SSNP168 - Endommagement d'une éprouvette doublement entaillée

Résumé :

C'est un test d'endommagement d'une éprouvette doublement entaillée. Son but est de valider des modèles d'endommagement et de caractériser le béton utilisé dans le cadre du projet Vercors. Les conditions aux limites sont celles obtenue par la corrélation d'image sur le travail de référence (les travaux de A. Carpiuc pendant sa thèse [bib1]).

Pour obtenir ce test on s'est basé sur les essais de Nooru-Mohamed réalisés sur des éprouvettes de béton à double entaille sollicitées en mode mixte de fissuration. Dans le cas présent le chargement mécanique est appliqué par une machine d'essai à six dégrées de liberté, l'hexapode, et pour obtenir la précision exigée, la machine est pilote en 3D par mesures de champ. Grâce au chargement non triviale et à la géométrie complexe de l'éprouvette ce test est très discriminent. Il est aussi riche, comme il y a une considérable partie de propagation stable de la fissure et aussi parce que des mesures de champ à la fois 2D et 3D par corrélation d'images numériques (CIN) sont utilisées. Ces champs des 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 de l'endommagement pour les problèmes sous hypothèse de déformations planes.

La loi de comportement utilisée est un loi d'endommagement dissymétrique.

Modélisation A : ENDO_SCALAIRE
Modélisation B : ENDO_FISS_EXP

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

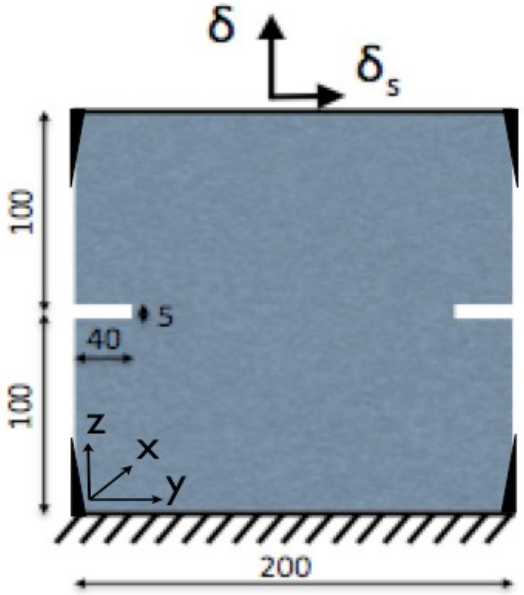


Figure 1 : Géométrie de l'éprouvette

On considère une plaque 2D doublement entaillée de dimension $200\,mm \times 200\,mm$. Chacune des deux entailles est symétrique par rapport à l'axe médiane horizontale. Les deux entailles sont symétriques par rapport à l'axe médiane verticale. Les entailles ont une hauteur de $5\,mm$ et une largeur de $40\,mm$.

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) :

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

1.3 Conditions aux limites et chargements

Chargement :
On applique le chargement en déplacement contrôlé sur les FACE_SUP et FACE_INF étant encastré. Les autres surfaces sont libres de contraintes.
Les mesures de champs des déplacements expérimentaux, obtenues par la corrélation d'images, sont utilisés pour réaliser des simulations numériques. Il ne se retrouve pas exactement sur les lieux

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

d'application des conditions aux limites réelles (FACE_SUP => FC_HAUT, FACE_INF => FC_BAS). La taille de la partie simulée de l'éprouvette est alors réduite (voir Fig.2). Le chargement est néanmoins proche de chargement proportionnel en traction-cisaillement.

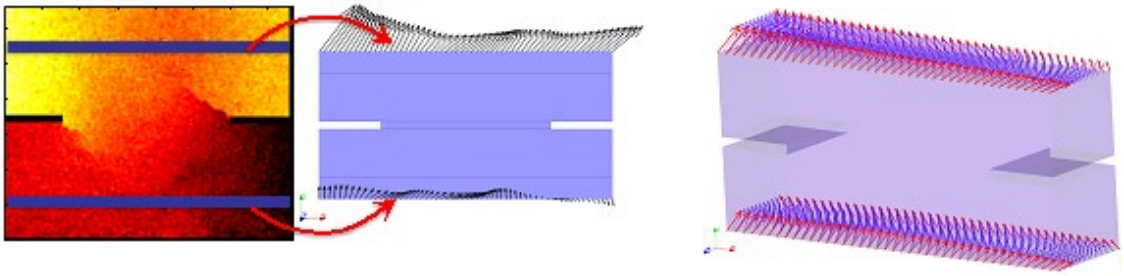


Figure 2 : **Conditions aux limites mesurées sont appliquées dans les simulations**

