, sous l'hypothèse de déformation plane, une formulation mixte Lagrangienne d'endommagement régularisés par le gradient d'endommagement.

Loi d'endommagement (matériau) : ENDO_SCALAIRE

Caractéristiques liées à la loi d'endommagement non-locale :

$$c=0.1125\ \mathrm{N}\ ;\ p=1.5\ ;\ m=69.0335\ ;\ pena=25\ ;\ c_{volu}=0.433679354095\ ;\ c_{comp}=0.781120952433\ ;$$

Ce qui correspond à la zone d'endommagement $1\,D$ égale à $D=3\,\mathrm{mm}$.

La correspondance avec les paramètres physiques est la suivante :

$$c=3/8\,D\,G_f\ ;\ k=\frac{3\,G_f}{4\,D}\ ;\ m=\frac{2\,k\,E}{f_t^2}\ ;$$

$$c_{comp}=\frac{1+\nu}{1-2\,\nu}\,\frac{(\sigma_c-\sigma_t)\,\tau\sqrt{3}}{2\,\sigma_t\,\sigma_c}\ ;\ c_{volu}=\frac{2(1+\nu)}{1-2\,\nu}\left[\left(\frac{(\sigma_c+\sigma_t)\,\tau\sqrt{3}}{2\,\sigma_t\,\sigma_c}\right)^2-1\right];$$

3.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage contient 3278 éléments TRIA6. La zone de propagation de fissure est raffinée d'avantage.

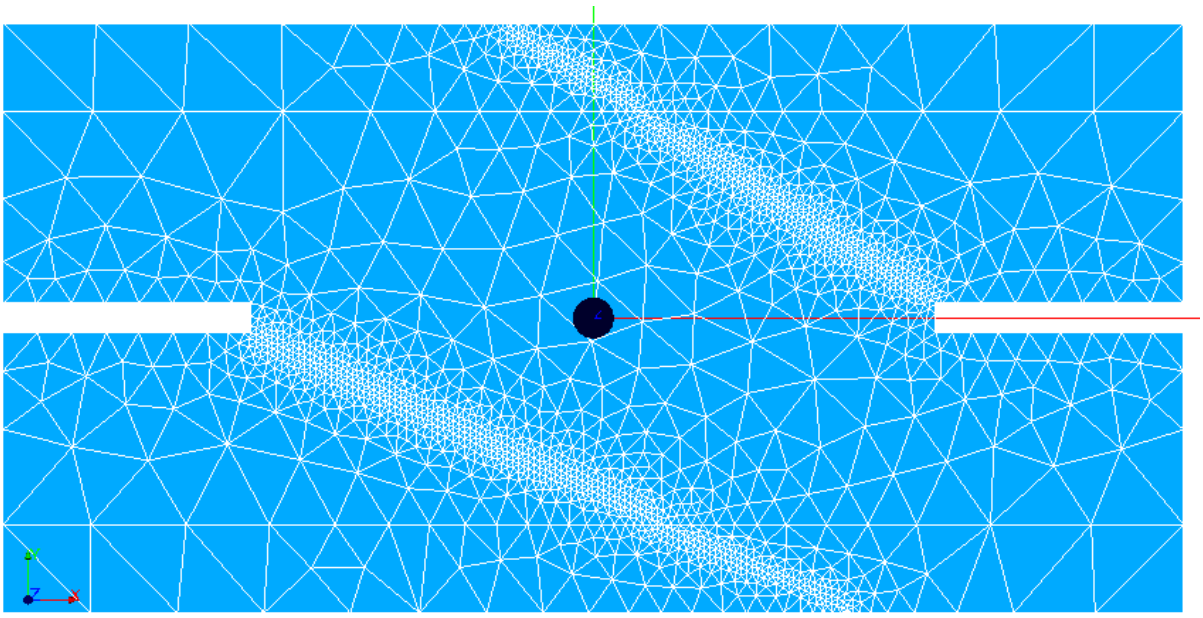
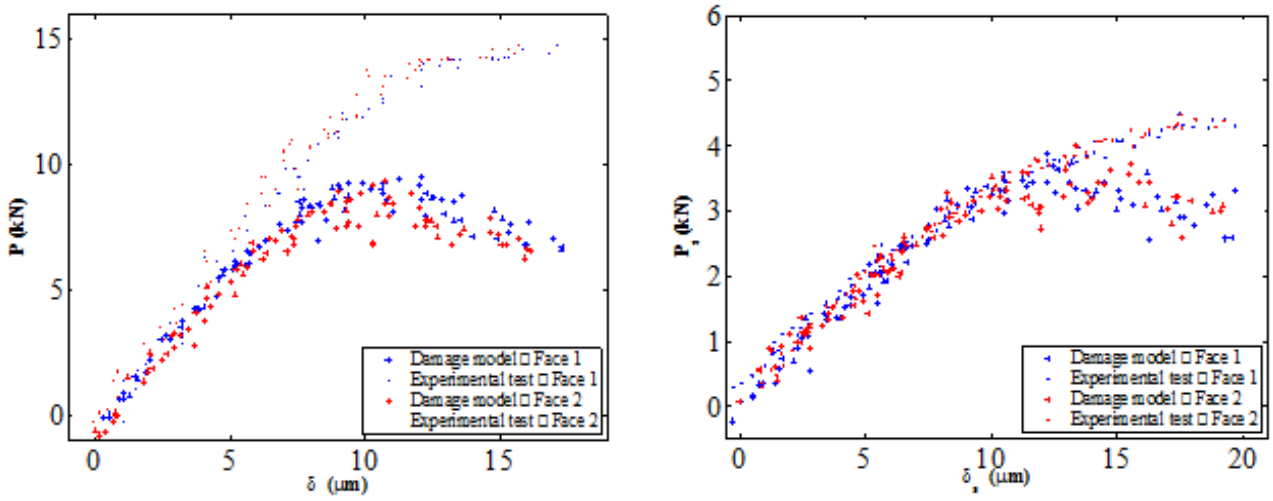


