

**Chapitre 3 Modélisation non linéaire endommageable,
application aux structures en béton armé**

3.1 Introduction

Dans le but d'étudier et de valider le comportement des structures en béton armé, plusieurs programmes de recherche ont été réalisés ces dernières années. Leur objectif est de classer par ordre de pertinence les modèles et les méthodes numériques dans le cadre de calcul des structures soumis à des chargements statiques monotones et des chargements cycliques.

Le but de ce chapitre est d'évaluer le comportement non linéaire des structures en béton armé sous différentes sollicitations cycliques et statiques en utilisant différentes lois de comportement pour l'acier et le béton, par une modélisation multifibre réalisée sous le logiciel d'élément finis CAST3M. Les résultats de simulation seront confrontés aux résultats d'expérimentation qui sont réalisées dans le cadre du projet national Français CEOS.fr (Comportement et Evaluation des Ouvrages Spéciaux Fissuration Retrait) et le projet MEFISTO (Maîtrise durable de la fissuration des infrastructures en béton), ces deux programmes sont organisés chronologiquement en deux tranches, la première (2008-2009) a pour but de faire l'état de l'art dans ce domaine, la seconde (2009-2011) de proposer des solutions aux problèmes identifiés, plus spécifiquement afin de faire progresser de façon significative les outils et les pratiques d'ingénierie en matière d'estimation et de prédiction de l'état d'endommagement lié à la fissuration des éléments de structures en béton armé, sous chargement statique monotone. A long terme, les chargements cyclique, dynamique et/ou le comportement sous gradients thermo-hydriques seront aussi abordés.

3.2 Modélisation des poutres

Les simulations sont effectuées sur trois poutres, deux poutres (1 et 8) proposées dans le cadre du projet CEOS.fr, la troisième poutre LMT a été proposée dans le cadre du projet MEFISTO, afin de compléter les différents résultats réalisés dans le projet CEOS.fr.

Les deux poutres de Benchmark (CEOS.fr) sont en béton armé et sollicitées en flexion alternée 3 points, les poutres ont une portée de 1.50 m, une hauteur de 20cm et une largeur de 15 cm avec un ferrailage différent. Les essais étant effectués en pseudo-dynamique, la vitesse de sollicitation permet de négliger les effets inertiels. Tous ces essais ont été effectués dans le cadre de la thèse du doctorat de A.Souid [24].

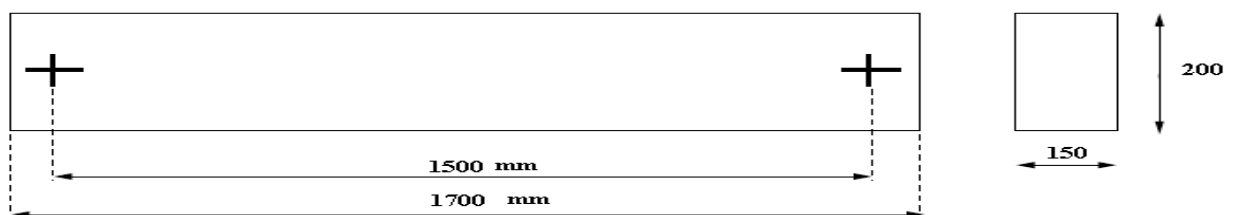


Figure3.1 Le schéma principal pour les trois poutres (1, 8 et LMT).

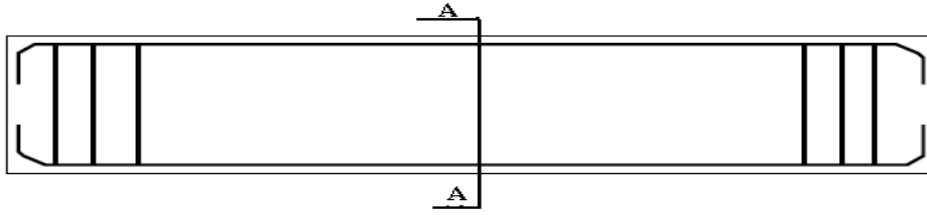


Figure 3.2 La coupe longitudinale de ferrailage pour les trois poutres (1, 8 et LMT).

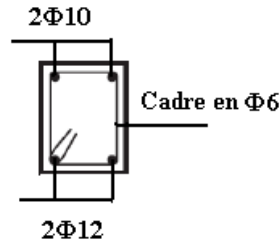


Figure 3.3 La coupe transversale (A-A) pour la poutre 8.

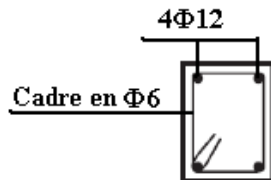


Figure 3.4 La coupe transversale (A-A) pour la poutre 1 et LMT.

La modélisation est effectuée sur des éléments en multifibres avec une poutre type Timoshenko à deux nœuds. Les lois de comportements sont basées sur la mécanique d'endommagement pour le béton et un modèle de plasticité parfaite avec écrouissage cinématique pour les aciers. Le calcul numérique est fait en multifibre 3D à l'aide de logiciel en élément finis CAST3M, les résultats de simulation seront comparés par la suite aux résultats expérimentaux.

Les poutres en multifibres sont décomposées le long de la poutre par des sections, chaque section comporte 10 fibres en béton, les aciers longitudinaux sont représentés sur chaque section suivant toute la longueur de poutre. On suppose qu'il y a une adhérence parfaite entre l'acier et le béton.

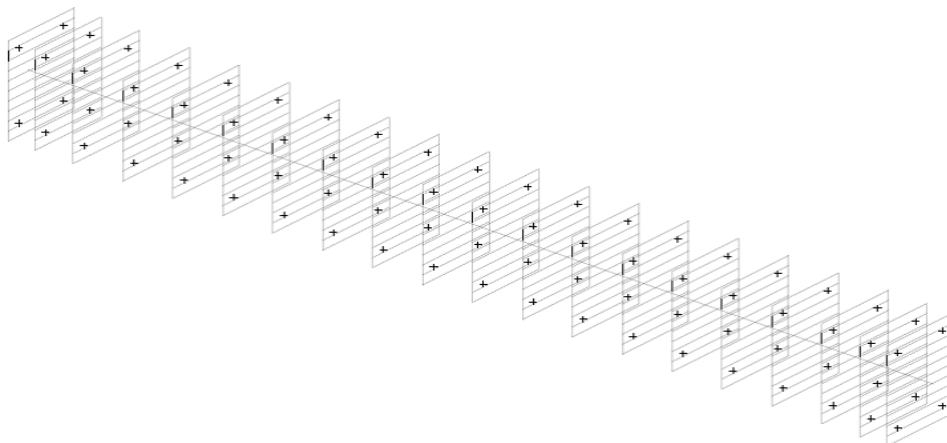


Figure 3.5 Le maillage des poutres multifibre sur CAST3M.

3.2.1 Les modèles utilisés pour la simulation

Afin de modéliser le comportement non linéaire du béton, on a choisit deux modèles d'endommagement, le modèle unilatéral de La Borderie [17] et le modèle béton_uni [23] qui tient en compte de l'effet de confinement.

3.2.1.1 Le modèle unilatéral (La Borderie) [17]

Cette loi est la version uni-axiale du modèle d'endommagement unilatéral de La Borderie [La Borderie, 1991] [17]. Ce modèle de béton est basé sur la théorie de l'endommagement. Il a la spécificité d'être unilatéral et de reproduire la reprise de raideur lors de la refermeture des fissures. Deux variables d'endommagement décrivent les comportements en traction et en compression. Le paramètre SIGF permet de contrôler le comportement lors de la refermeture de la fissure. Ce modèle a été détaillé dans le chapitre 1 (voir le paragraphe 1.3.6.3).

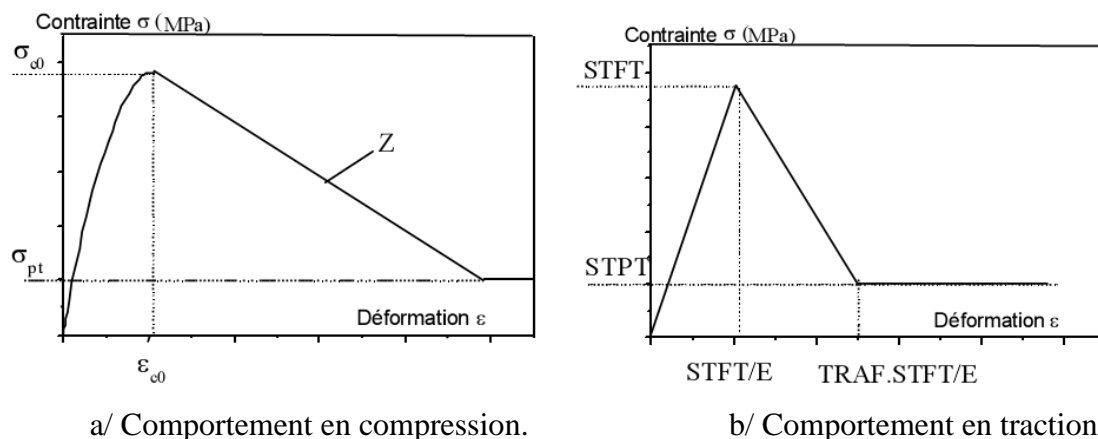
Les paramètres utilisés pour la loi Unilatérale sont :

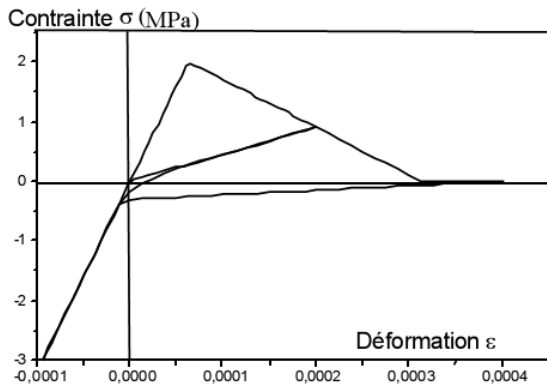
Paramètres de modèle	Valeur
Y_{01} (Seuil d'endommagement en traction)	$2.5 \times 10^{+2}$ (Pa)
Y_{02} (Seuil d'endommagement en compression)	$1.5 \times 10^{+4}$ (Pa)
A1 (Paramètre d'endommagement en traction)	4×10^{-3} (Pa)
A2 (Paramètre d'endommagement en compression)	6.5×10^{-5} (Pa)
B1 (Paramètre pour la traction)	1.2
B2 (Paramètre pour la compression)	1.5
BETA1 (Activation de la déformation permanente en traction)	$1 \times 10^{+6}$ (Pa)
BETA2 (Activation de la déformation permanente en compression)	$-40 \times 10^{+6}$ (Pa)
SIGF (Contrainte de refermeture de fissure)	$3.5 \times 10^{+6}$ (Pa)

Tableau 3.1 Tableau des paramètres du modèle Unilatéral utilisés dans la simulation [17].

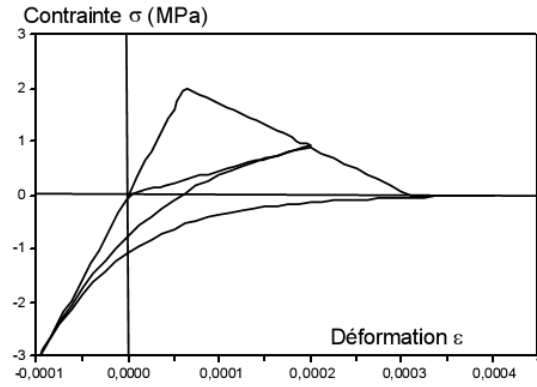
3. 1.1.2 Le modèle Béton-uni

La loi Béton_uni reprend le modèle d'Hognestad [Hognestad, 1951]. Elle permet de reproduire l'adoucissement après fissuration, le comportement unilatéral du béton (refermeture des fissures) ainsi que l'adoucissement après avoir atteint la résistance en compression. Le confinement est aussi pris en compte. Deux fonctionnements d'ouverture et refermeture de fissures sont possibles [Guedes, 1997] [23],





Fermeture raide.



Fermeture souple.

c/ Loi d'ouverture/refermeture de la fissure.

Figure 3.6 Loi de comportement BETON_UNI [23].

Sous chargement monotone, la loi est du type parabole puis linéaire avec adoucissement (Figure 3.6 (a)). Un plateau avec une contrainte résiduelle non nulle peut-être défini après l'adoucissement.

$$\text{Pour } 0 < \varepsilon < \varepsilon_{c0} \quad \frac{\sigma}{\sigma_{c0}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}} \cdot \left(2 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}} \right) \quad (3.1)$$

$$\text{Pour } \varepsilon_{c0} < \varepsilon \quad \frac{\sigma}{\sigma_{c0}} = 1 + Z \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{c0}) \quad (3.2)$$

Sur le plateau, $\sigma = \sigma_{pt}$

Avec :

σ_{c0} : Contrainte au pic (paramètre STFC).

ε_{c0} : Déformation au pic (paramètre EZER).

Z : Pente après le pic (paramètre ZETA).

σ_{pt} : Contrainte résiduelle (paramètre ST85).

Il faut noter que le logiciel ne vérifie pas si l'utilisateur a défini une loi en compression avec une rigidité initiale différente du module d'Young élastique E. Pour avoir un jeu de paramètres cohérent, il faut prendre $\varepsilon_{c0} = 2 \cdot \frac{\sigma_{c0}}{E}$

De plus, il est conseillé de prendre une contrainte résiduelle valant 20% de la contrainte maximale.

2 Prise en compte du confinement en compression [23]

La ductilité d'une section en béton armé et donc le comportement sismique de la structure dépend fortement du confinement du béton et le paramètre Z est directement fonction du confinement apporté par les cadres.

Si l'utilisateur donne une valeur négative pour Z, la valeur de Z est calculée à partir des coefficients α (paramètre ALF1) et w_w (paramètre OME1). De plus, dans ce cas, la contrainte et la déformation au pic données par l'utilisateur sont corrigées d'un facteur β :

$$\sigma'_{c0} = \beta \cdot \sigma_{c0} \quad (3.3)$$

$$\varepsilon'_{c0} = \beta^2 \cdot \varepsilon_{c0} \quad (3.4)$$

Avec :

$$\beta = \text{Min} (1 + 2.5\alpha\omega_w, 1.125 + 1.25\alpha\omega_w) \quad (3.5)$$

$$Z = \frac{\beta - 0.85}{\beta(0.1\alpha\omega_w + 0.0035 + \varepsilon'_{c0})} \quad (3.6)$$

Les coefficients α et ω_w sont déterminés à l'aide des formules suivantes :

$$\alpha = \left(1 - \frac{8}{3n}\right) \left(1 - \frac{s}{2b_c}\right) \left(1 - \frac{s}{2h_c}\right) \quad (3.7)$$

$$\omega_w = \frac{A_{cadre} \cdot f_{yt}}{b_c \cdot h_c \cdot f_{cu}} \sum \frac{l_w}{s} \quad (3.8)$$

n : nombre de barres de flexion.

B_c et h_c : dimension de la surface de béton confiné par les cadres. S : espacement des cadres.

A_{cadre} : section d'un cadre. L_w : longueur totale des cadres.

F_{cu} : contrainte ultime pour le béton. F_{yt} : contrainte de plastification des cadres.

