ZZZZ264 – Validation de la commande POST_ENDO_FISS

Résumé :

Ce cas-test permet de valider la commande POST_ENDO_FISS, qui permet la recherche d'un trajet de fissuration et l'ouverture de fissure à partir d'un calcul mécanique d'endommagement. Trois cas-tests sont proposés :

- le trajet de fissuration sur un champ analytique,
- ouverture de fissure sur étude calculée avec la loi ENDO_SCALAIRE / GRAD_VARI,
- ouverture de fissure sur étude calculée avec la loi MAZARS.

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

1 Problème de référence : recherche du trajet de fissuration sur un résultat analytique

1.1 Génération du champ

Dans ce premier test on recherche le trajet de fissuration sur un champ artificiel, c'est-à-dire créé analytiquement et non issu d'un calcul mécanique. L'avantage est que le trajet de fissuration est connu *a priori*, donc on peut le comparer au trajet résultant de la commande.

Avec la Figure 1.1-1, on montre le champ artificiel sur lequel on va tester la commande, sur le domaine x, y .

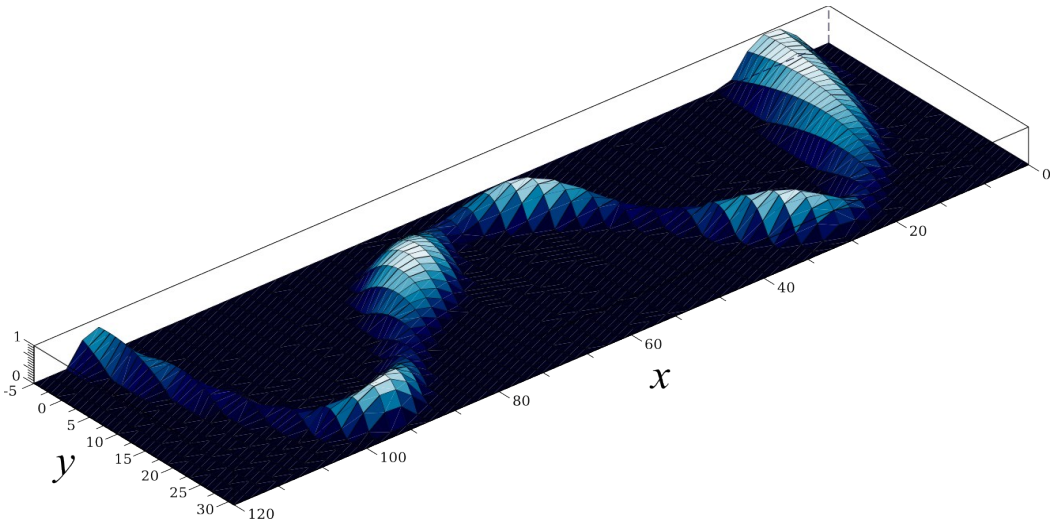


Figure 1.1-1 : champ à post-traiter discrétisé sur le maillage.

Pour la génération du champ, on a d'abord fixé le trajet de fissuration, puis le champ est donné par une fonction définie sur le profil orthogonal à la fissure en chacun de ses points.

Le trajet de fissuration est le polynôme de degré 4 qui passe par les points :
$P1=(10.,0.)$, $P2=(35.,20.)$, $P3=(60.,0.)$, $P4=(85.,20.)$, $P5=(110.,0.)$

Sur le profil orthogonal d'abscisse curviligne r , on définit un profil parabolique $z=-a_1 r^2+a_2$ borné inférieurement à la valeur minimale $valmin$ du champ (ici, 10^{-6}). Le champ résultant est partout égal à $valmin$, sauf au voisinage de la fissure ; on crée ainsi une zone « endommagée » artificielle.

La largeur de la zone endommagée ainsi que la valeur du champ sont variables le long de la fissure :

$$a_1=-0.04\cos(0.1(x-x_{P_1}))+0.0667 \quad \textbf{éq 1.1-1}$$

$$a_2=(\cos(0.3(x-x_{P_1}))+2)/3 \quad \textbf{éq 1.1-2}$$

Le champ décrit a été discrétisé sur un maillage à mailles rectangulaires de taille $dx=2.45$, $dy=1$, sur un domaine 120×40 .