Bord rigide :
La présence de la singularité de contrainte aux limites des bords de chargement génèrent de la fissuration parasite :

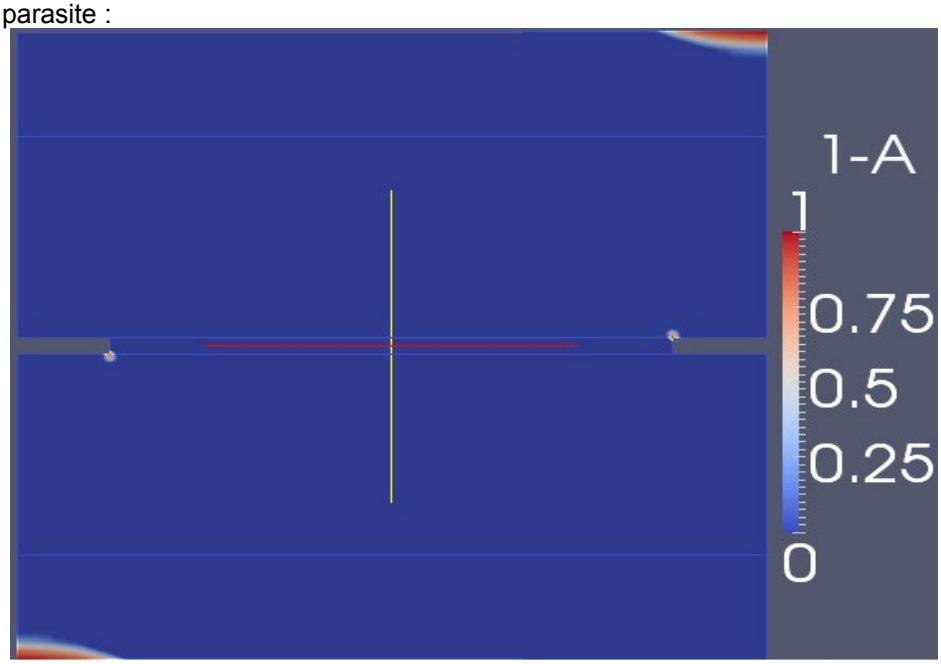


Figure 3 : Amorçage de l'endommagement parasite aux abords

Dans la suite, l'endommagement va se propager en suivant les deux interfaces horizontales comme illustré dans la figure 3. Ce phénomène n'est pas observé en réalité.

Pour rémédier à ce problème, on crée deux couches au niveau des interfaces. Le matériau associé est rendu plus résistant que le béton. Les deux couches sont respectivement nommées 'SINGU_H' et 'SINGU_B' dans le maillage . L'endommagement est bloqué artificiellement, mais ceci peut bien corréspondre aux cas réels grâce au traîtement des surfaces.

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

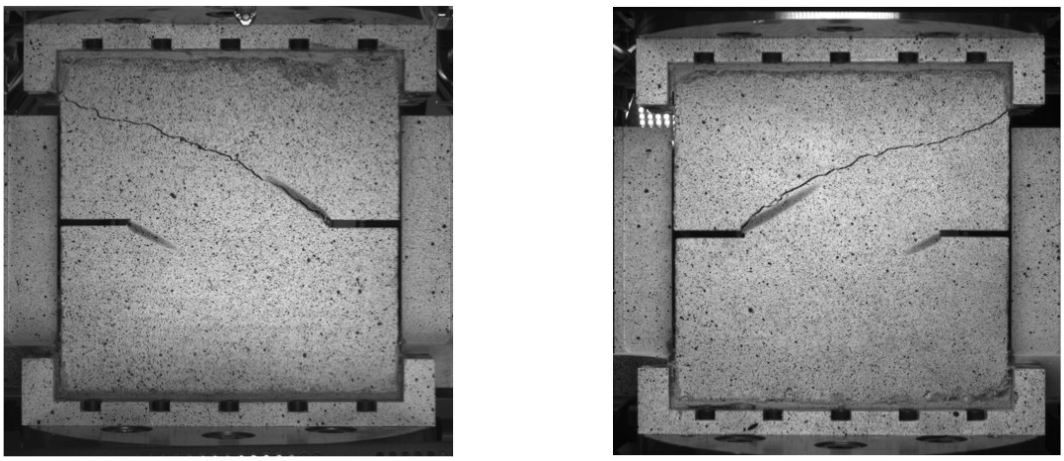
2 Solution de référence

2.1 Méthode de calcul

Conditions aux limites:
Les conditions aux limites issues de la corrélation d'images sont appliquées directement : les fichiers correspondants sont ssnp168a.23 (FC_HAUT) ssnp168a.24 (FC_BAS).