Figure 10 : Maillage de la zone de propagation de fissure d'avantage raffiné

3.3 Grandeurs testées et résultats

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

On teste les courbes force-déplacement pour un faible endommagement où les écarts par rapport à l'expérience sont acceptables.



(a) (b)

Figure 11 : Comparaison des courbes force-déplacement pour la loi ENDO_SCALAIRE en traction (a) et en cisaillement (b)

On note $F_n(\delta_n)$ $F_s(\delta_s)$ les deux réponses force-déplacement en traction et en cisaillement .

Grandeur testée $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_s = 4{,}594185\,\mu m$	1.733620 kN	6%
$\delta_s = 7.245909\,\mu m$	2.494870 kN	7%
$\delta_s = 8.445596\,\mu m$	3.039000 kN	2%

Grandeur testée $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_n = 9.396203\,\mu m$	1.416780 kN	2%
$\delta_n = 2.775601\,\mu m$	3.519630 kN	4%
$\delta_n = 8.284375\,\mu m$	10.99950 kN	1%

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

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

On considère une modélisation d'endommagement D_PLAN_ GRAD_VARI qui est, sous l'hypothèse de déformation plane, une formulation mixte Lagrangienne d'endommagement régularisés par le gradient d'endommagement.

Loi d'endommagement (matériau) : ENDO_FISS_EXP

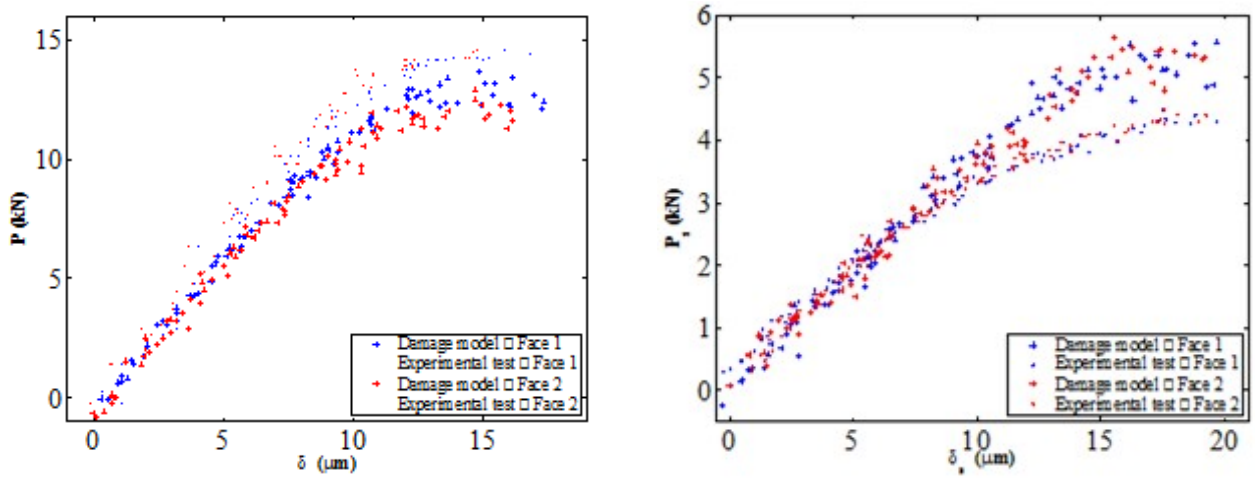
Les propriétés des matériaux sont définies à l'aide de la commande DEFI_MATER_GC.