Dans le cas-test, on donne directement le fichier MED contenant le champ à post-traiter, contenu dans une structure données de type résultat (`evol_noli`), et créé précédemment à l'aide des commandes `CREA_CHAMP` et `CREA_RESU`, afin de rendre le cas-test plus rapide. Comme la commande ne traite que des champs aux nœuds, le champ analytique est stocké dans le champ aux nœuds `DEPL`, sous

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

la composante DX (le champ VARI_NOEU, qui contient normalement l'endommagement, n'est en effet pas disponible dans CREA_CHAMP).

1.2 Paramètres de la commande

Les paramètres utilisés pour la recherche du trajet de fissuration sont les suivants :

LONG_ORTH = 20,
PAS = 2,
LONG_REG = 4,
SEUIL = 10^{-3}
ANGL_MAX = 180

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

2 Modélisation A

2.1 Trajet de fissuration trouvé

Le trajet de fissuration retrouvé par la commande est donné dans la Figure 2.1-1. Dans la Figure 2.1-2, la fissure est superposée à la carte du champ.

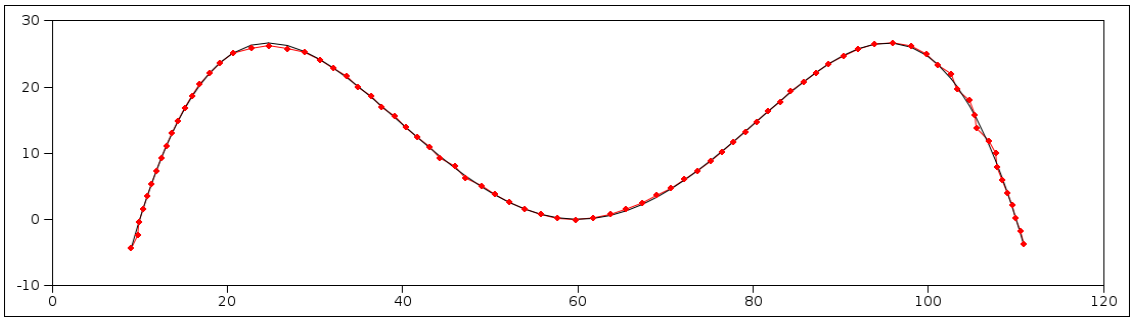


Figure 2.1-1: Trajet de fissuration théorique (noir) comparé avec celui fourni par la commande.

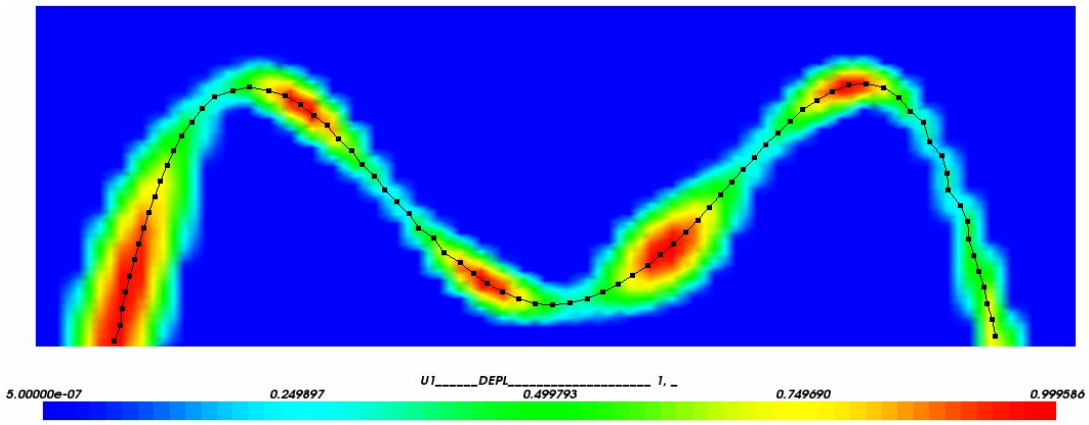


Figure 2.1-2: trajet de fissuration superposé au champ post-traité.