2.2 Résultat de l'expérience et simulations

Fissuration
Lors de l'essai on obtient la propagation stable de deux fissures. Ces deux trajets sont reproduits par des simulations numériques.

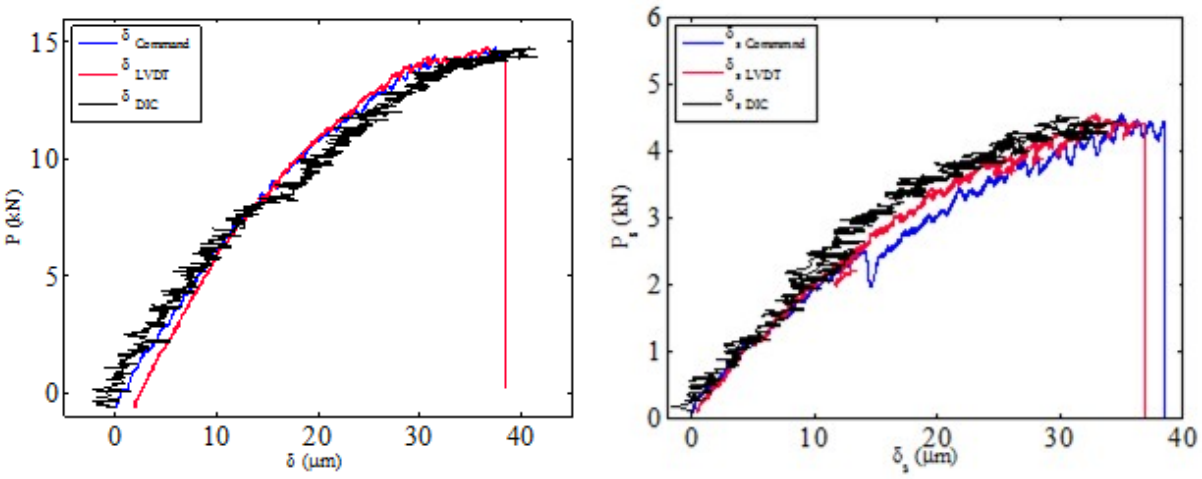


(a) (b)

Figure 3 : **Comparaison entre les trajets de fissuration du modèle d'endommagement (lignes noires épaisses) et de l'expérience (a) face 1, (b) face 2.**

Réponse force-déplacement :
Les deux lois de comportement testées (ENDO_SCALAIRE et ENDO_FISS_EXP) n'arrive pas à reproduire courbe totale de la réponse en force-déplacement. La comparaison montre que l'endommagement numérique arrive trop tôt par rapport à la courbe réelle.
On les trouve dans les fichiers ssnp168a.29 (traction) ssnp168a.30 (cisaillement).

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)



(a) (b)

Figure 4 : **Courbe force-displacement 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.

Grandeurs de référence $F_s(\delta_s)$	**Valeurs de référence**
$\delta_s = 6.25548\ \mu m$	2.0005900 kN
$\delta_s = 9.45903\ \mu m$	3.0553200 kN
$\delta_s = 19.8916\ \mu m$	4.3964800 kN

Grandeurs de référence $F_n(\delta_n)$	**Valeurs de référence**
$\delta_n = 4.78648\ \mu m$	6.347980 kN
$\delta_n = 7.70062\ \mu m$	10.14350 kN
$\delta_n = 15.8947\ \mu m$	14.76430 kN

Copyright 2015 EDF R&D - 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 de l'endommagement. Elle prend en compte en plus les degrés de liberté de déplacement et d'endommagement aux nœuds, les coefficients de Lagrange.

Loi d'endommagement (matériau) : ENDO_SCALAIRE

Les caractéristiques standards du béton sont définit précédemment.

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 $1\mathrm{D}$ égale à $D=3\,\mathrm{mm}$.