4.2 Caractéristiques du maillage

L e maillage est identique à celui de la m odélisation A .

4.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les courbes force-déplacement pour un faible endommagement où les écarts par rapport à l'expérience sont acceptables.



(a) (b)

Figure 12 : Comparaison des courbes force-déplacement pour la loi ENDO_FISS_EXP en traction (a) et en cisaillement (b)

Le trajet de fissuration semble aussi être proche des résultats expérimentaux.

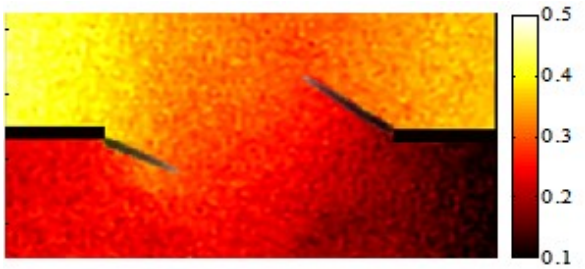


Figure 1 3 : Comparaison du trajet de fissuration entre numérique et essai expérimental

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

On note $F_n(\delta_n)$ $F_s(\delta_s)$ les deux réponses force-déplacement en traction et en cisaillement.

Grandeur testée $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_s = 7.937556 \mu m$	2.761790 kN	4%
$\delta_s = 8.445596 \mu m$	3.039000 kN	1%
$\delta_s = 9.459026 \mu m$	3.055320 kN	7

Grandeur testée $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_n = 0.939620 \mu m$	1.416780 kN	2%
$\delta_n = 8.284375 \mu m$	11.07440 kN	1%
$\delta_n = 9.614866 \mu m$	11.89400 kN	1%

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

5 Modélisation C

5.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation identique à la modélisation A en considérant le chargement mécanique de la face B de l'éprouvette.

5.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est identique à celui de la modélisation A .

5.3 Grandeurs testées et résultats

On note $F_n(\delta_n)$ $F_s(\delta_s)$ les deux réponses force-déplacement en traction et en cisaillement.

Grandeur testée $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_s = 8.196182 \mu m$	3.039000 kN	5%
$\delta_s = 5.670783 \mu m$	2.332340 kN	10%
$\delta_s = 11.23708 \mu m$	3.702100 kN	8%

Grandeur testée $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_n = 4.082746 \mu m$	5.566070 kN	2%
$\delta_n = 5.540330 \mu m$	7.500930 kN	1%
$\delta_n = 6.811528 \mu m$	8.859200 kN	3%

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

6 Modélisation D

6.1 Caractéristiques de la modélisation

M odélisation identique à la modélisation B en considérant le chargement mécanique de la face B de l'éprouvette.

6.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est identique à celui de la modélisation A .

6.3 Grandeurs testées et résultats

On note $F_n(\delta_n)$ $F_s(\delta_s)$ les deux réponses force-déplacement en traction et en cisaillement.

Grandeur testée $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_s = 2.564460 \mu m$	1.112780 kN	3%
$\delta_s = 7.037655 \mu m$	2.761790 kN	1%
$\delta_s = 8.196182 \mu m$	3.039000 kN	2%

Grandeur testée $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_n = 4.082746 \mu m$	5.566070 kN	2%
$\delta_n = 5.540330 \mu m$	7.500930 kN	1%
$\delta_n = 14.29160 \mu m$	14.18560 kN	2%

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

7 Modélisation E

7.1 Caractéristiques de la modélisation

On considère une modélisation d'endommagement D_PLAN_ GRAD_VARI qui est, sous l'hypothèse de déformation plane, une formulation mixte Lagrangienne d'endommagement régularisés par le gradient d'endommagement.

Loi d'endommagement (matériau) : ENDO_SCALAIRE

7.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est identique à celui de la modélisation A .