2.2 Grandeurs testées et résultats

On teste la distance entre les points trouvés par l'algorithme et la courbe théorique. Cette distance, stockée dans le fichier de commande du cas-test dans la table TAB_FISS, représente l'erreur absolue en chaque point. Nous vérifions alors que l'erreur maximale soit inférieure à une certaine précision. Le test est fait en absolu, car on se compare à une distance nulle. La précision demandée est 0.05, le cas-test est analytique.

2.3 Remarques

Le trajet retrouvé est très satisfaisant. La procédure reproduit bien les fortes courbures du trajet, ainsi que le variations dans la valeur du champ.

La précision est liée à la largeur de la bande endommagée, comme on le voit sur la partie droite de la Figure 2.1-2 : l'erreur est plus grande là où la largeur de la bande endommagée est exiguë.

Cela dit, normalement l'endommagement issu d'un calcul mécanique est étendu sur plusieurs éléments, pour que la convergence par rapport au raffinement soit vérifiée, ce qui limite ce type d'erreur.

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

3 Problème de référence : ouverture de fissure sur une étude avec loi d'endommagement

Dans ce cas-test, POST_ENDO_FISS recherche à la fois le trajet de fissuration et l'ouverture de fissure sur un cas-test mécanique. L'étude mécanique est effectué préalablement qui consiste en une éprouvette en traction calculée respectivement avec les loi d'endommagement ENDO_SCALAIRE puis MAZARS. Ce calcul mécanique n'est pas inclus au cas test, à cause du temps important nécessaire pour le calcul. Ainsi, un fichier MED contenant les résultats mécaniques est lu, puis la commande de post-traitement est appliquée. Enfin, l'ouverture de fissure est comparée au déplacement imposé sur le bord libre.

3.1 Géométrie, maillage et chargement.

Il s'agit d'une éprouvette bi-entaillée en traction. Les dimensions de l'éprouvette sont $1\,m \times 2\,m$; le rayon de l'entaille (semi-circulaire) est $6\,cm$. A une extrémité de l'éprouvette, un déplacement est imposé jusqu'à rupture, quand la force résultante appliquée est nulle. Les déplacements de l'autre extrémité sont bloqués dans la direction d'application du chargement.

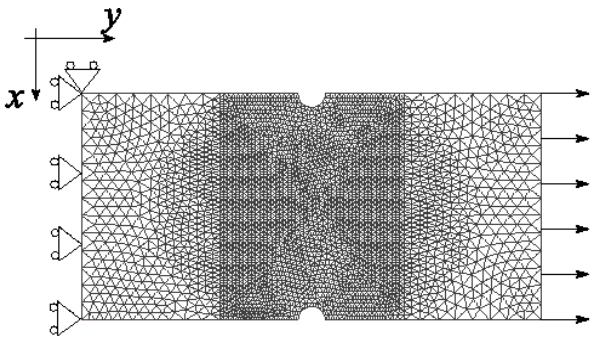


Figure 3.1-1: géométrie, maillage et conditions aux limites de l'éprouvette en traction.

3.2 Propriétés du matériau et modèles des calculs mécaniques préalables

3.2.1 Loi ENDO_SCALAIRE

La loi ENDO_SCALAIRE [R5.03.25] est utilisée , avec régularisation en gradient de variables internes [R5.04.01] et en déformations planes : modélisation D_PLAN_GRAD_VARI.

Paramètres élastiques :

$E = 40000\,MPa$ Module de Young
$\nu = 0{,}25$ Coefficient de Poisson

Paramètres d'endommagement :

$D = 0.1\,m$ Demi-largeur de la bande endommagée
$G_f = 100\,N/m$ Énergie de rupture
$SY = 2.8\,MPa$ Résistance à la traction

3.2.2 Loi MAZARS

La loi MAZARS [R7.01.08] est utilisée.