- Si l'utilisateur donne une valeur positive pour Z , les coefficients α et ω_w sont ignorés et la valeur de Z donnée par l'utilisateur est utilisée. Cette valeur peut être déterminée à l'aide des formules précédentes ou de celles disponibles dans la littérature.

b. Dégradation de raideur en compression [23]

La non linéarité en compression s'accompagne d'une dégradation de raideur :

$$E_d = E \cdot \left(1 - \frac{(\varepsilon'_{max})^2}{1 + (\varepsilon'_{max}) + (\varepsilon'_{max})^2}\right) \quad (3.9)$$

Avec E : module élastique

$$\varepsilon'_{max} = \frac{\varepsilon_{cmax}}{\varepsilon_{c0}} \quad (3.10)$$

La déformation plastique vaut donc :

$$\varepsilon_{pla} = \varepsilon_{cmax} - \frac{\sigma_{cmax}}{E_d} \quad (3.11)$$

ε_{cmax} : est la déformation maximale déjà atteinte en compression

σ_{cmax} : est la contrainte associée.

c. Comportement en traction [23]

Le béton possède une résistance en traction mais est fragile après fissuration. La loi est linéaire par morceau en traction (Figure 3.6 (b)) :

- jusqu'au pic, le comportement est linéaire, la résistance en traction est notée STFT,

- l'adoucissement est linéaire la déformation ultime est proportionnelle à la déformation au pic, le facteur de proportionnalité étant noté TRAF,

- un plateau résiduel a été introduit, la résistance résiduelle est notée STPT.

d. Loïs de refermeture de la fissure [23]

Deux lois de refermeture/ouverture de la fissure sont possibles (Figure 3.6 ©) :

Refermeture raide

Cette loi de fermeture/ouverture de la fissure est bilinéaire :

- avant refermeture, la décharge a lieu avec un module fissuré,
- après refermeture, le béton retrouve sa rigidité initiale.

Cette loi de refermeture très raide a tendance à surestimer le pincement des courbes force-déplacement et moment-courbure, le pincement étant lié à la refermeture des fissures de flexion [Combesure 1998 et 1999a] [23].

Refermeture souple

La loi contrainte déformation n'est plus bilinéaire mais hyperbolique et passe par les points (ϵ_t, σ_t) et (ϵ_c, σ_c) avec une pente σ_t' et σ_c' respectivement.

La figure (3.6 ©) présente la relation σ - ϵ pour deux jeux de paramètres :

Jeu de paramètre « souple » : $F_1=FAMX=1$, $F_2=FACL=1$,

$$F_1'=FAM1=10 \text{ et } F_2'=FAM2=10$$

Jeu de paramètre « moins souple » : $F_1=FAMX=10$, $F_2=FACL=1$,

$$F_1'=FAM1=1 \text{ et } F_2'=FAM2=10.$$

Si le paramètre FAMX est pris négatif, la première loi de refermeture/ouverture est adoptée et les autres paramètres n'ont pas de signification. Dans le cas contraire, les 4 paramètres supplémentaires permettent de moduler la reprise de raideur lors de la refermeture de la fissure.

Les paramètres de modèle utilisés pour le calcul sont regroupés dans le tableau suivant :

Paramètres de modèle	Poutre1 Valeur	Poutre8 Valeur
STFC (Contrainte de compression au pic)	$24 \times 10^{+6}$ (Pa)	$24 \times 10^{+6}$ (Pa)
EZER (déformation de compression au pic)	0.0025	0.0012
STFT (Contrainte de traction au pic)	$3. \times 10^{+6}$ (Pa)	$3. \times 10^{+6}$ (Pa)
ALF1 (Paramètre de confinement)	0.1042	0.1042
OME1 (Paramètre de confinement)	0.1722	0.6887
ZETA (Pente de la partie descendante de la courbe de compression)	21.43	22.622
ST85 (Plateau de la courbe de compression)	$4.8 \times 10^{+6}$ (Pa)	$4.8 \times 10^{+6}$ (Pa)
TRAF (Facteur définissant l'adoucissement de traction)	5.	5.
STPT (Contrainte résiduelle en traction)	0	0
FAMX (Facteur définissant le point de refermeture)	1	1
FACL (Facteur définissant le point d'ouverture complète)	1	1
FAM1 (Facteur définissant la pente associé à F1)	10	10
FAM2 (Facteur définissant la pente associé à F2)	10	10

Tableau 3.2 Tableau des paramètres du modèle Béton_Uni utilisés dans la simulation [23].

3.2.2 Loi de comportement de l'acier

Deux lois de comportement sont utilisées pour modéliser le comportement de l'acier.

3.2.2.1 Modèle élasto-plastique [23]

Les aciers peuvent être modélisés avec une loi élasto-plastique avec écrouissage cinématique. Les deux paramètres de cette loi sont :

- la contrainte de plastification (paramètre SIGY),
- le module d'écrouissage (paramètre H) qui vaut 0 pour un matériau parfaitement plastique.

Remarque : le module d'écrouissage est lié à la pente après plastification E_p avec la relation suivante : $E_p = \frac{E.H}{(E+H)}$

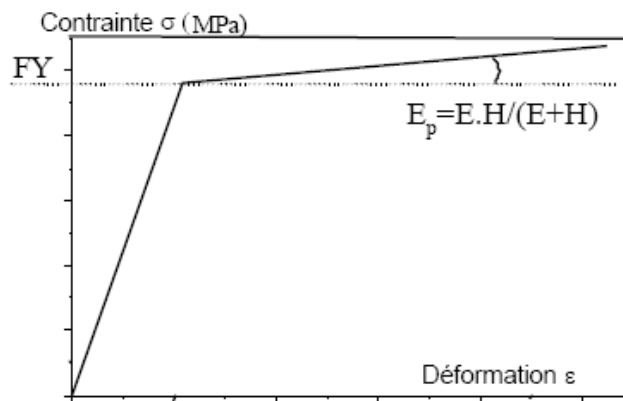


Figure 3.7 Loi de comportement de l'acier élasto-plastique.

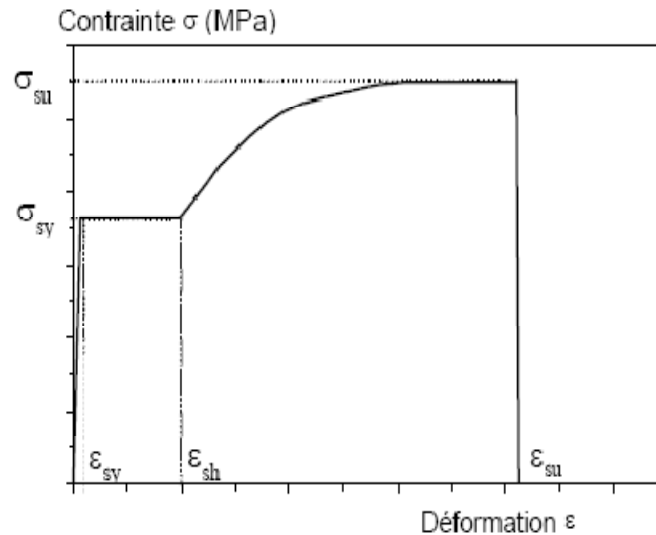
Les paramètres utilisés pour la loi élasto-plastique sont :

Paramètres de modèle	Valeur
E (Module de young)	20×10^{10} (Pa)
σ_y (Limite d'élasticité)	610×10^6 (Pa)
H (Module d'écrouissage linéaire)	1000×10^6 (Pa)

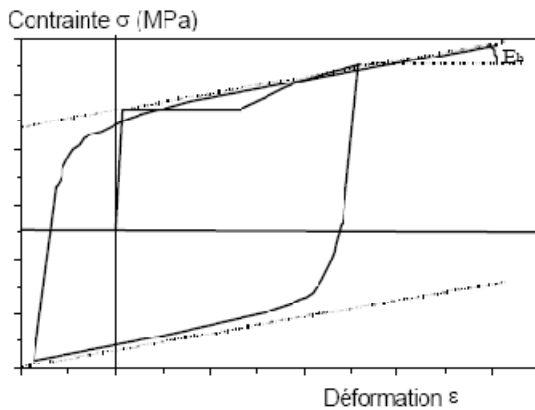
Tableau 3.3 Tableau des paramètres du modèle élasto-plastique utilisés dans la simulation [23].

3.2.2.2. Modèle Pinto – Menegotto [23]

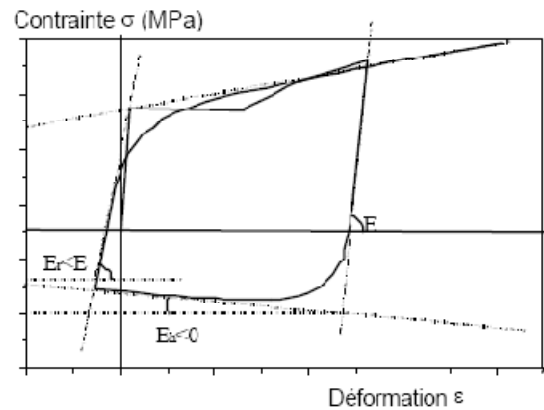
Cette loi reprend le modèle de Menegotto-Pinto [Menegotto, 1973].



a/ Comportement sous chargement monotone.



b/ Comportement sous chargement cyclique.



c/ Prise en compte du flambement.

Figure 3.8 Loi de comportement ACIER_UNI

Sous chargement monotone, la loi possède un plateau plastique ($\sigma = \sigma_{sy}$) suivi d'un écrouissage jusqu'au point $(\epsilon_{su}, \sigma_{su})$ (Figure 3.8-a) :

$$\sigma = \sigma_{su} - (\sigma_{su} - \sigma_{sy}) \cdot \left(\frac{\epsilon_{su} - \epsilon}{\epsilon_{su} - \epsilon_{sh}} \right)^4 \quad (3.12)$$

Sous chargement cyclique, l'écrouissage est cinématique et l'effet Bauschinger est reproduit (Figure 3.7-b-). La pente de l'écrouissage peut être estimée à l'aide de la relation :

$E_h = \frac{(\sigma_{su} - \sigma_{sy})}{\epsilon_{su} - \epsilon_{sy}}$. Les deux droites asymptotes de la courbe $(\sigma - \epsilon)$ sous chargement cyclique passent par les points de début de plastification $(+/-\epsilon_{sy}, +/-\sigma_{sy})$. La loi inclut un modèle de flambement (Figure 3.8-c-). Ce phénomène doit être pris en compte si le rapport entre la distance entre deux cadres L et le diamètre des aciers de flexion D est supérieur à 5. L'asymptote de la courbe (σ, ϵ) sous chargement cyclique devient alors négative (adoucissement) : sa pente est proportionnelle à : $E_h = a \cdot \left(5 - \frac{L}{D} \right) \cdot E$

De plus, le module de décharge élastique E_r est alors inférieur au module élastique E : $E_r = a_5 \cdot E$ avec $a_5 = 1.0 + \frac{5 - \frac{L}{D}}{7.5}$.

Le modèle de flambement est valable pour des rapports L/D compris entre 5 et 11.

Le modèle est détaillé dans [Guedes, 1997].

L'acier est caractérisé par :

- sa raideur élastique E ,
- sa contrainte de plastification σ_{sy} (paramètre STSY).
- sa contrainte ultime σ_{su} (paramètre STSU),
- sa déformation de début d'écrouissage ϵ_{sh} (paramètre EPSH),
- sa déformation ultime ϵ_{su} (paramètre EPSU),
- le ratio entre le module d'écrouissage et le module élastique pour des chargements cycliques (paramètre BFAC),
- les paramètres ROFA, A1FA et A2FA gouvernant l'effet Bauschinger (un jeu de paramètre standard est donné dans [1] : ROFA=20, A1FA=18.5 et A2FA=0.15),
- le rapport entre la distance entre 2 cadres L et le diamètre des aciers de flexion D (paramètre FALD),
- les paramètres AFAC, CFAC, A6FAC et FALD permettant de traiter les problèmes de flambement des aciers (le jeu de paramètres standard étant AFAC=0.006, CFAC=0.500 et A6FA=620 pour un acier à 450Mpa et une valeur de FALD comprise entre 5 et 11).

Les paramètres utilisés pour la loi Pinto – Menegotto sont :

Paramètres de modèle	Valeur
E (Module de young)	20×10^{10} (Pa)
STSY (Contrainte d'élasticité)	600×10^6 (Pa)
EPSH (Déformation au début d'écrouissage)	0.030
EPSU (Déformation ultime)	0.17
STSU (Contrainte ultime)	680×10^6 (Pa)
ROFA	20
A1FA	18.5
A2FA	0.15
AFAC	0.006
CFAC	0.5
A6FAC	650
FALD	3.125

Tableau 3.4 Tableau des paramètres du modèle Pinto – Menegotto utilisés dans la simulation.

[23]

3. 2.3 Histoire de chargement

Le chargement appliqué est un déplacement imposé au centre de la poutre en fonction du temps, il est sous la forme suivante :