La correspondance avec les paramètres physiques est la suivante :

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

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

3.2 Caractéristiques du maillage

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

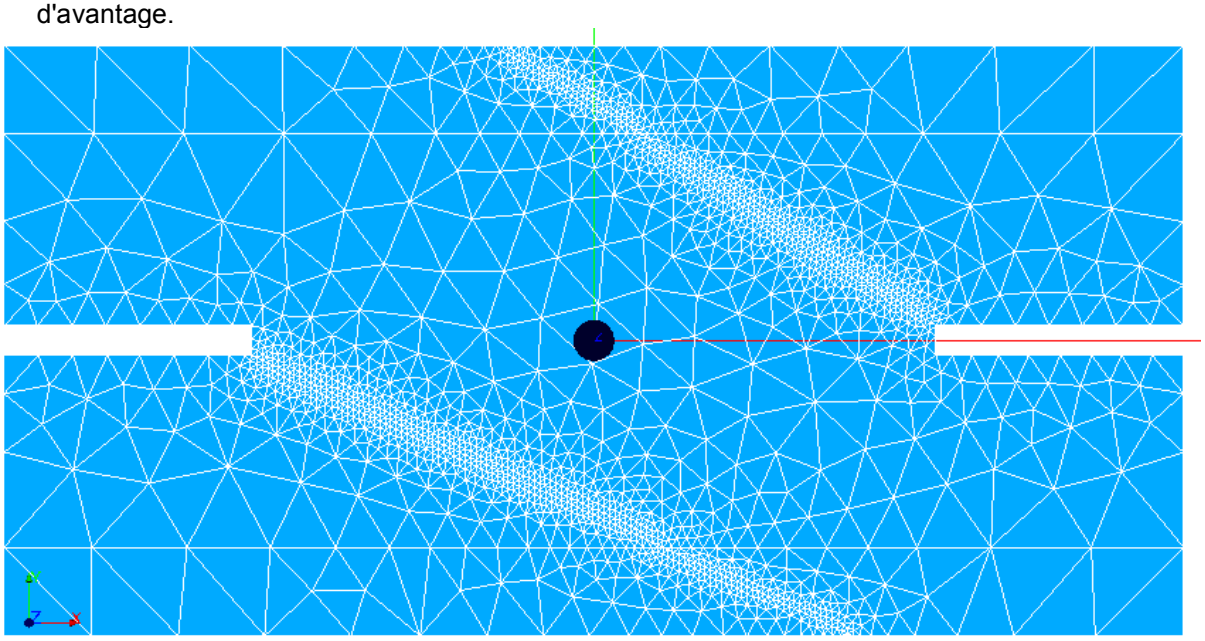
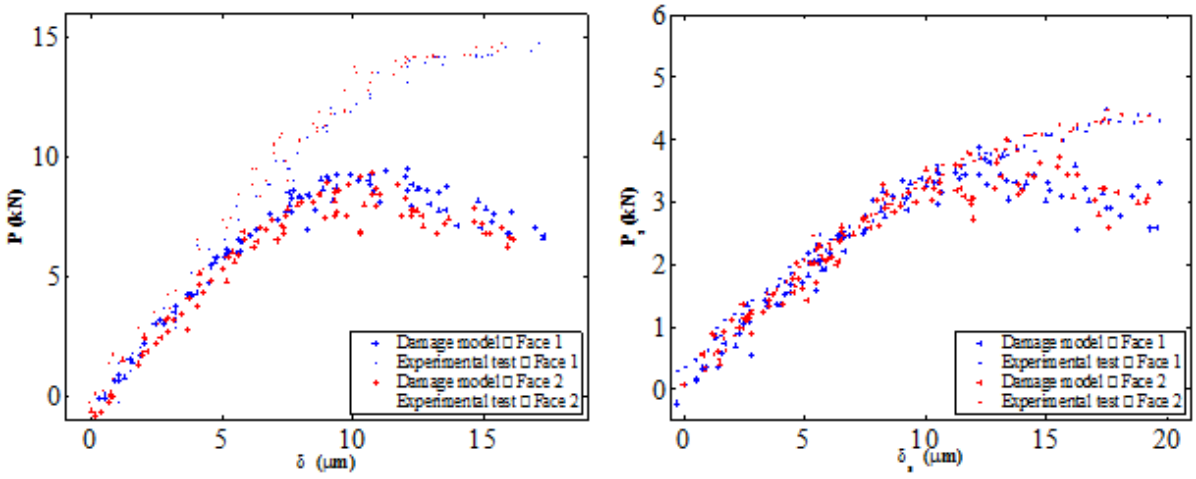


Figure 5 : Maillage de la zone de propagation de fissure est d'avantage raffiné

3.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les courbes force-déplacement à l'état d'endommagement faible.