Paramètres élastiques :

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

$E=40000\,MPa$	Module de Young
$\nu=0,25$	Coefficient de Poisson

MAZARS (modélisation B) :

$\varepsilon_{d0}=SY/E=7\text{E-}5$	Seuil d'endommagement
$A_t=1$	Paramètre pour la traction
$B_t=13000$	Paramètre pour la traction
$A_c=1.09$	Paramètre pour la compression
$B_c=1600$	Paramètre pour la compression
$\beta=1.06$	Paramètre pour améliorer la réponse en cisaillement
$NON\ LOCAL=0.1\,m$	Longueur caractéristique du modèle non locale

3.3 Paramètres du post-traitement POST_ENDO_FISS

La recherche du trajet de fissuration s'effectue sur le champ d'endommagement. Nous utilisons donc la composante $V1$ du champ VARI_NOEU (car la commande prend en entrée seulement des champs aux nœuds).
La taille moyenne de la maille dans la zone endommagée est $0.02\,m$.

Les paramètres utilisées :
LONG_ORTH = $2\,m$
PAS = $0.02\,m$
LONG_REG = $0.02\,m$
SEUIL = 0.5
LIM_FPZ = 0.8
Tous les autres paramètres ont la valeur par défaut.

Il est aussi possible d'utiliser la composante VARI du champ DEPL, qui stocke également la variable d'endommagement et est un champ nodal (donc utilisable directement par la commande). Il est de même nécessaire une projection de ce champ sur un maillage linéaire, qui sera lui donné en entrée de POST_ENDO_FISS, cela pour rendre cohérents l'interpolation de la composante VARI avec celle du maillage (donc linéaires).

Le fichier de commande donne un exemple d'utilisation du champ VARI_NOEU/V1 ainsi que de DEPL/VARI.

Concernant la modélisation C, la recherche du trajet de fissuration s'effectue sur la déformation équivalente, car le champ d'endommagement ne permet pas d'identifier un vrai maximum (il est trop « plat »). Nous utilisons donc la composante $V4$ du champ VARI_NOEU.

Les paramètres utilisées dans POST_ENDO_FISS sont le même que dans la modélisation B, sauf les suivants :

SEUIL = 0.0001
LIM_FPZ = 0.0001

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

4 Modélisation B

4.1 Résultats mécaniques

La méthode de pilotage par prédiction élastique (PRED_ELAS) est utilisée. La courbe force-déplacement obtenue est dans la Figure 4.1-1 . L'éprouvette à l'instant C est complètement cassée, la force résiduelle étant proche de zéro. C'est à cet instant que l'ouverture de fissure sera calculée. L'allure des déplacements et de l'endommagement sont donnés dans les Figures 4.1-2 et 4.1-3 .

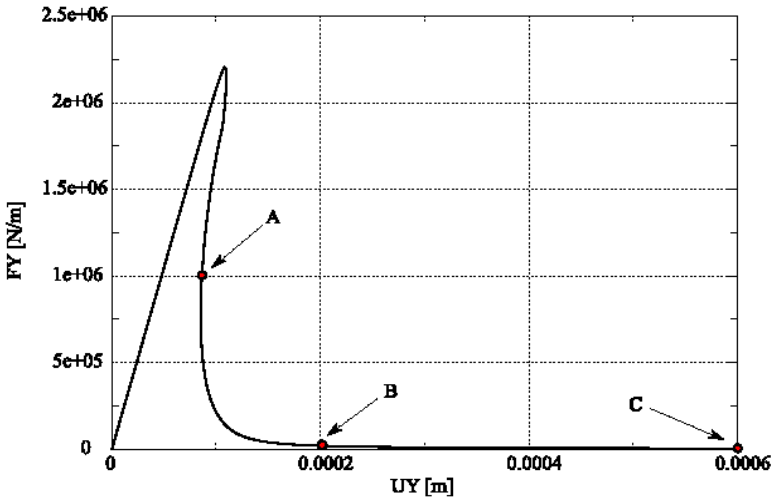


Figure 4.1-1: Courbe force-déplacement, éprouvette bi-entaillée (loi ENDO_SCALAIRE).