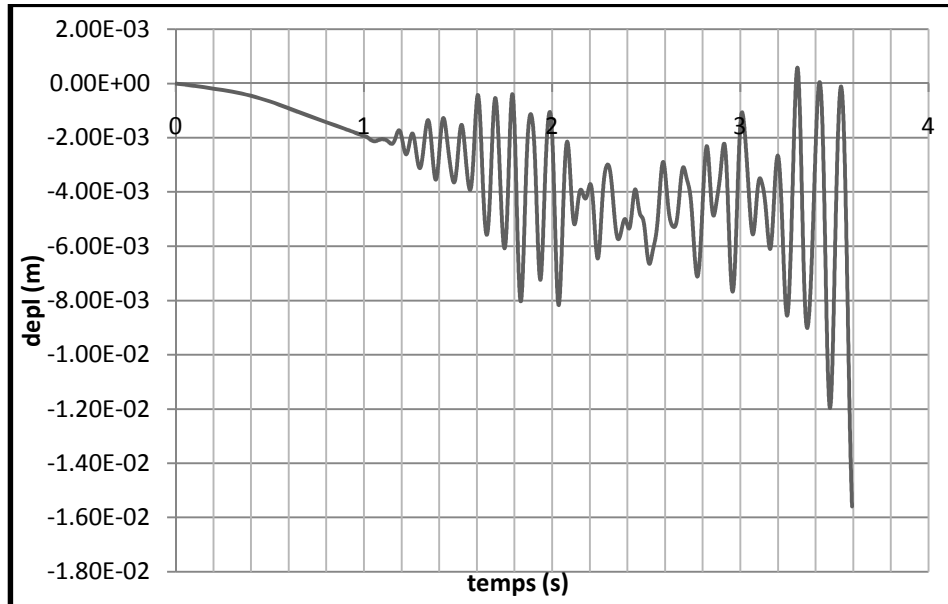


Figure 3.9 Le chargement appliqué sur la poutre1

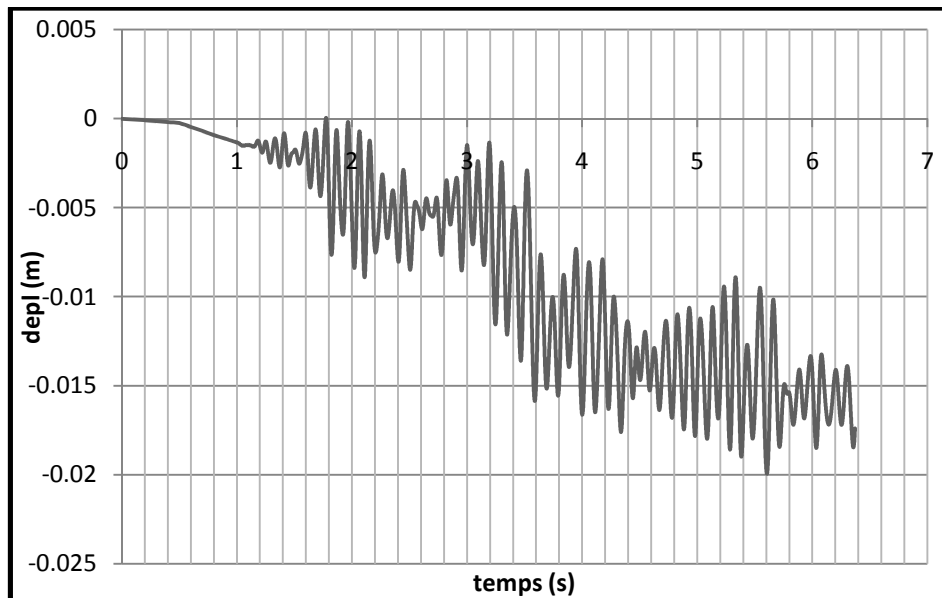


Figure 3.10 Le chargement appliqué sur la poutre 8

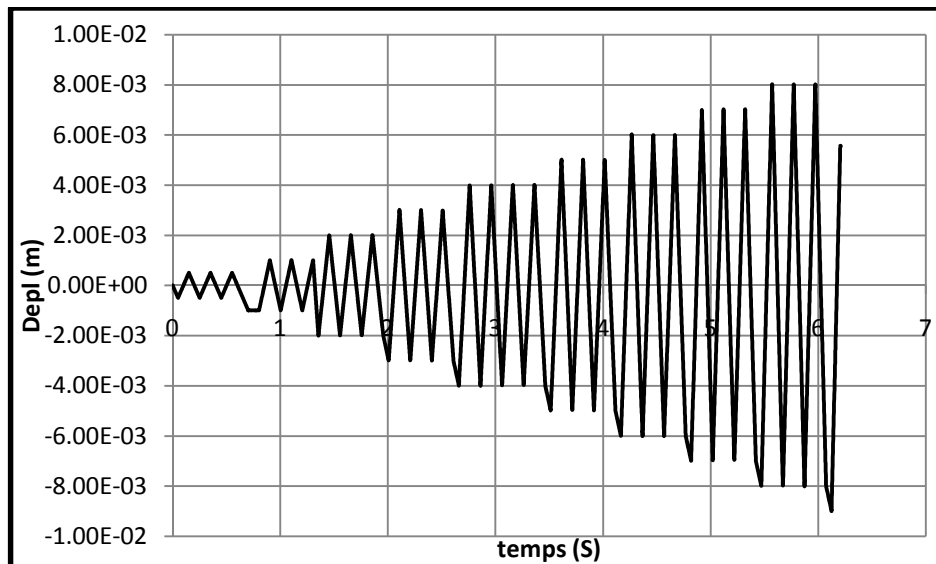


Figure 3.11 Le chargement appliqué sur la poutre LMT

3.2.4. Caractéristiques mécaniques des aciers et du béton

Acier :

	Ferrailage longitudinal	Ferrailage transversal
Poutre 1	4HA 12	Φ6/ 30cm
Poutre 8	2 HA 10 (haut) + 2HA 12 (bas)	Φ6/ 15 cm
Poutre LMT	4HA 12	Φ6/ 15cm

Béton :

- Module d'élasticité poutre 1: $E=19500\text{Mpa}$.
- Module d'élasticité poutre 8: $E=40000\text{Mpa}$.
- Coefficient de Poisson $\nu=0.2$.
- Résistance à la compression $f_c=24\text{MPa}$.
- Résistance à la traction $f_t=3\text{MPa}$.

3.3 Traitement des résultats

Pour la simulation des poutres 1 et 8 du projet CEOS.fr, on a utilisé deux lois de comportement Unilatéral (La Borderie 1991) et Béton_uni pour le béton, une loi élasto-plastique pour l'acier.

On a choisit deux niveaux de discrétisation $n=12$ et $n=20$ (n : nombre de section en fibre sur la poutre).

3.3.1 Poutre1

3.3.1.1 Modèle unilatéral pour le béton et élasto-plastique pour l'acier

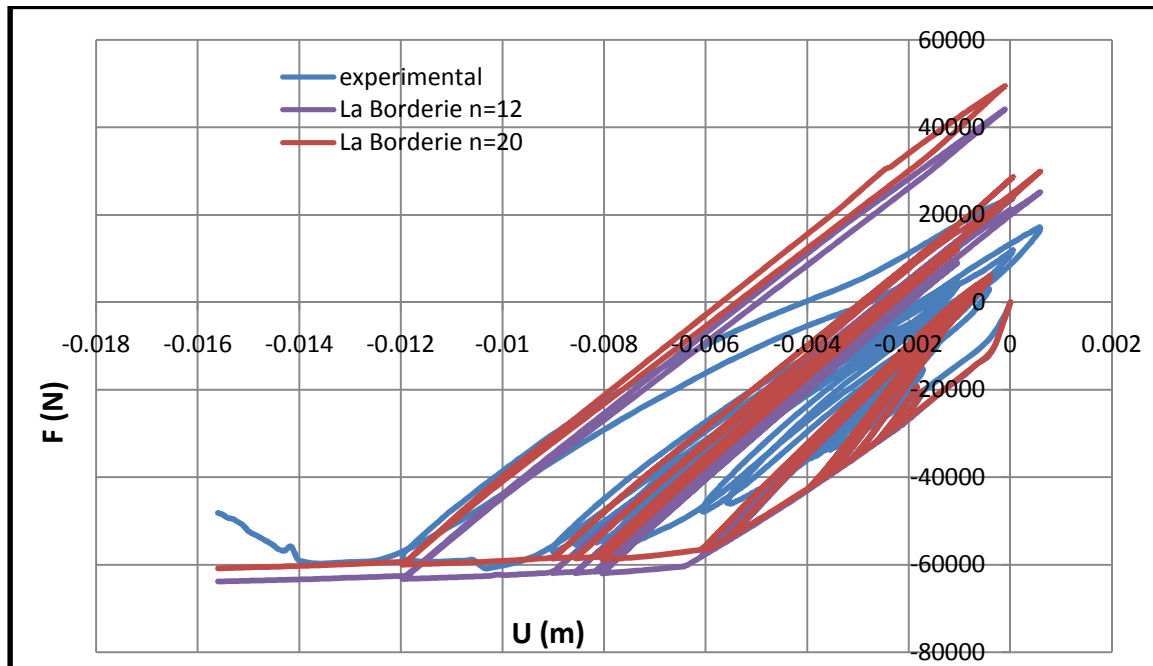


Figure 3.12 Comparaison de la réponse globale expérimentale avec les différentes simulations.

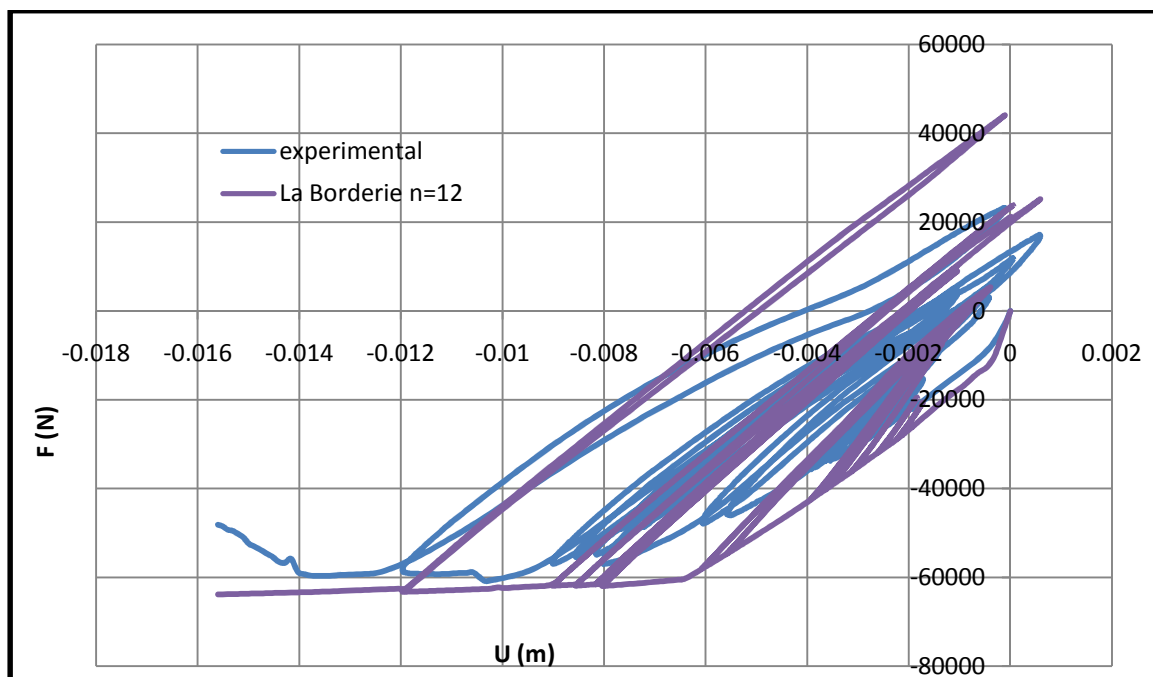


Figure 3.13 Comparaison de la réponse globale expérimentale avec la simulation (pour n=12)

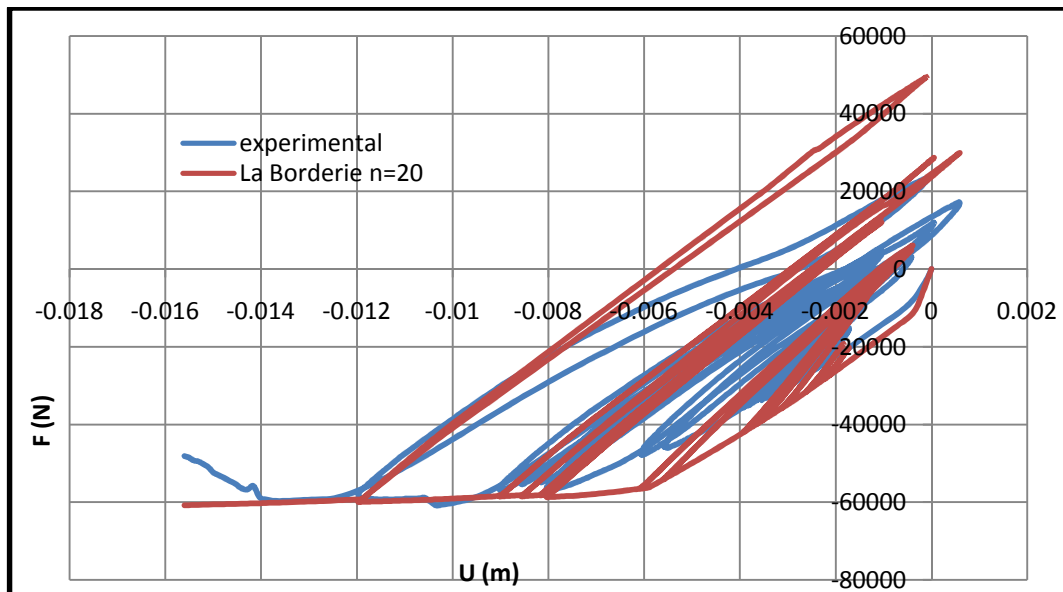


Figure 3.14 Comparaison de la réponse globale expérimentale avec la simulation (pour $n=20$)

Les deux simulations avec différentes sections produisent une réponse globale quasi-identique. En expérimental le changement de signe reproduit un assouplissement suivi d'un raidissement qui engendre une courbe en S, dans la simulation on remarque que l'absence de la zone correspondant à l'assouplissement reproduit des efforts positifs plus importants que dans la réalité.

Pour la simulation de la poutre 1 ; l'enveloppe de la courbe montre que la participation du béton est surestimée ainsi on remarque que les aciers supérieurs se plastifient sur les derniers cycles. Pour un nombre de section $n=20$, les résultats sont proches de l'expérimentation.

3. 3.1.2 Modèle Béton_UNI pour le béton et élasto-plastique pour l'acier

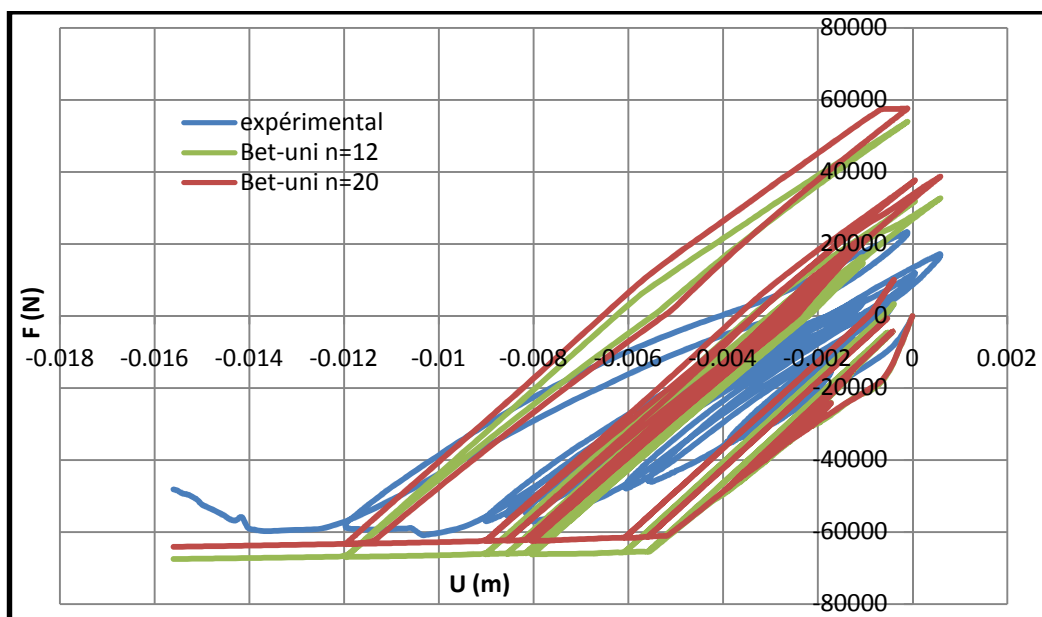


Figure 3.15 Comparaison de la réponse globale expérimentale avec les différentes simulations.

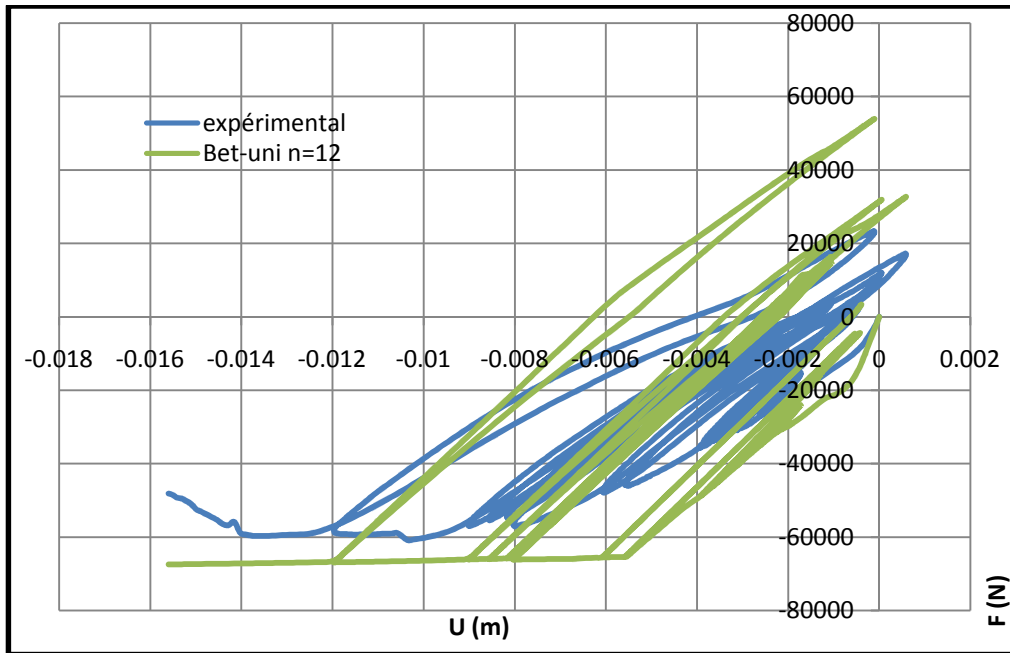


Figure 3.16 Comparaison de la réponse globale expérimentale avec la simulation (pour $n=12$).