7.3 Grandeurs testées et résultats

On note $F_n(\delta_n)$ $F_s(\delta_s)$ les deux réponses force-déplacement en traction et en cisaillement.

Grandeur testée $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_s=-8.051796\,\mu m$	2.420760 kN	10%
$\delta_s=-10.84549\,\mu m$	2.916370 kN	1%
$\delta_s=-13.08019\,\mu m$	3.227550 kN	1%

Grandeur testée $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_n=7.486336\,\mu m$	7.592210 kN	3%
$\delta_n=0.8830637\,\mu m$	3.562730 kN	5%
$\delta_n=1.303476\,\mu m$	3.544190 kN	12%

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

8 Modélisation F

8.1 Caractéristiques de la modélisation

On considère une modélisation d'endommagement D_PLAN_ GRAD_VARI qui est, sous l'hypothèse de déformation plane, une formulation mixte Lagrangienne d'endommagement régularisés par le gradient d'endommagement.

Loi d'endommagement (matériau) : ENDO_ FISS_EXP

8.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est identique à celui de la modélisation A .

8.3 Grandeurs testées et résultats

On note $F_n(\delta_n)$ $F_s(\delta_s)$ les deux réponses force-déplacement en traction et en cisaillement.

Grandeur testée $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_s=-10.84549\,\mu m$	2.916370 kN	1%
$\delta_s=-13.08019\,\mu m$	3.227550 kN	2%
$\delta_s=34.64022\,\mu m$	3.506990 kN	8%

Grandeur testée $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_n=7.486336\,\mu m$	7.592210 kN	3%
$\delta_n=0.8830637\,\mu m$	3.562730 kN	2%
$\delta_n=17.10412\,\mu m$	9.761750 kN	5%

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

9 Modélisation G

9.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation identique à la modélisation E en considérant le chargement mécanique de la face B de l'éprouvette.

9.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est identique à celui de la modélisation A .

9.3 Grandeurs testées et résultats

On note $F_n(\delta_n)$ $F_s(\delta_s)$ les deux réponses force-déplacement en traction et en cisaillement.

Grandeur testée $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_s=-12.66800\,\mu m$	3.339740 kN	9%
$\delta_s=-14.47880\,\mu m$	3.332610 kN	11%
$\delta_s=-9.405434\,\mu m$	2.524130 kN	5%

Grandeur testée $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_n=4.509141\,\mu m$	5.098690 kN	13%
$\delta_n=6.211120\,\mu m$	4.196010 kN	6%
$\delta_n=6.617244\,\mu m$	4.242870 kN	7%

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

10 Modélisation H

10.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation identique à la modélisation F en considérant le chargement mécanique de la face B de l'éprouvette.

10.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est identique à celui de la modélisation A .

10.3 Grandeurs testées et résultats

On note $F_n(\delta_n)$ $F_s(\delta_s)$ les deux réponses force-déplacement en traction et en cisaillement.

Grandeur testée $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_s=-4.876392\mu m$	1.777070 kN	4%
$\delta_s=-12.27014\mu m$	3.237000 kN	8%
$\delta_s=8.580664\mu m$	2.138100 kN	8%

Grandeur testée $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_n=3.916133\mu m$	3.442150 kN	8%
$\delta_n=5.783969\mu m$	4.157340 kN	5%
$\delta_n=9.773617\mu m$	5.942590 kN	1%

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

11 Modélisation I

11.1 Caractéristiques de la modélisation

On considère une modélisation d'endommagement D_PLAN_ GRAD_VARI qui est, sous l'hypothèse de déformation plane, une formulation mixte Lagrangienne d'endommagement régularisés par le gradient d'endommagement.

Loi d'endommagement (matériau) : ENDO_SCALAIRE

11.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage contient 1684 éléments TRIA6 . La zone de propagation de fissure est raffinée d'avantage.