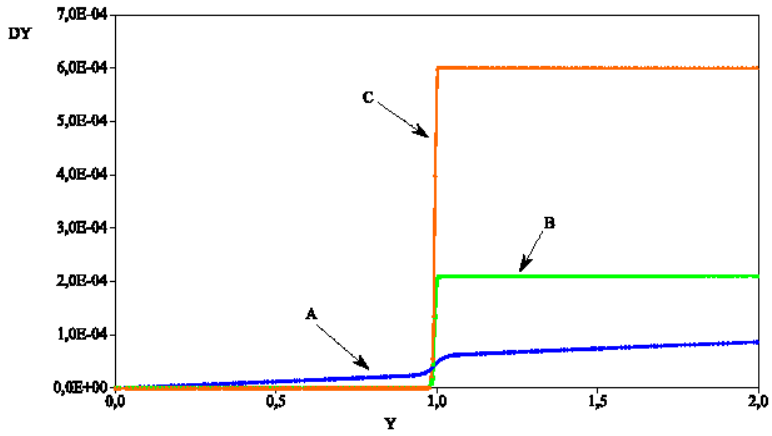


Figure 4.1-2: Déplacements sur l'axe longitudinal de l'éprouvette (loi ENDO_SCALAIRE).

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

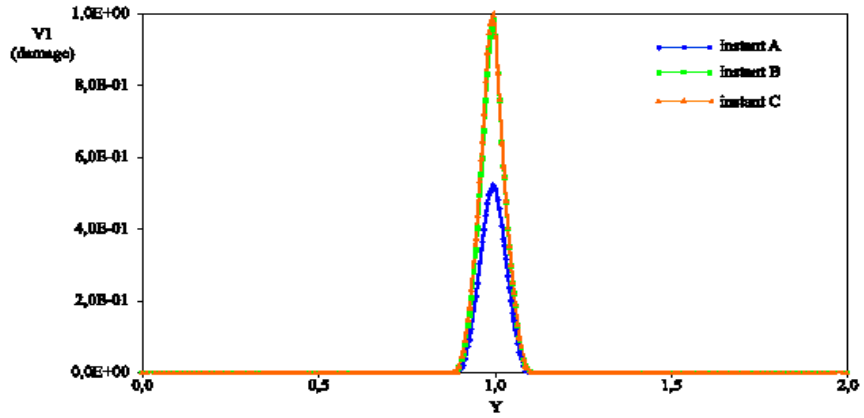


Figure 4.1-3: Endommagement sur l'axe longitudinal de l'éprouvette (loi ENDO_SCALAIRE).

4.2 Grandeurs testées et résultats

Le trajet de fissuration retrouvé à **l'instant** C est montré dans la Figure 4.2-1 pour la composante VARI du champ DEPL. Le trajet trouvé avec le champ VARI_NOEU est analogue.

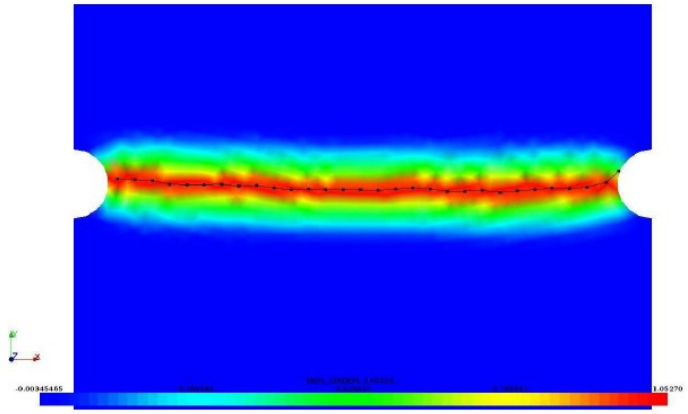


Figure 4.2-1: trajet de fissuration dans l'éprouvette bi-entaillée (loi ENDO_SCALAIRE).