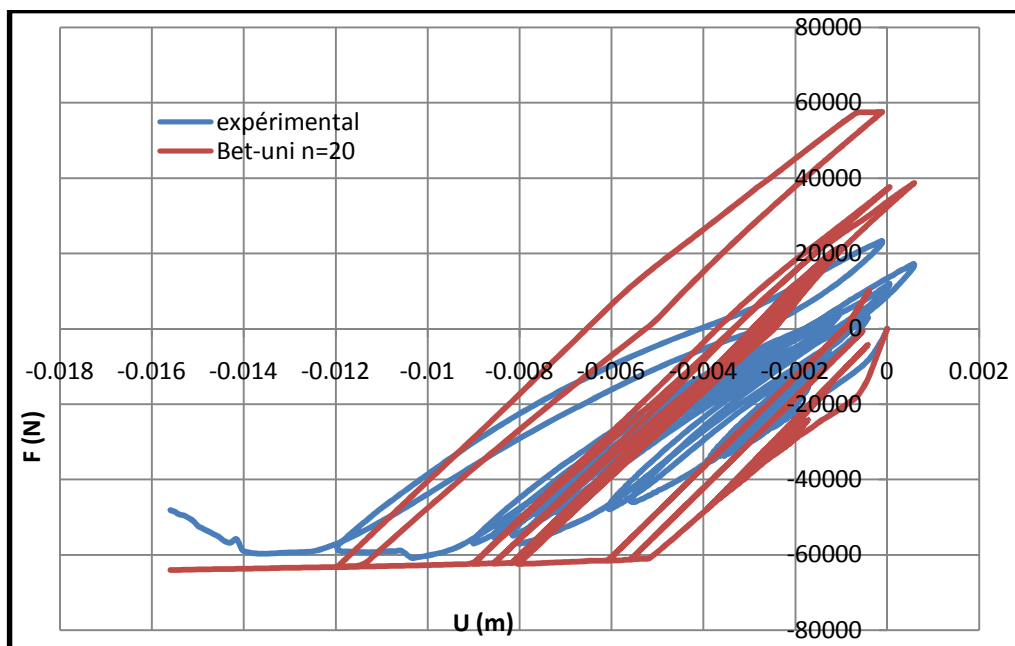


Figure 3.17 Comparaison de la réponse globale expérimentale avec la simulation (pour $n=20$)

La simulation de la poutre 1 par le modèle béton_uni reproduit un effort supérieur à celui de l'expérimental et les décharges sont linéaires ce qui conduit à la plastification des armatures supérieures lors du dernier cycle.

N.B

On remarque que si on augmente le nombre de section en fibre ($n=20$), le comportement de béton est mieux estimé sauf que le travail du béton est surestimé.

3.3.2 Poutre 8

3.3.2.1 Modèle unilatéral pour le béton et élasto-plastique pour l'acier

Les remarques effectuées sur la poutre 1 sont également valables pour la poutre 8. L'effort ultime est surestimé si la poutre contient 12 sections en fibre, pour $n=20$, l'effort est correctement estimé.

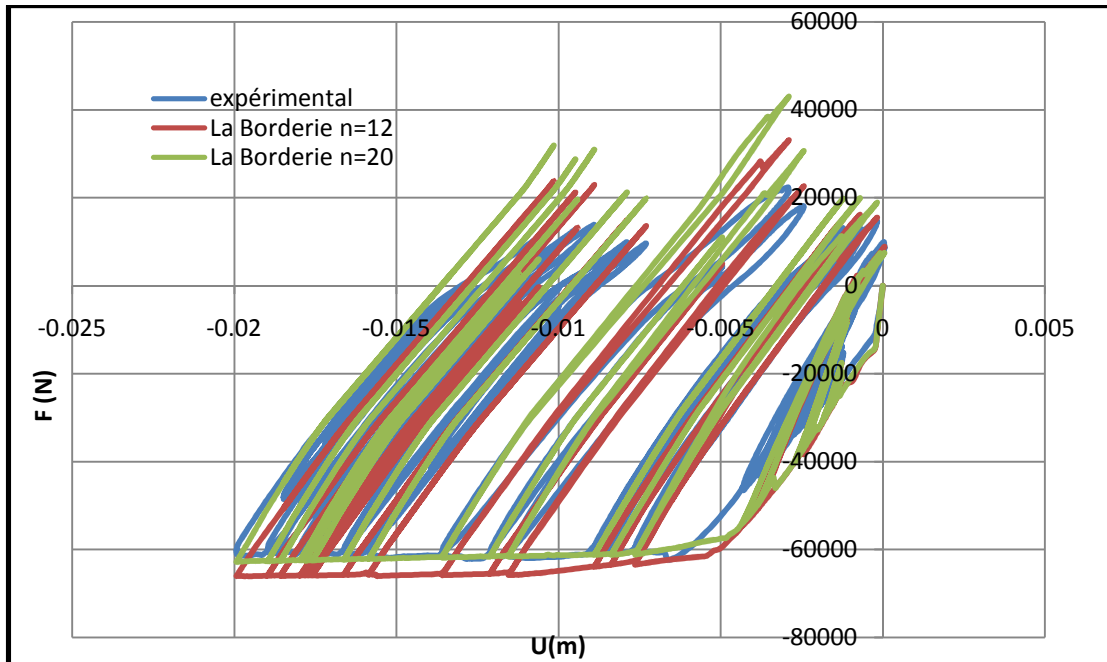


Figure 3.18 Comparaison de la réponse globale expérimentale avec les différentes simulations.

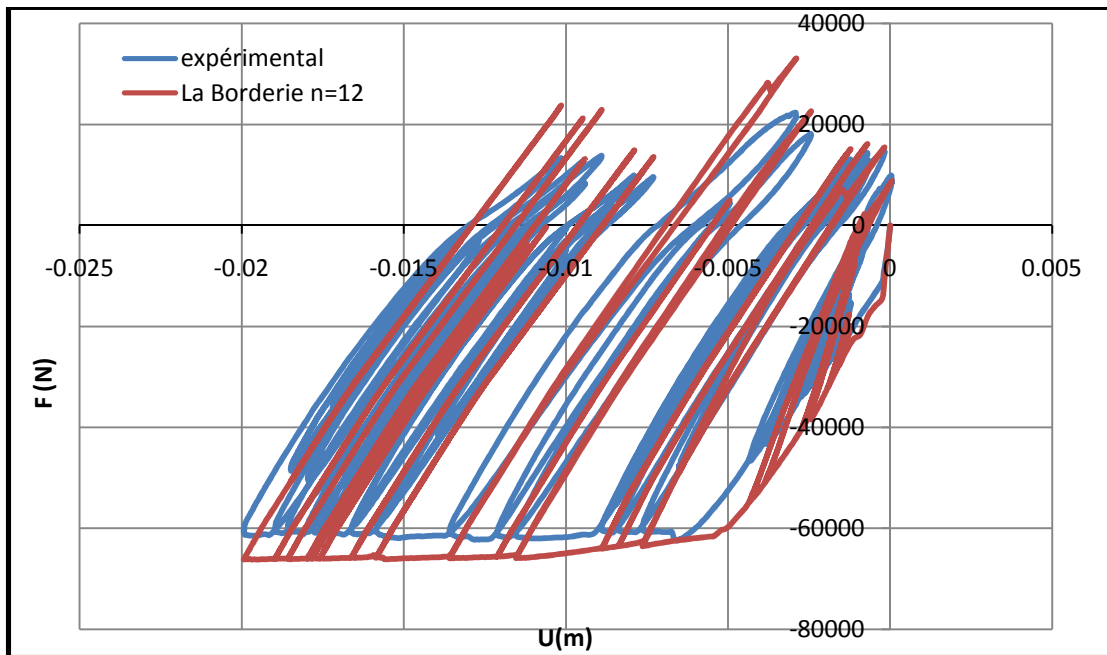


Figure 3.19 Comparaison de la réponse globale expérimentale avec la simulation (pour $n=12$)

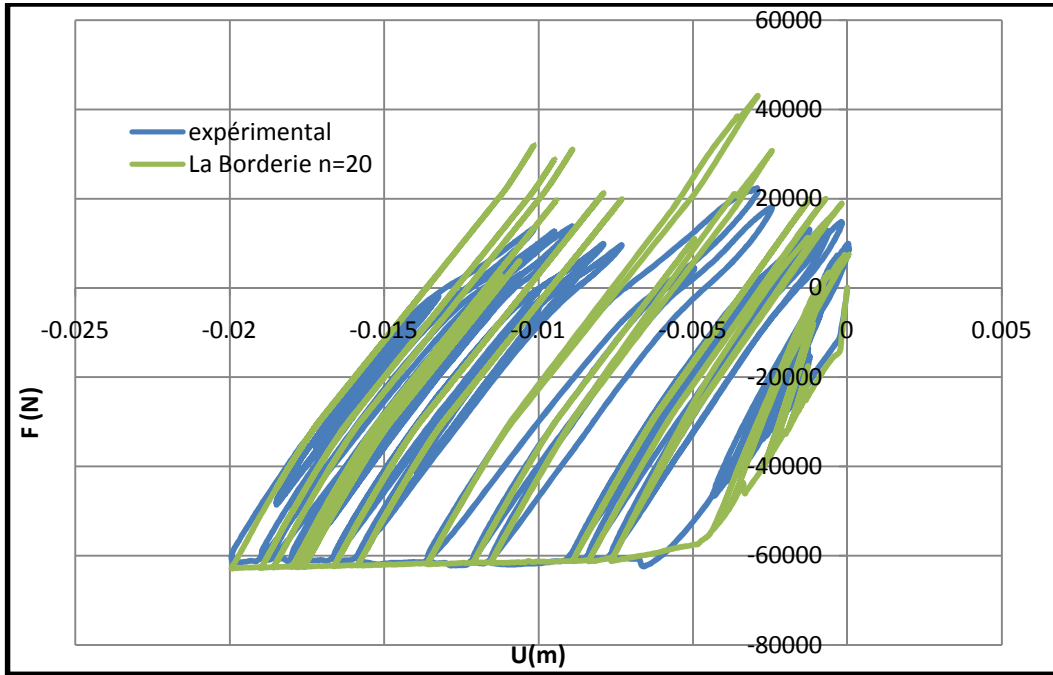


Figure 3.20 Comparaison de la réponse globale expérimentale avec la simulation (pour $n=20$)

3.3.2.2 Modèle Béton_Uni pour le béton et élasto-plastique pour l'acier

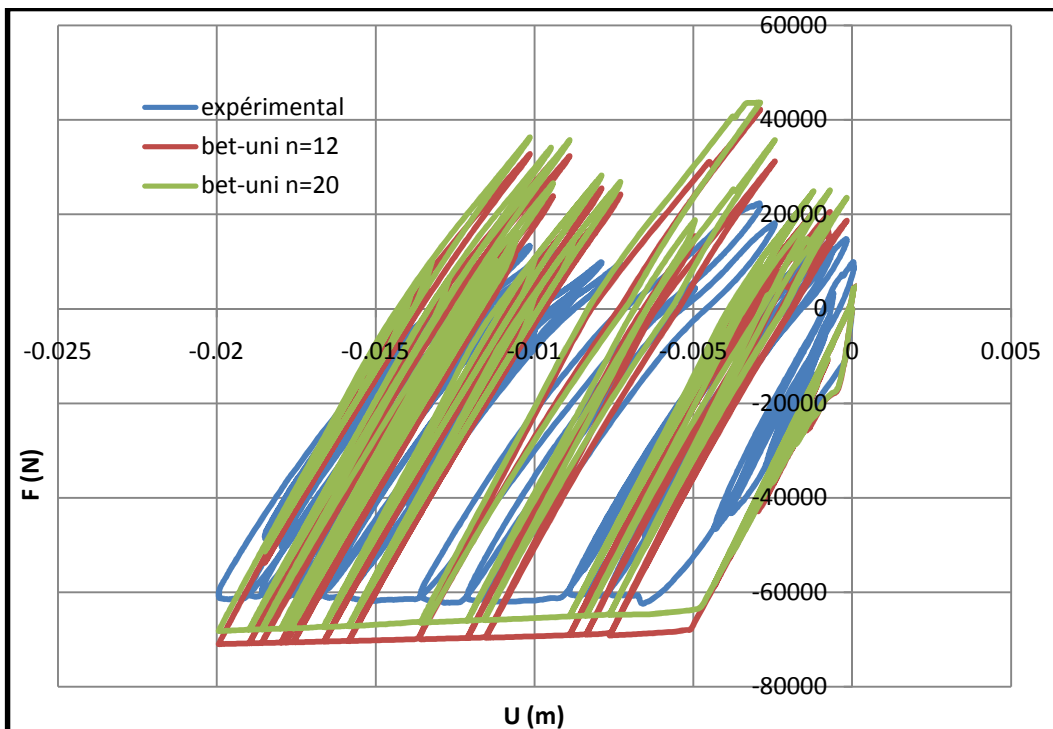


Figure 3.21 Comparaison de la réponse globale expérimentale avec les différentes simulations.