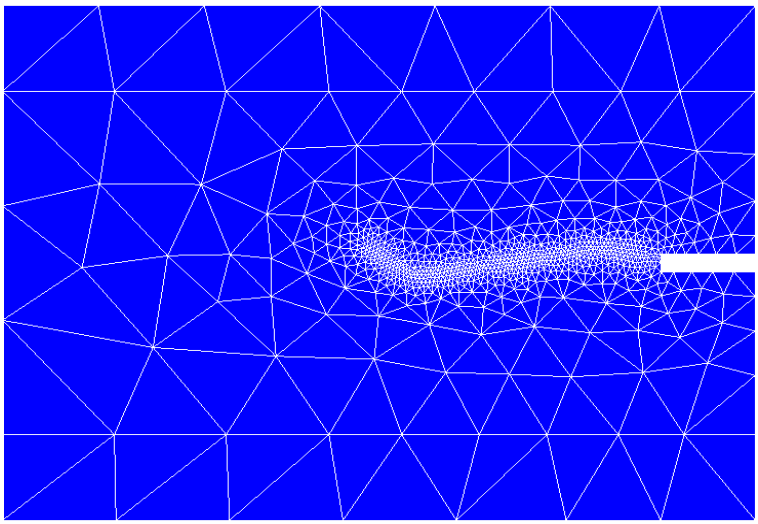
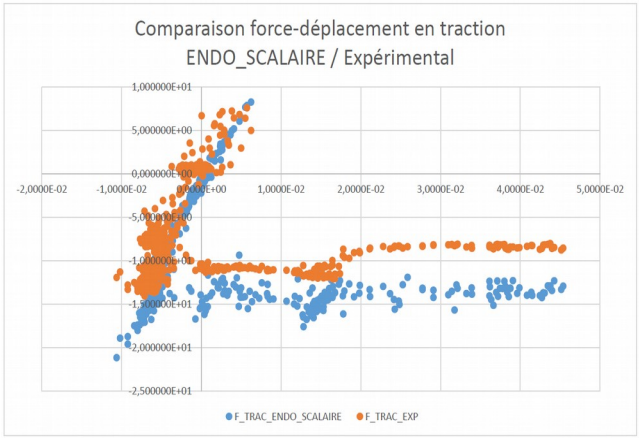


Figure 1 4 : Maillage de la zone de propagation de fissure d'avantage raffiné

11.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les courbes force-déplacement pour un faible endommagement où les écarts par rapport à l'expérience sont acceptables.



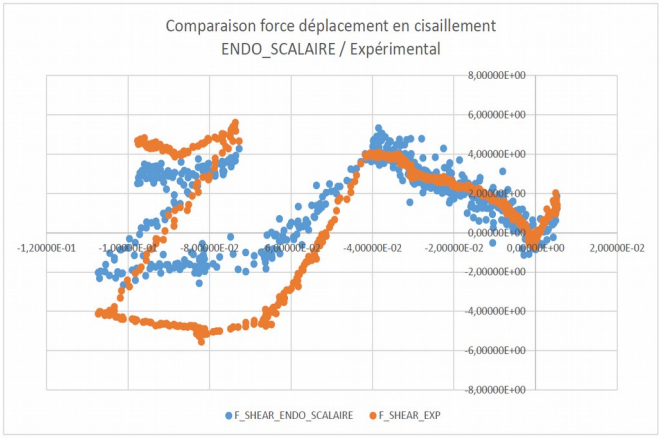


Figure 15 : Comparaison courbe force-déplacement expérimentale en traction(a) et en cisaillement (b).

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

On note $F_n(\delta_n)$ $F_s(\delta_s)$ les deux réponses force-déplacement en traction et en cisaillement .

Grandeur testée $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_s=-7.252218\,\mu m$	1.383070 kN	1 %
$\delta_s=-15.86792\,\mu m$	2.370920 kN	6 %
$\delta_s=-18.62813\,\mu m$	2.420910 kN	4 %

Grandeur testée $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_n=4.735272\,\mu m$	6.420840 kN	3 %
$\delta_n=-4.337343\,\mu m$	-8.391000 kN	1 %
$\delta_n=-2.646843\,\mu m$	-9.486920 kN	1 %

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

12 Modélisation J

12.1 Caractéristiques de la modélisation

On considère une modélisation d'endommagement D_PLAN_GRAD_VARI qui est, sous l'hypothèse de déformation plane, une formulation mixte Lagrangienne d'endommagement régularisés par le gradient d'endommagement.

Loi d'endommagement (matériau) : ENDO_FISS_EXP

Les propriétés des matériaux sont définies à l'aide de la commande DEFI_MATER_GC.

12.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est identique à celui de la modélisation I .

12.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les courbes force-déplacement pour un faible endommagement où les écarts par rapport à l'expérience sont acceptables.