A la fin du calcul, soit le trajet de fissuration, soit l'ouverture de fissure sont testés.

Pour ce qui concerne le trajet de fissuration, celui ci doit à priori se trouver sur l'axe de symétrie de l'éprouvette, sur l'axe x . On teste alors que la distance maximale à cet axe des points trouvés par la commande soit inférieure à une certaine précision. Un cas-test analytique est prévu, avec précision (absolue) égale à $1.5 \times taille\ élément = 0.03\ m$.

Pour ce qui concerne l'ouverture de fissure, celle-ci doit être égale à rupture au déplacement imposé. On propose donc un cas-test analytique, avec précision relative de 10%, et un cas-test de non régression avec précision 5%.

En résumé, si on utilise le champ VARI_NOEU, composante $V1$ pour la recherche du trajet de fissuration :

Quantité testée	Type de test	Précision demandée	Précision du cas-test

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

DY	Analytique	$0.03\,m$	$0.0129\,m$
Ouverture	Analytique	10 %	4.69 %
Ouverture	Non régression	5 %	4.69 %

Si on utilise le champ DEPL, composante VARI pour la recherche du trajet de fissuration :

Quantité testée	Type de test	Précision demandée	Précision du cas-test
DY	Analytique	$0.03\,m$	$0.0128\,m$
Ouverture	Analytique	10 %	4.97 %
Ouverture	Non régression	5 %	4.97 %

4.3 Remarques

Le trajet de fissuration trouvé est satisfaisant, toutefois la précision retrouvé est à la limite de la précision admise pour le cas-test analytique. Cela est du au fait que la loi ENDO_SCALAIRE localise beaucoup l'endommagement quand on s'approche de la rupture (endommagement=1). Selon les solutions analytiques en effet, l'endommagement vaut 1 que sur la fissure. Cela demande des maillages très fins dans la bande de localisation. Dans la Figure 4.2-1 , un chemin de fissuration plus précis aurait pu être obtenu à la suite d'un calcul mécanique utilisant un maillage plus fin.

Pour l'ouverture de fissure, les source d'erreur sont liées à :
1) trajet de fissuration pas parfaitement rectiligne,
2) force résiduelle sur l'éprouvette proche mais non égale à zéro.

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

5 Modélisation C

5.1 Résultats mécaniques

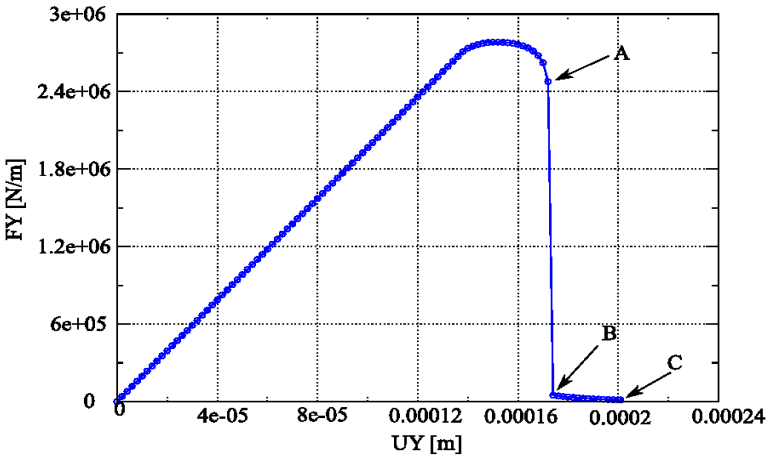


Figure 5.1-1: Courbe force-déplacement, éprouvette bi-entaillée (loi MAZARS).

Aucune méthode de pilotage est utilisée. La courbe force-déplacement obtenue est dans la Figure 5.1-1. L'éprouvette à l'instant C est complètement cassée, la force résiduelle étant proche de zéro. C'est à cet instant que l'ouverture de fissure sera calculée. L'allure des déplacements, de l'endommagement et de la déformation équivalente sont donnés dans les Figures 5.1-2, 5.1-3 et 5.1-4.