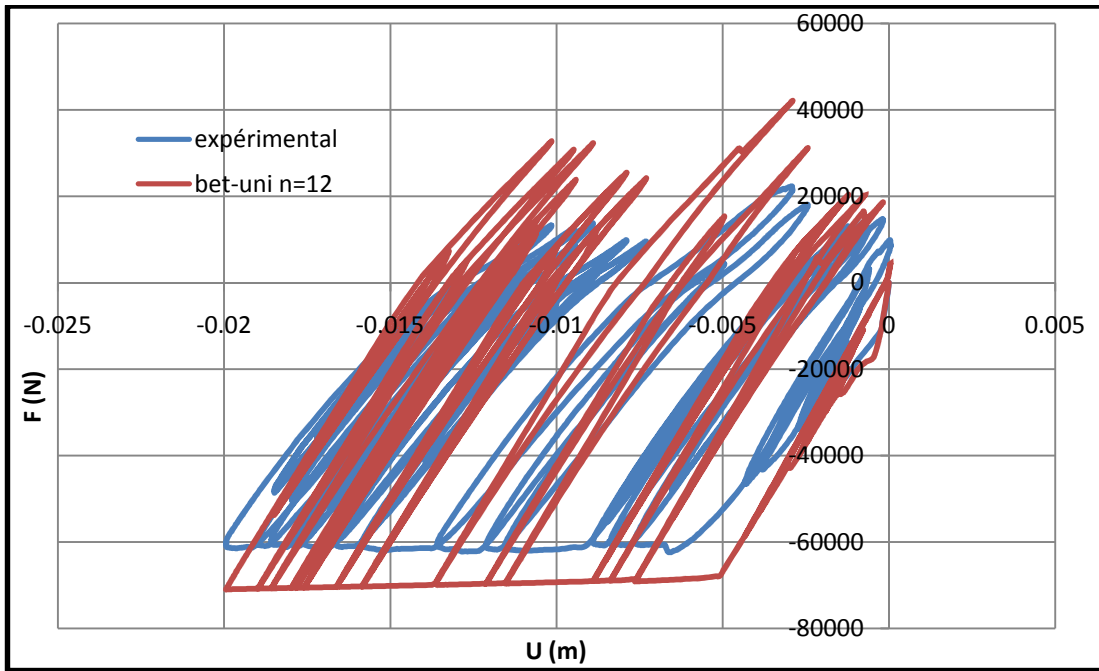


Figure 3.22 Comparaison de la réponse globale expérimentale avec la simulation (pour $n=12$)

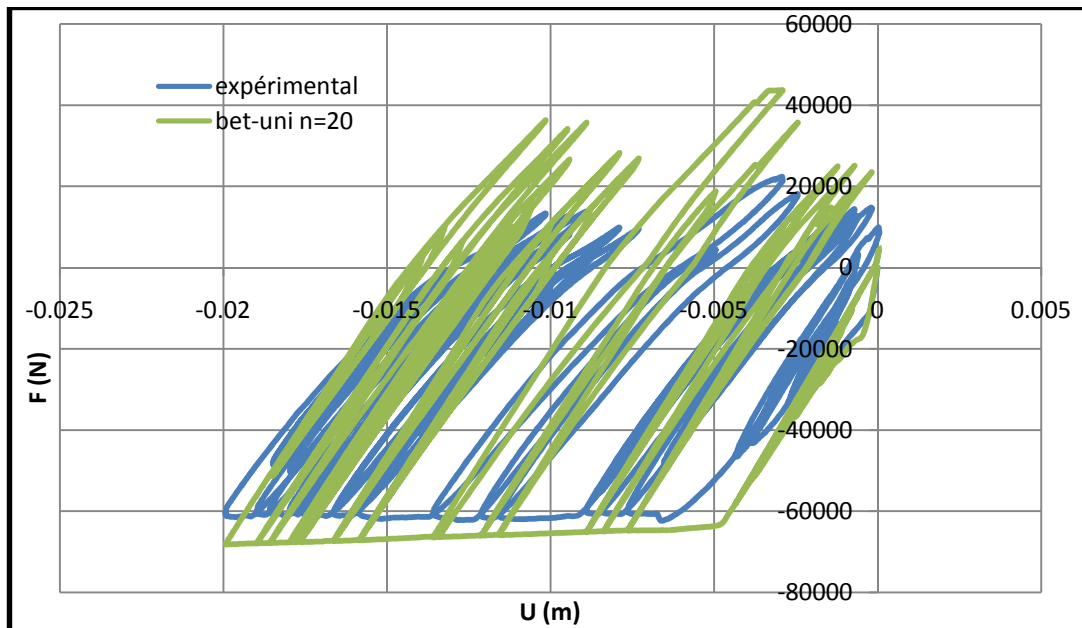


Figure 3.23 Comparaison de la réponse globale expérimentale avec la simulation (pour $n=20$).

On remarque aussi que la partie élastique est correctement reproduite. Néanmoins l'effort ultime est surestimé pour les deux niveaux de discrétisation, les décharges sont linéaires ce qui conduit à la plastification des armatures supérieures. La simulation pour $n=20$ donne des résultats meilleurs.

Afin de compléter les différents essais réalisés dans le cadre du Projet National CEOS.fr, d'autres essais complémentaires dans le cadre cyclique ont semblé obligatoire. Ainsi, la poutre LMT a été proposée en utilisant des corrélations numériques permettant d'apprécier les déformations subies par les corps d'épreuve au cours de l'application du chargement pour déterminer les fissures sur la poutre.

3.4 Poutre LMT

A partir des premiers résultats des poutres 1 et 8, on remarque que le modèle Unilatéral (La Borderie) reproduit mieux les réponses globales donc on a choisit pour la simulation de la poutre LMT, les paramètres du modèle qu'on a utilisés sont ceux proposés pour la poutre 1 et 8. Le ferrailage utilisé est de 2T12 dans la partie supérieure et inférieure avec un espacement de 15 cm. Le comportement des aciers est modélisé par la loi élasto-plastique et la loi Pinto-Menegotto.

Béton : de caractéristique ordinaire, des essais sur cylindre 16*32 ont donné des caractéristiques moyennes de $E = 28\ 000\ \text{MPa}$ pour le module d'Young pour une valeur moyenne de 35 MPa de résistance en compression.

Concernant les aciers, des essais en traction simple ont été effectués sur des échantillons de ces derniers permettant de mesure le module d'Young $E = 205\ 000\ \text{MPa}$ et une limite en traction de 600 MPa.

Le chargement appliqué sur la poutre est un déplacement imposé. Pour chaque niveau de chargement, trois trains de cycles sont imposés permettant de stabiliser la fissuration voir figure (3.11).

3.4.1 Traitement des résultats

La réponse globale est décomposée de neuf (09) cycles afin de faciliter la comparaison entre les différents cycles.

3.4.1.1 La réponse globale par le modèle unilatéral pour le béton et élasto-plastique pour l'acier

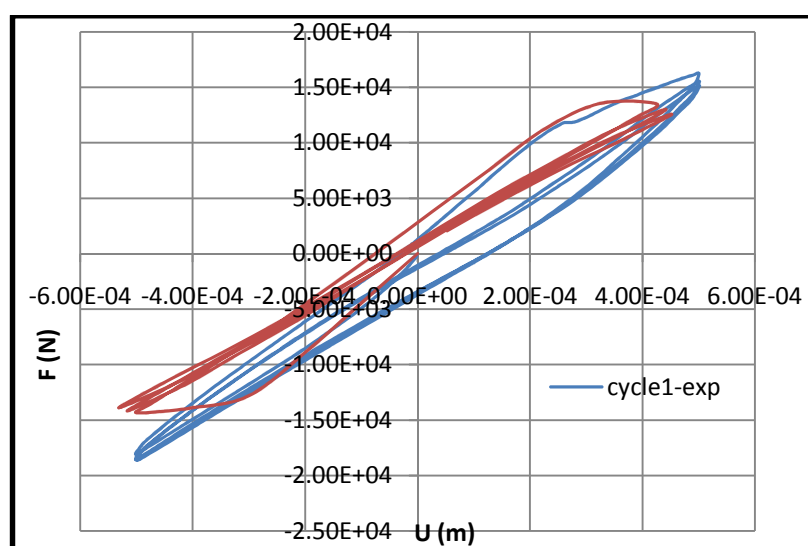


Figure 3.24 Cycle1

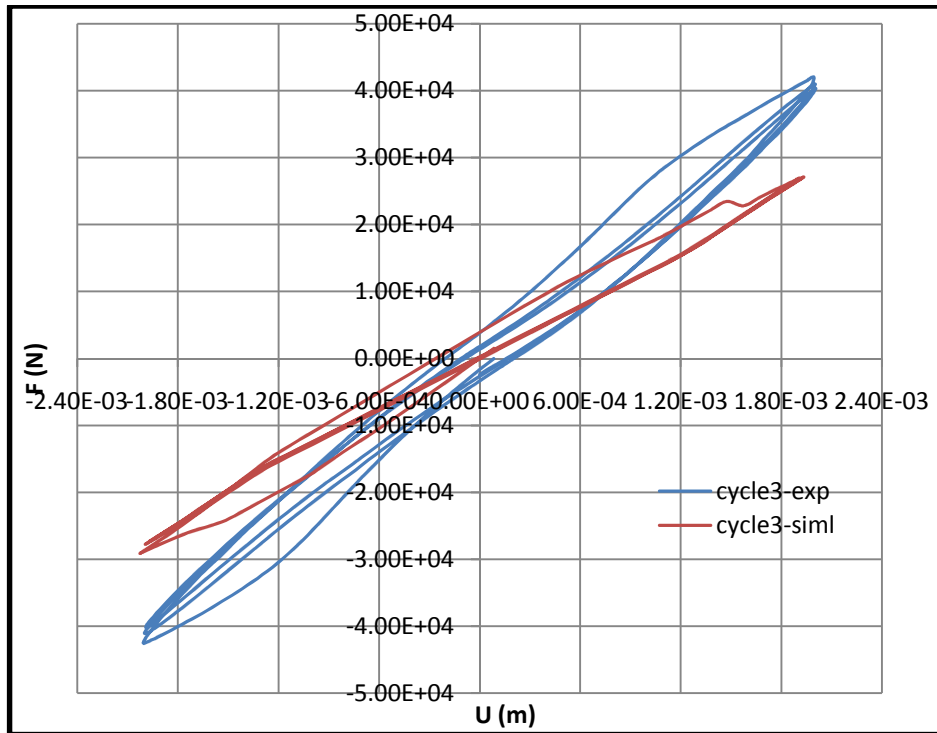


Figure3.25 Cycle3

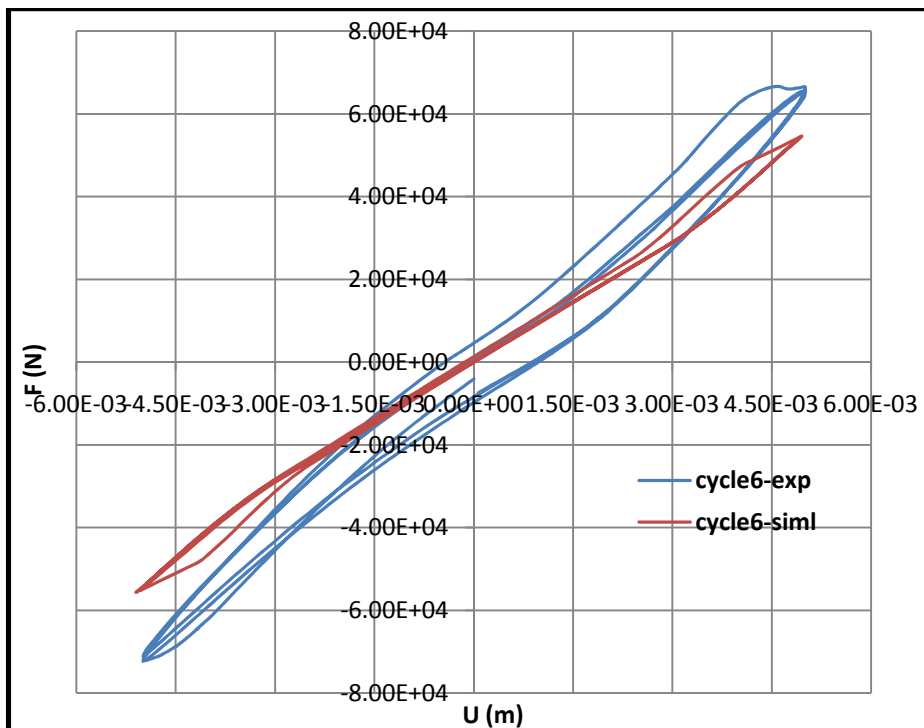


Figure3.26 Cycle 6.

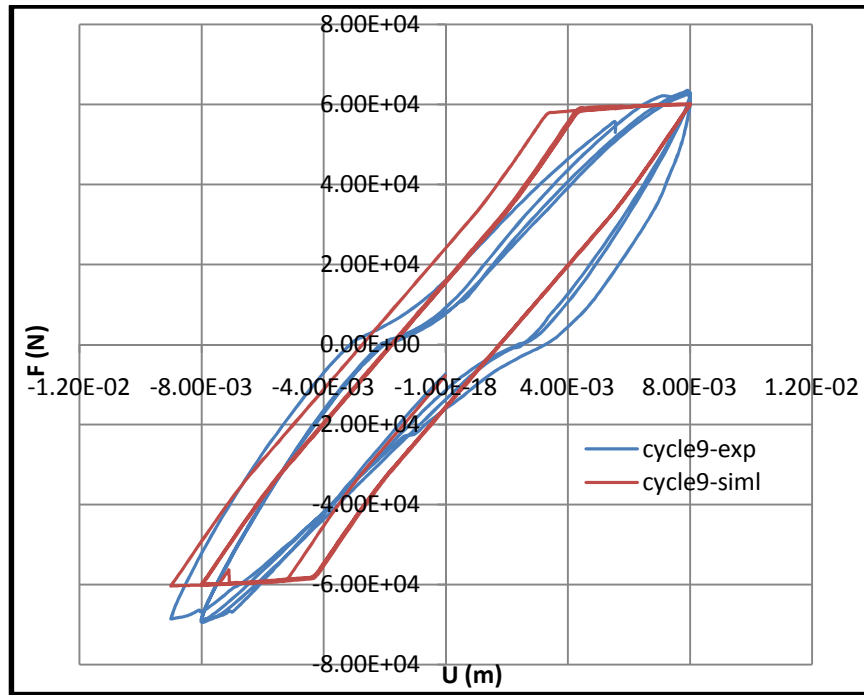


Figure 3.27 Cycle 9.

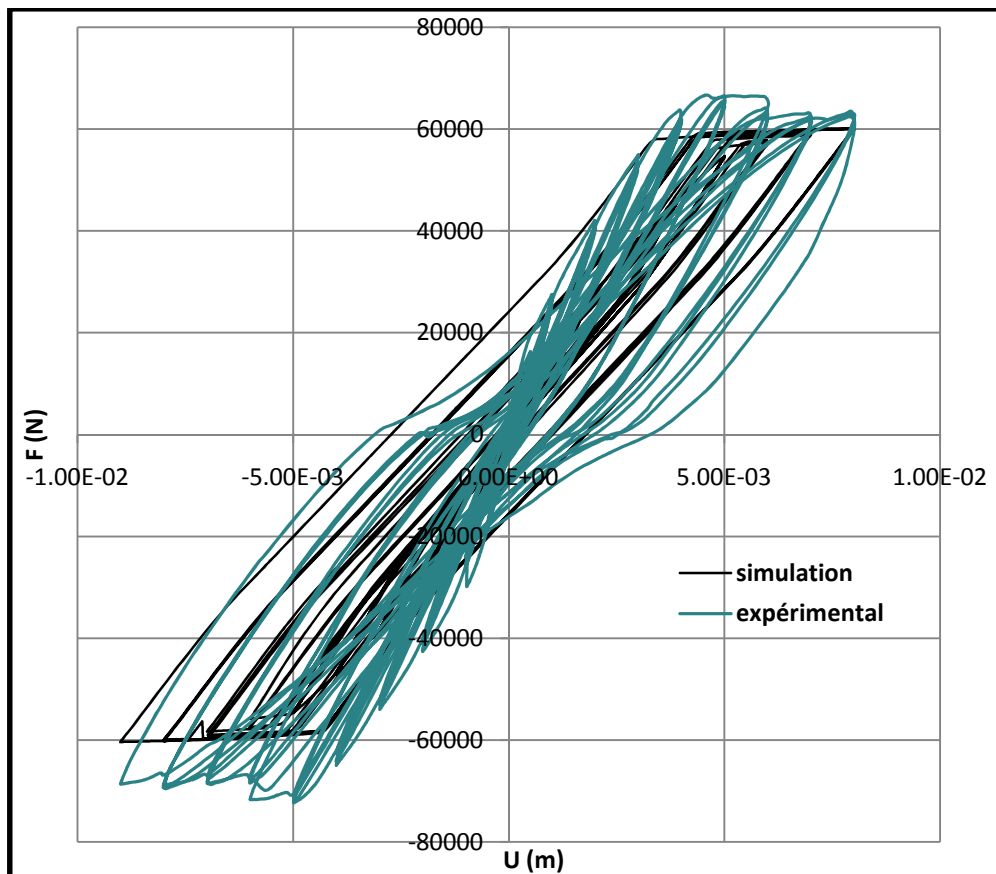


Figure 3.28 Comparaison entre la réponse expérimentale globale de la poutre et la réponse numérique (Modèle d'acier élasto-plastique).