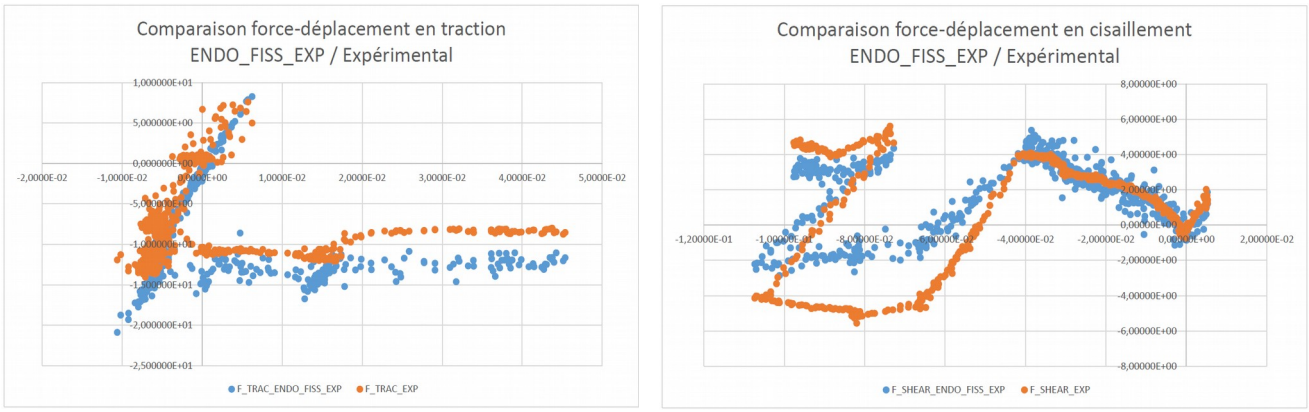


Figure 15 : Comparaison courbe force-déplacement expérimentale en traction(a) et en cisaillement (b).

On note $F_n(\delta_n)$ $F_s(\delta_s)$ les deux réponses force-déplacement en traction et en cisaillement .

Grandeur testée $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_s=-7.252218\,\mu m$	1.364470 kN	2 %
$\delta_s=-12.42866\,\mu m$	2.121140 kN	7 %
$\delta_s=-18.62813\,\mu m$	2.420910 kN	4 %

Grandeur testée $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_n=4.735272\,\mu m$	6.420840 kN	3 %
$\delta_n=-3.761587\,\mu m$	-7.491850 kN	6 %
$\delta_n=-4.116827\,\mu m$	-11.44100 kN	3 %

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

13 Modélisation K

13.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation identique à la modélisation I en considérant le chargement mécanique de la face B de l'éprouvette.

13.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est identique à celui de la modélisation I .

13.3 Grandeurs testées et résultats

On note $F_n(\delta_n)$ $F_s(\delta_s)$ les deux réponses force-déplacement en traction et en cisaillement.

Grandeur testée $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_s=-10.91707\,\mu m$	1.87961 kN	2 %
$\delta_s=-28.82857\,\mu m$	2.86711 kN	4 %
$\delta_s=-35.21950\,\mu m$	3.92885 kN	6 %

Grandeur testée $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_n=-4.723722\,\mu m$	-9.8967 kN	9 %
$\delta_n=-3.986515\,\mu m$	-1.1032 kN	1 %
$\delta_n=-3.443790\,\mu m$	-10.857 kN	2 %

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

14 Modélisation L

14.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation identique à la modélisation J en considérant le chargement mécanique de la face B de l'éprouvette.

14.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est identique à celui de la modélisation I .

14.3 Grandeurs testées et résultats

On note $F_n(\delta_n)$ $F_s(\delta_s)$ les deux réponses force-déplacement en traction et en cisaillement.

Grandeur testée $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_s=-10.91707\,\mu m$	1.87961 kN	2 %
$\delta_s=-28.82857\,\mu m$	2.86711 kN	4 %
$\delta_s=-35.21950\,\mu m$	3.92885 kN	7 %

Grandeur testée $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_n=-4.723722\,\mu m$	-9.8967 kN	8 %
$\delta_n=-3.986515\,\mu m$	-1.1032 kN	3 %
$\delta_n=-3.443790\,\mu m$	-10.857 kN	3 %

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

15 Synthèse des résultats

Ce test démontre la robustesse et la performance de la modélisation GRAD_VARI. Les lois ENDO_SCALAIRE et ENDO_FISS_EXP reproduisent bien le chemin de fissuration obtenu expérimentalement, néanmoins la réponse en force-déplacement n'est cohérente que pour un niveau d'endommagement faible.

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