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)



(a) (b)

Figure 6 : Comparaison force-déplacement (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
$\delta_s = 6.25548\ \mu m$	2.0005900 kN	1%
$\delta_s = 9.45903\ \mu m$	3.0553200 kN	7%
$\delta_s = 19.8916\ \mu m$	4.3964800 kN	15%

Grandeur testée $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_n = 4.78648\ \mu m$	6.347980 kN	5%
$\delta_n = 7.70062\ \mu m$	10.14350 kN	2%
$\delta_n = 15.8947\ \mu m$	14.76430 kN	12%

D es tests de non régression sont également réalisés pour s'assurer de la stabilité des développements inf ormatiques, ils ne sont pas présentés ici.

Copyright 2015 EDF R&D - 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 de l'endommagement. Elle prend en compte en plus les degrés de liberté de déplacement et d'endommagement aux nœuds, les coefficients de Lagrange.

Loi d'endommagement (matériau) : ENDO_FISS_EXP

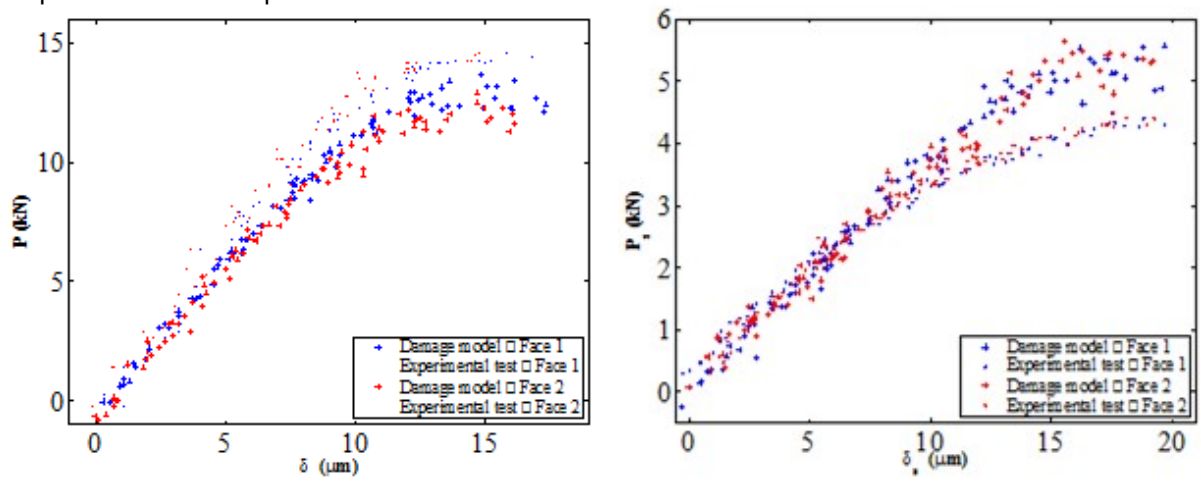
Les propriétés matériaux sont définies à l'aide de la commande DEFI_MAT_GC

4.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage contient 3278 éléments TRIA6. Même que dans la modélisation **A**.

4.3 Grandeurs testées et résultats

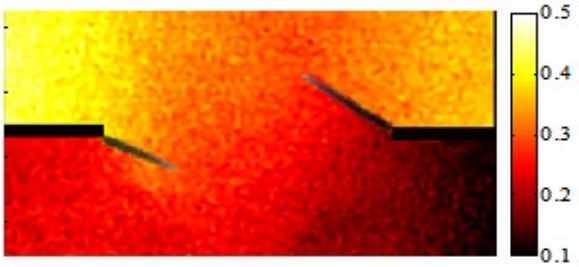
On teste les courbes force-déplacement à l'état d'endommagement faible où les écarts par rapport à l'expérience sont acceptables.



(a) (b)

Figure 6 : Comparaison force-displacement (ENDO_FISS_EXP) en traction(a) et en cisaillement (b).

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



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

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Grandeur testée $F_s(\delta_s)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_s = 6.25548\ \mu m$	2.0005900kN	1%
$\delta_s = 9.45903\ \mu m$	3.0553200 kN	7%
$\delta_s = 19.8916\ \mu m$	4.3964800 kN	25%

Grandeur testée $F_n(\delta_n)$	Valeurs de référence	Tolérance
$\delta_n = 4.78648\ \mu m$	6.347980 kN	5%
$\delta_n = 7.70062\ \mu m$	10.14350 kN	2%
$\delta_n = 15.8947\ \mu m$	14.76430 kN	12%

Des tests de non régression sont également réalisés pour s'assurer de la stabilité des développements infor matiques, ils ne sont pas présentés ici.

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

5 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, néanmoins la réponse en force-déplacement n'est cohérente que pour le niveau faible d'endommagement.

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)