Les résultats détaillés sont présentés dans un diagramme Force-Flèche des différents cycles réalisés. Les cycles ont été imposés à différents niveaux : +/- 0,5 mm, +/- 1mm, +/- 2 mm, +/- 3 mm, +/- 4 mm, +/- 5 mm, +/- 6 mm, +/- 7 mm et +/- 8 mm (figure 3.24-3.27)

La superposition des résultats expérimentaux et calculés montre que les efforts ultimes ont été bien estimés mais les résultats numériques montrent aussi que les cycles 3 et 6 dissipent légèrement, une fois il y a une plastification des aciers on remarque qu'il y a une dissipation d'énergie (voir cycle 9).

On peut noter que la diminution de la raideur globale augmente avec l'amplitude des cycles, signe d'une macro-fissuration ainsi que l'augmentation de l'énergie dissipée au sein de chacun des cycles simultanément à l'accroissement de la fissuration.

3.4.1.2 La réponse globale par le modèle unilatéral pour le béton et le modèle Pinto – Menegotto pour l'acier

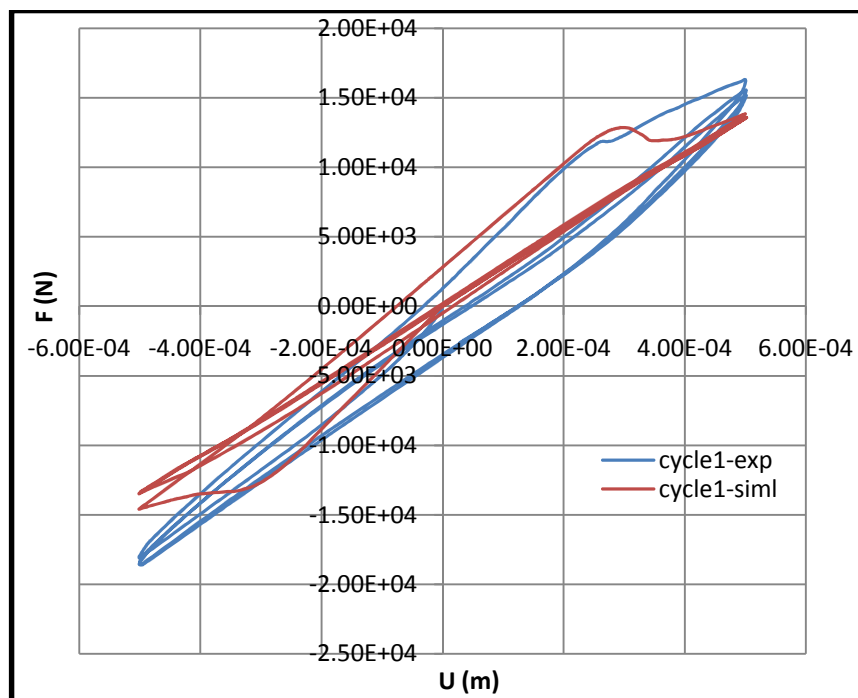


Figure 3.29 Cycle1

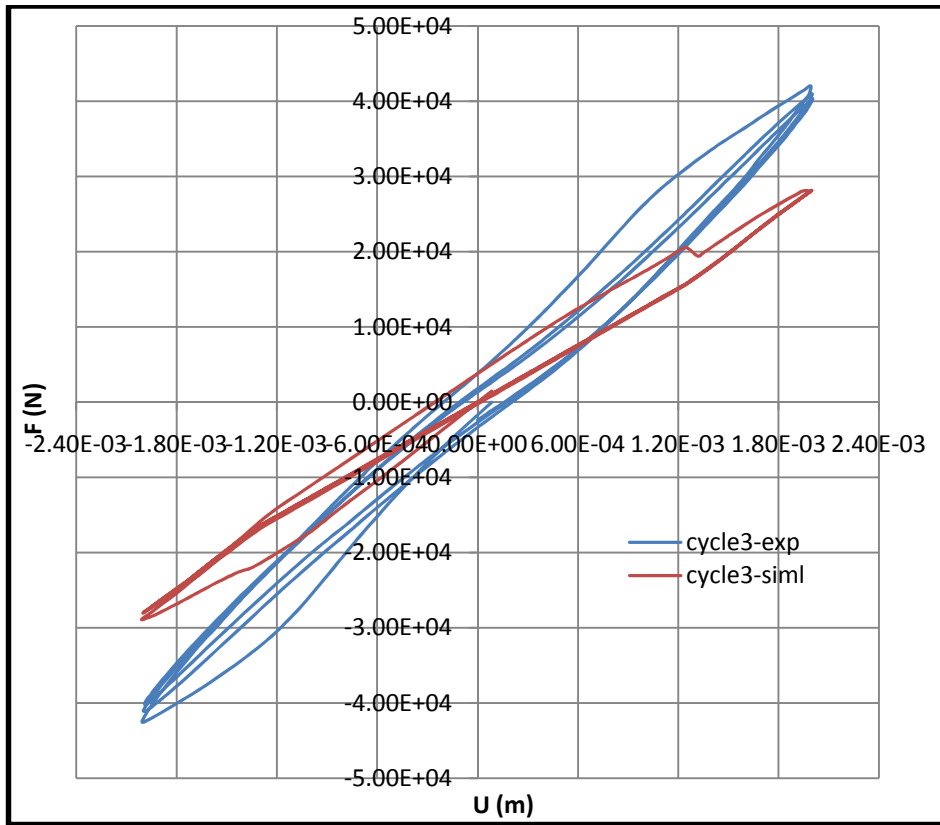


Figure 3.30 Cycle3

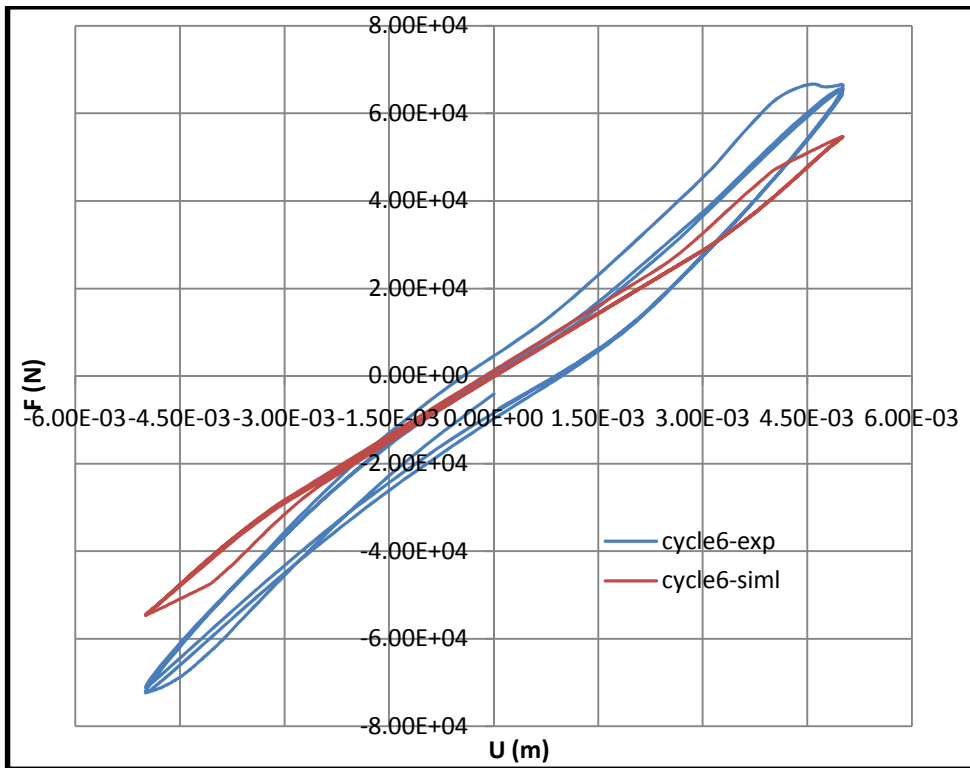


Figure 3.31 Cycle6

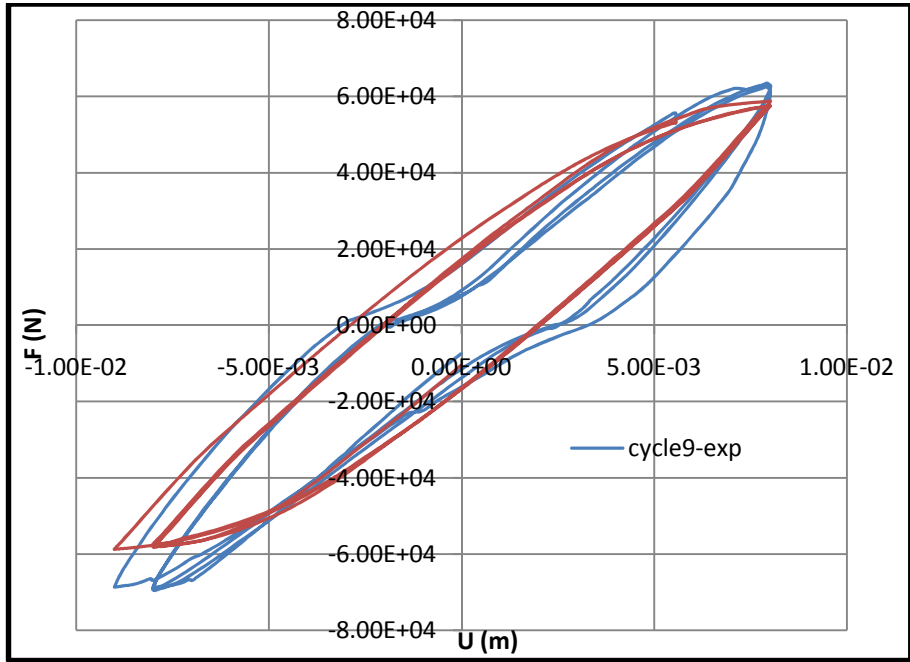


Figure 3.32 Cycle9.

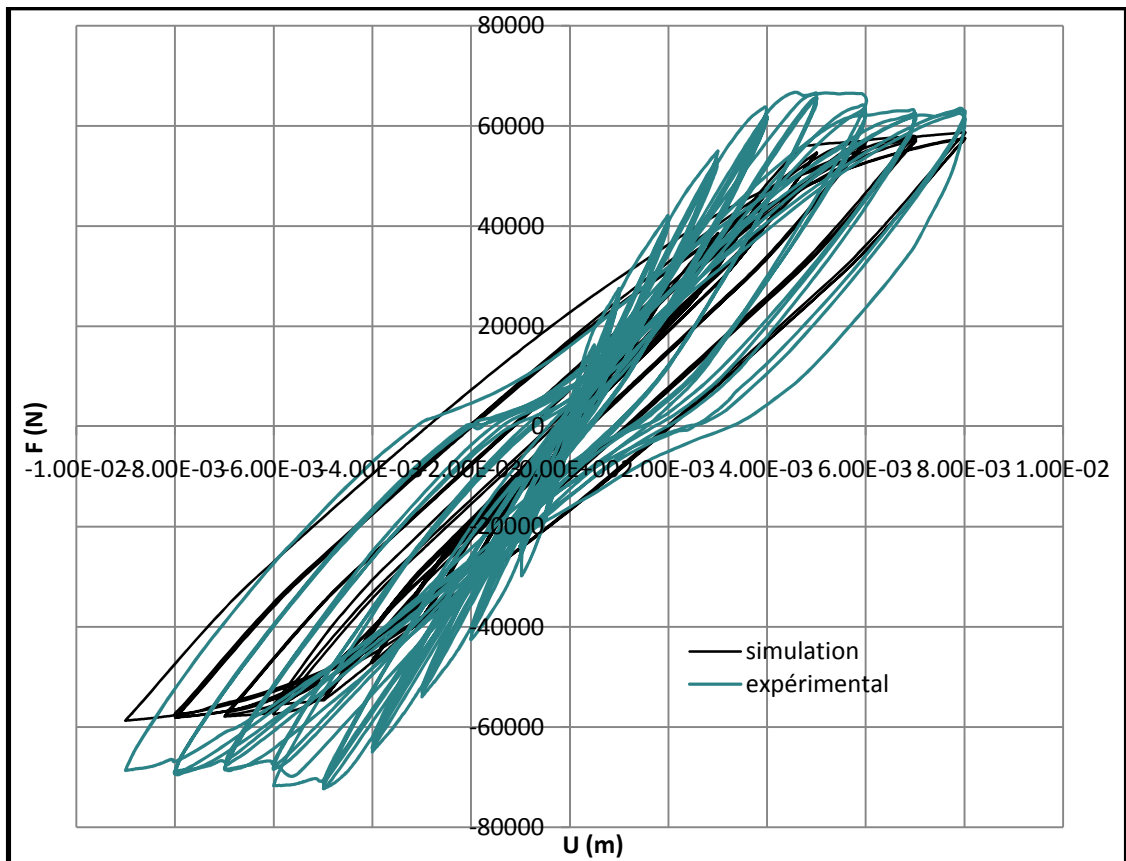


Figure 3.33 Comparaison entre la réponse expérimentale globale de la poutre et la réponse numérique (modèle d'acier Pinto – Menegotto).

On comparant les résultats de calculs numériques et les résultats expérimentaux pour les différents niveaux de chargement on remarque que les réponses globales de la poutre avec les deux différents modèles de comportement de l'acier sont identique pour les premiers cycles 1,3 et 6 sauf pour les derniers cycles (9) où le rôle du béton est désactivé (le béton est fortement endommagé), la courbe évolue en suivant le comportement des armatures longitudinales.

3.4.1.3 Evaluation de l'endommagement

Les figures suivantes présentent l'endommagement de traction au cours de chargement pour les trois différentes poutres en utilisant le modèle Unilatéral (La Borderie).

a. Poutre1

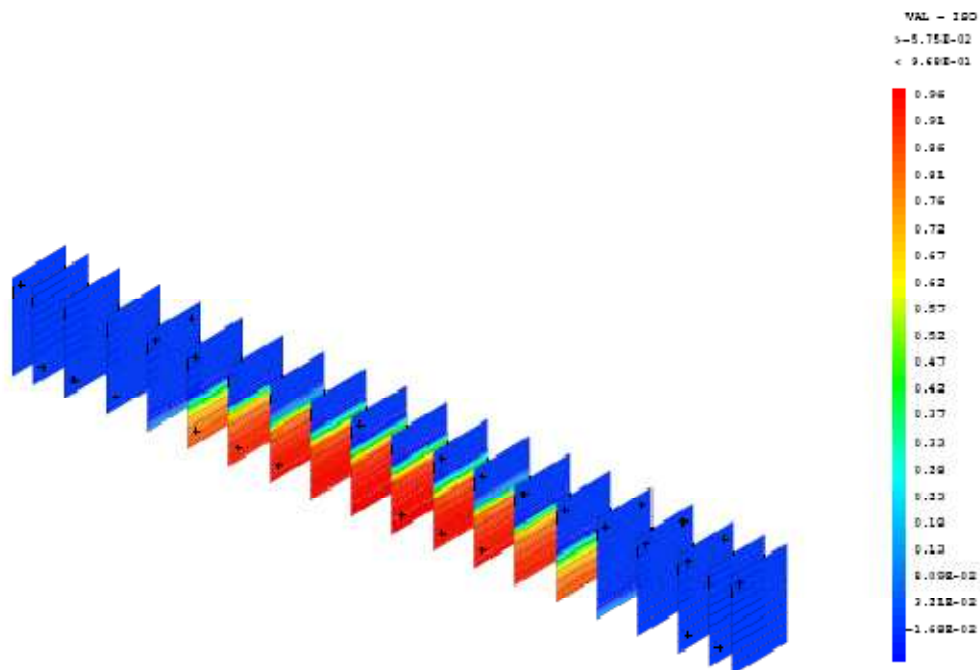


Figure 3.34 La carte d'endommagement d1 pour un déplacement de 2mm.