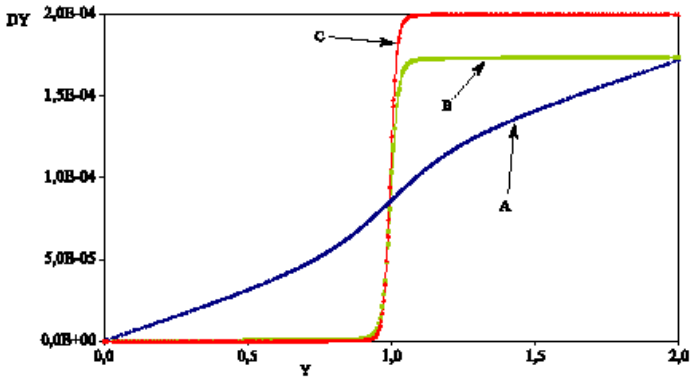


Figure 5.1-2: Déplacement sur l'axe longitudinal de l'éprouvette (loi MAZARS).

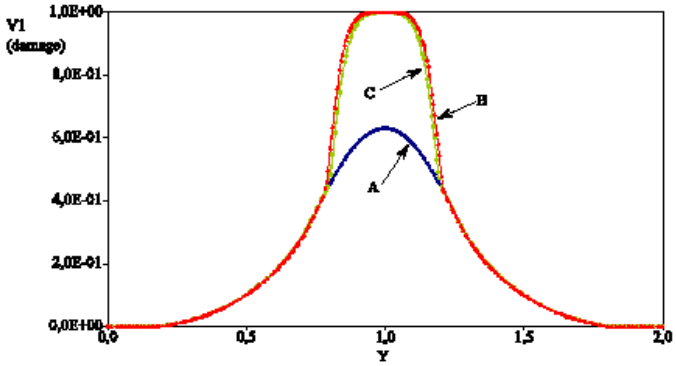


Figure 5.1-3: Endommagement sur l'axe longitudinal de l'éprouvette (loi MAZARS).

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

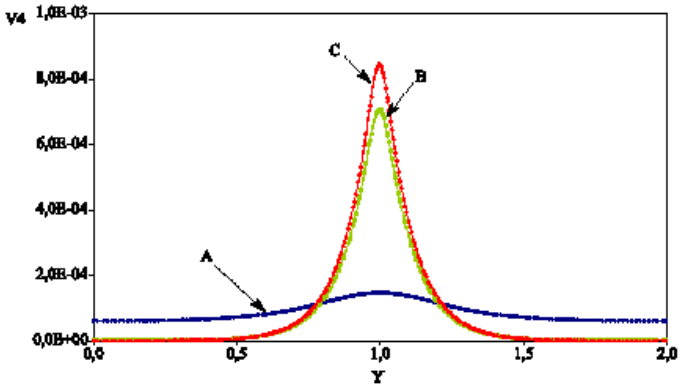


Figure 5.1-4: Déformation équivalente sur l'axe longitudinal de l'éprouvette (loi MAZARS).

5.2 Grandeurs testées et résultats

Le trajet de fissuration retrouvé à **l'instant** C est analogue à celui de la Figure 4.2-1.
Les quantités testées sont les mêmes que dans la modélisation B.

En résumé :

Quantité testée	Type de test	Précision demandée	Précision du cas-test
DY	Analytique	$0.03\,m$	$2.58\cdot10^{-3}\,m$
Ouverture	Analytique	10 %	0.683 %
DY	Non-régression	$0.01\,m$	$2.58\cdot10^{-3}\,m$
Ouverture	Non régression	1 %	0.683 %

5.3 Remarques

Le trajet de fissuration trouvé est plus précis que pour la modélisation B. Cela est dû à la loi d'endommagement utilisée, qui est moins localisée à la rupture.

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