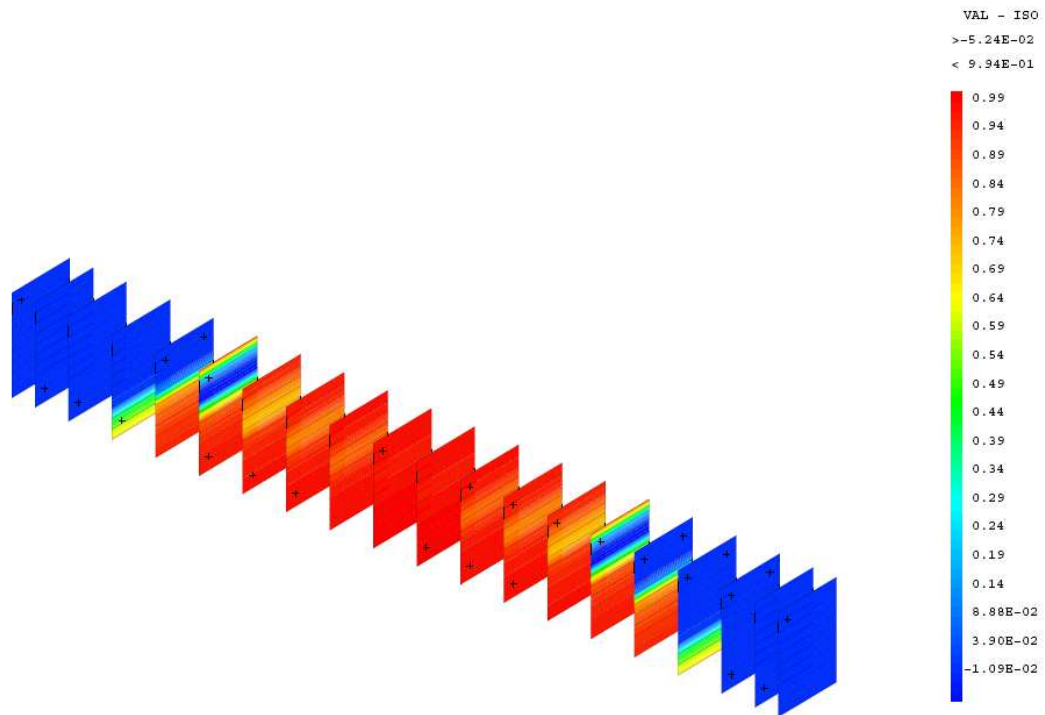


Figure 3.35 La carte d'endommagement d1 pour un déplacement de 8mm.

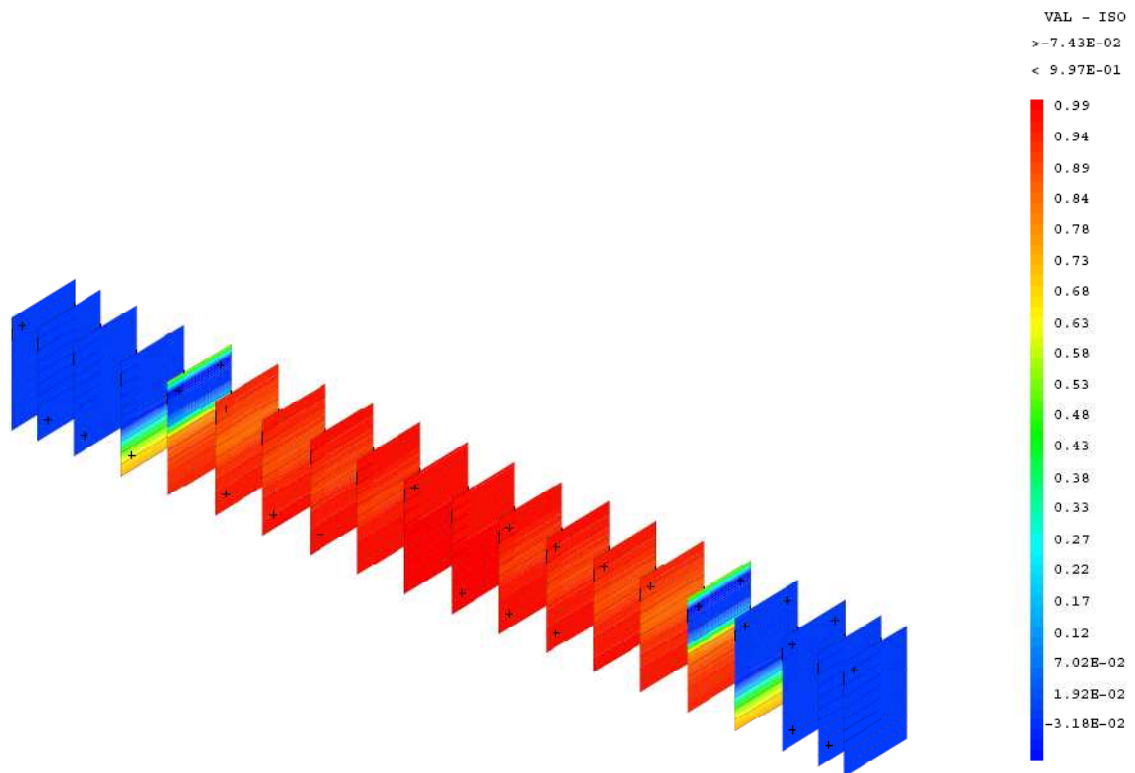


Figure 3.36 La carte d'endommagement d1 pour un déplacement de 12mm.

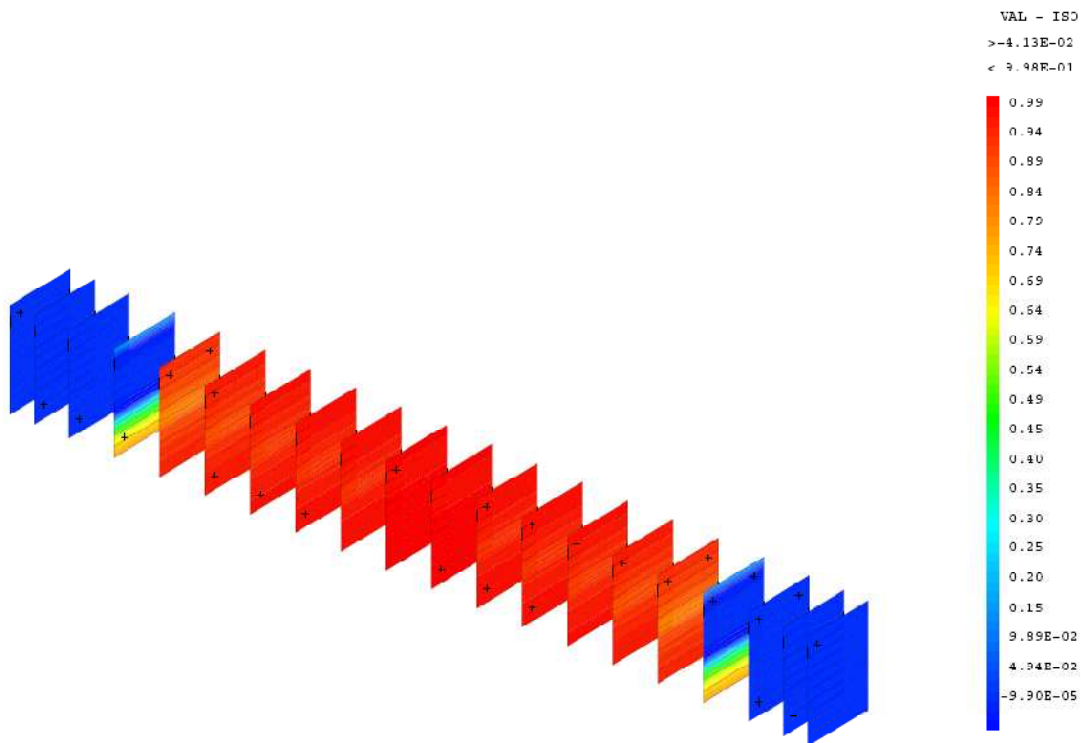


Figure 3.37 La carte d'endommagement d1 pour un déplacement de 15mm.

b. Poutre 8

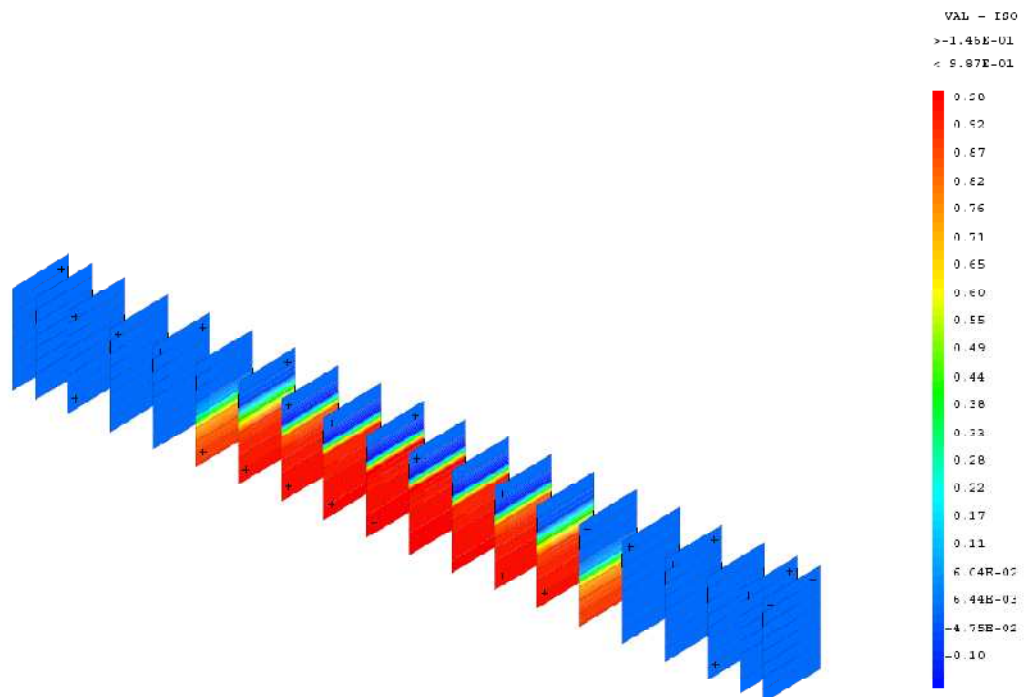


Figure 3.38 La carte d'endommagement d1 pour un déplacement de 2mm.

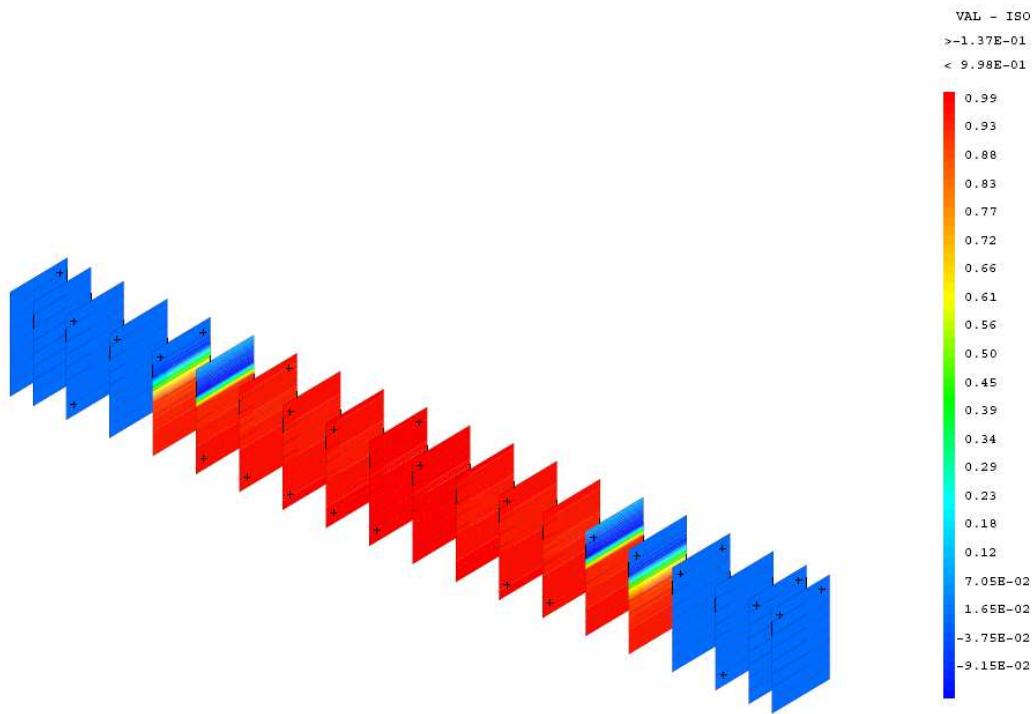


Figure 3.39 La carte d'endommagement d1 pour un déplacement 8mm.

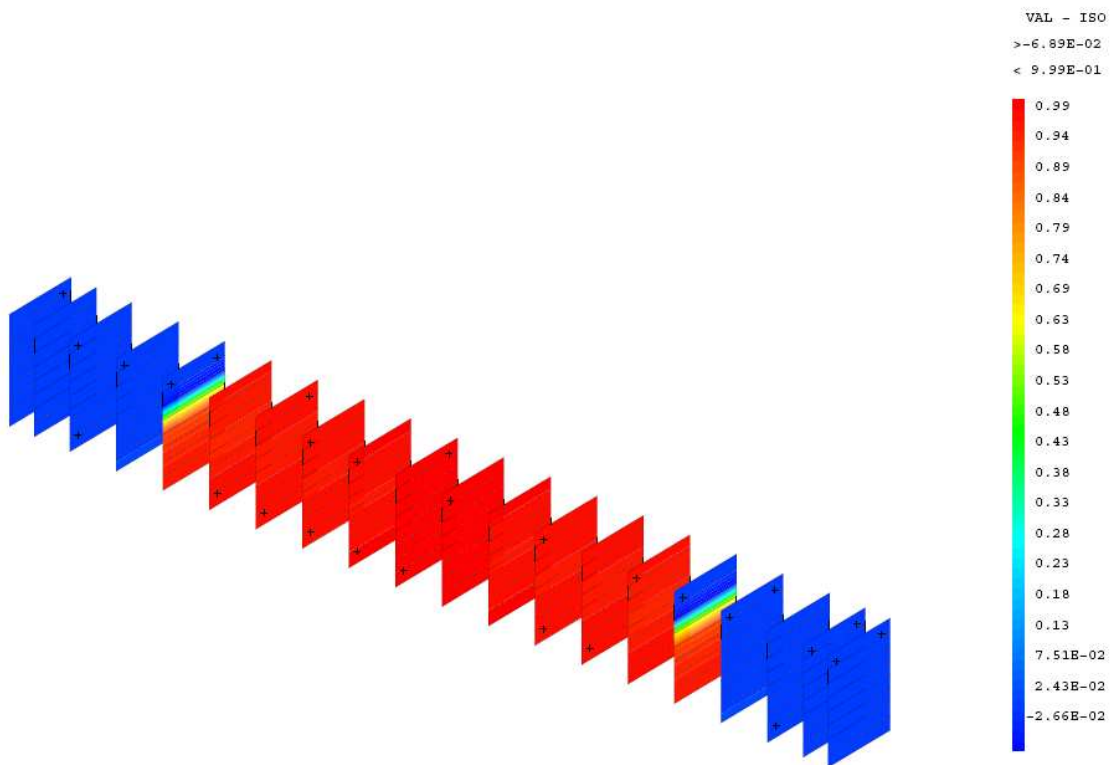


Figure 3.40 La carte d'endommagement d1 pour un déplacement de 12mm.

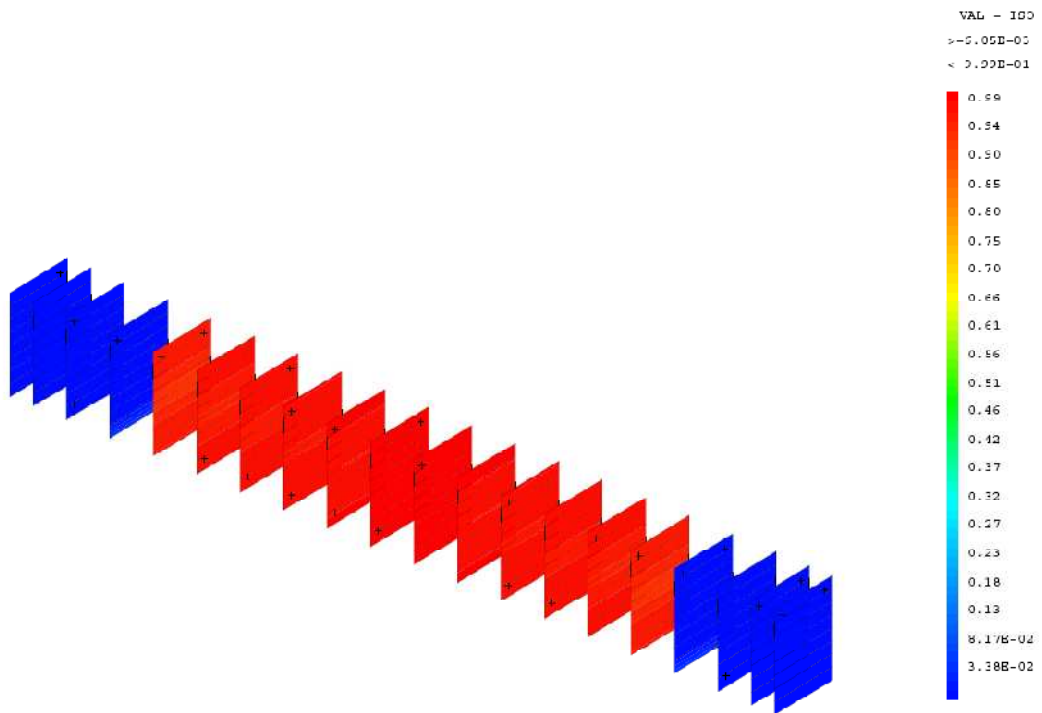


Figure 3.41 La carte d'endommagement d1 pour un déplacement de 15mm.

c. Poutre LMT

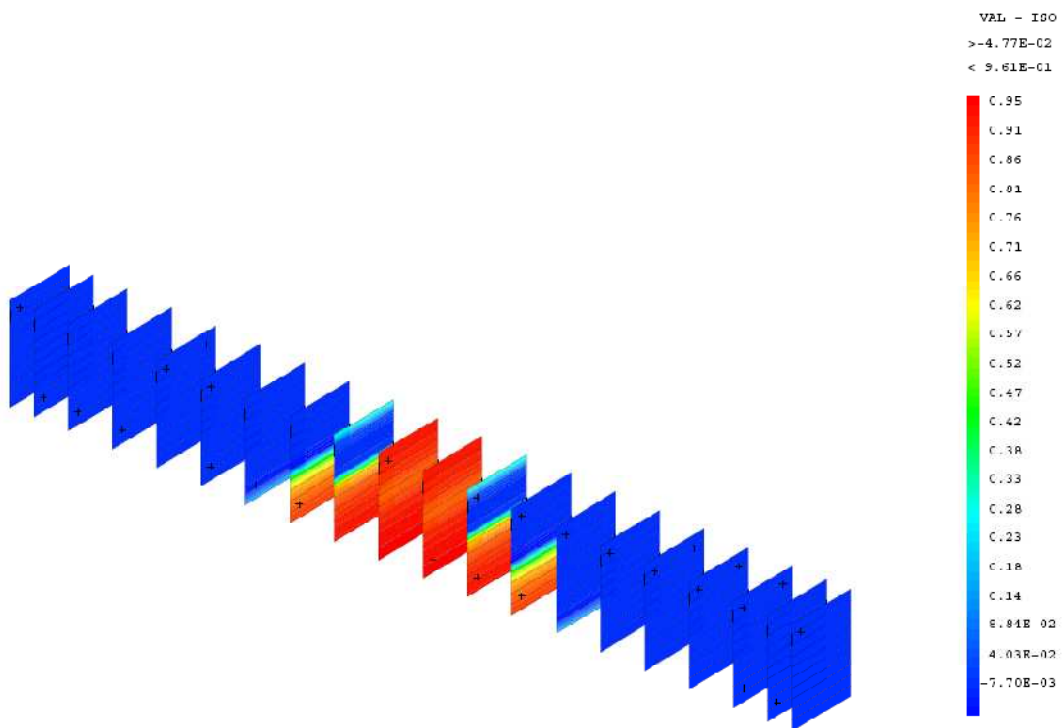


Figure 3.42 La carte d'endommagement d1 pour un déplacement de 1mm.

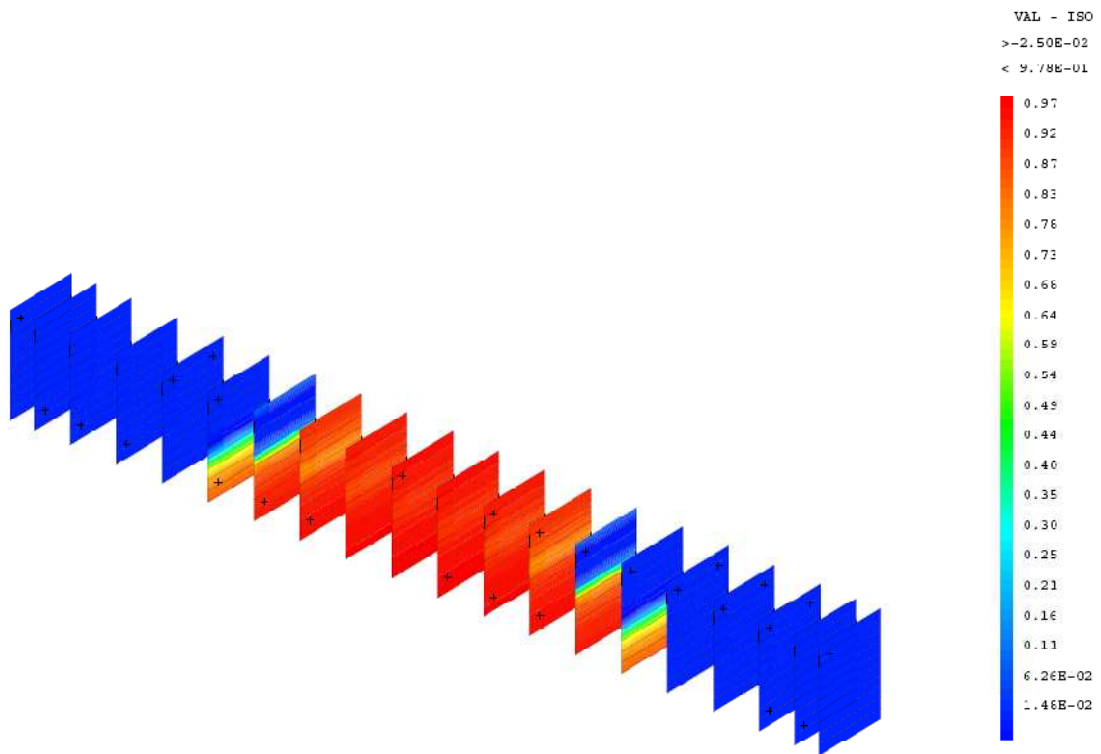


Figure 3.43 La carte d'endommagement d1 pour un déplacement de 2mm.

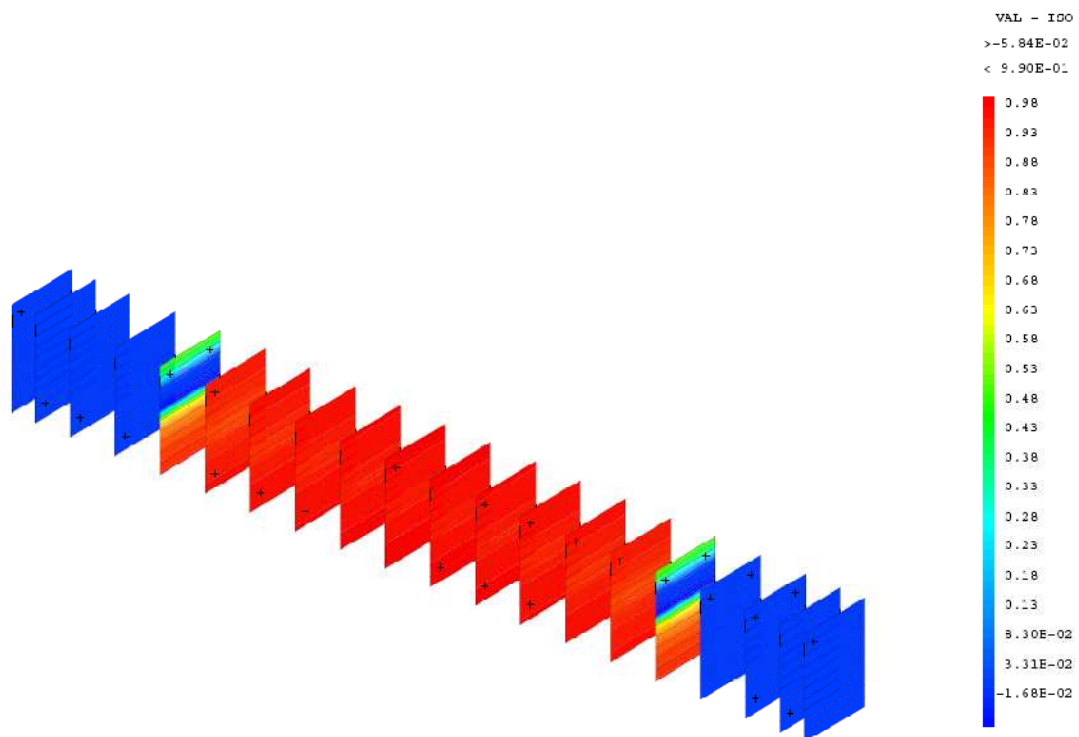


Figure 3.44 La carte d'endommagement d1 pour un déplacement de 4mm.

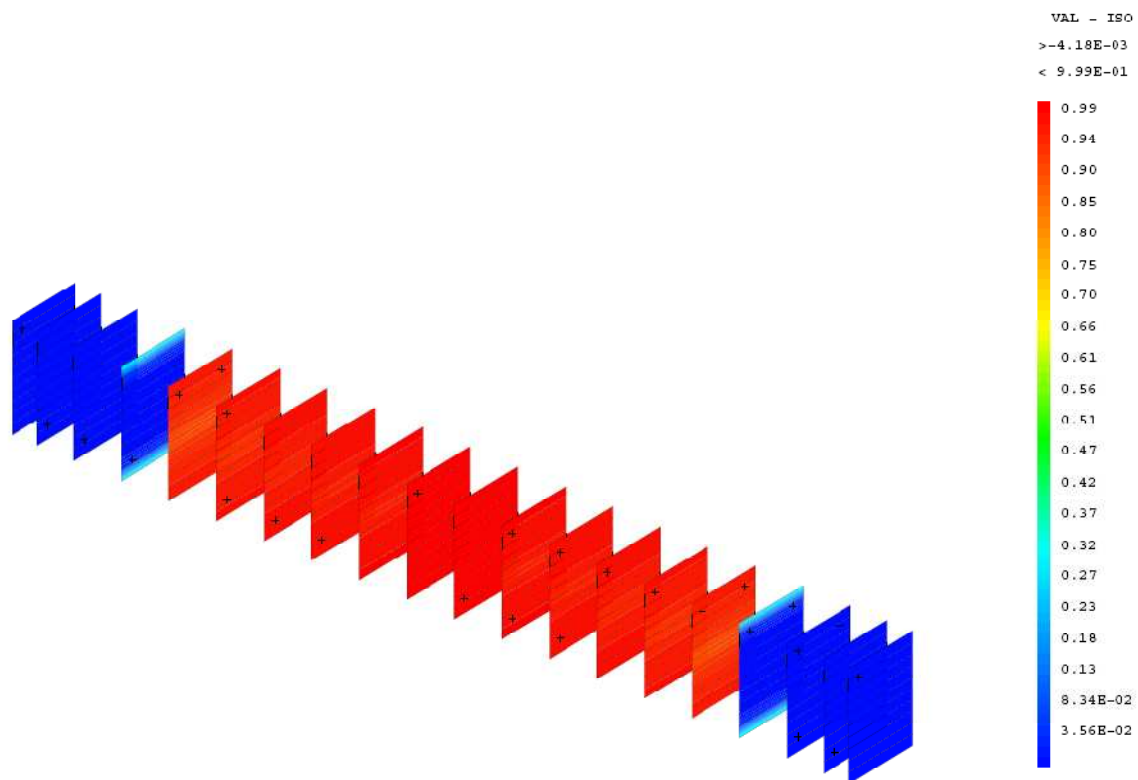


Figure 3.45 La carte d'endommagement $d1$ pour un déplacement de 8mm.

On remarque que l'endommagement évolue avec le chargement d'une manière significatif dans la partie centrale des poutres, on peut dire que le modèle est capable à prédire les zones d'endommagement critiques.

3.5 Conclusion

Les deux modèles (La Borderie et Béton_Uni) simulent correctement le comportement global des poutres jusqu'à la ruine, mais dans l'expérimentation ; la refermeture des fissures donne une courbe sous la forme de S, une caractéristique qu'on n'a pas pu reproduire par les modèles utilisés.

Afin d'améliorer les résultats expérimentaux, les essais sur la poutre LMT ont été effectués par des instruments de mesures de champs très développés, afin de déterminer les ouvertures de fissures le long du chargement. Dans ce présent chapitre les deux modèles utilisés (La Borderie et Béton_Uni) ne sont pas capables d'évaluer les ouvertures de fissures, c'est l'objet du chapitre suivant.