



**HAL**  
open science

## Modèle cyclique de béton confiné par TFC pour poteaux circulaires en béton armé

Cédric Desprez, Jacky Mazars, Panagiotis Kotronis, P. Paultre, N. Roy,  
Mathieu Boucher-Trudeau

### ► To cite this version:

Cédric Desprez, Jacky Mazars, Panagiotis Kotronis, P. Paultre, N. Roy, et al.. Modèle cyclique de béton confiné par TFC pour poteaux circulaires en béton armé. XIXème congrès français de Mécanique (CFM'09), Aug 2009, Marseille, France. hal-01086180

**HAL Id: hal-01086180**

**<https://hal.science/hal-01086180>**

Submitted on 20 Nov 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# MODELE CYCLIQUE DE BETON CONFINE PAR TFC POUR POTEAUX CIRCULAIRES EN BETON ARME

C. DESPREZ<sup>a</sup>, J. MAZARS<sup>a</sup>, P. KOTRONIS<sup>a</sup>,  
P. PAULTRE<sup>b</sup>, N. ROY<sup>b</sup>, M. B-TRUDEAU<sup>b</sup>

a. Laboratoire Sols, Solides, Structures - Risques (3S-R), UJF/CNRS/INPG Domaine Universitaire, BP 53,  
38041 Grenoble Cedex 9, France

b. Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil, 2500 boulevard de l'Université,  
Sherbrooke, Québec J1K 2R1, Canada

## Résumé :

*En génie parasismique, la réduction de la vulnérabilité des structures existantes est un enjeu majeur. Le renforcement externe d'éléments par collage de Tissu de Fibre de Carbone (TFC) est une réponse intéressante à cette problématique. Cet article présente la construction d'un modèle uniaxial de béton confiné adapté au cas des chargements monotones et cycliques. Ce modèle est fondé sur deux modèles bien connus, le premier basé sur la théorie de l'endommagement (La Borderie) et le second basé sur une série d'études expérimentales (Eid & Paultre). Le modèle est implanté dans un code éléments finis multifibres. Une validation expérimentale de ce modèle est menée en étudiant le cas de poteaux en béton armé soumis à un chargement cyclique de flexion composée.*

## Abstract :

*In structural engineering, the seismic vulnerability reduction of existing structures is a crucial issue. External reinforcement using Fiber Reinforced Polymer (FRP) is an interesting tool in order to fulfill this aim. This paper presents a method to simulate the behavior of existing columns considering FRP reinforcement effect. It describes the construction of a 1D confined concrete behavior law suitable for monotonic and cycling loadings. The law is inspired on two well-known concrete laws, the first one based on damage mechanics theory (La Borderie concrete damage law) and the second one based on experimental studies (Eid & Paultre concrete monotonic law). Structures are discretized using multifiber beam elements. Validation of the approach is provided using experimental tests of RC columns under axial and flexural cyclic loading.*

**Mots clés :** Renforcement ; TFC ; Béton armé ; Béton confiné ; Modélisation numérique ; Poutre multifibres.

## 1 Introduction

Cet article traite de la prise en compte du renforcement de poteaux existants par collage de TFC dans la modélisation des structures par élément-finis multifibres. Il s'agit ici d'établir un modèle de béton confiné dans le but de permettre une analyse prédictive du comportement sismique d'un ouvrage existant, avant et après son confortement. La section 2 présente les outils de modélisation retenue pour servir de base au développement du modèle proposé par la suite. La troisième partie expose la construction d'un modèle permettant de modéliser le comportement de poteaux confinés par TFC sous sollicitations cycliques, ce qui est nécessaire à l'étude des ouvrages sous chargement sismique. Enfin, la quatrième partie présente une validation expérimentale de ce modèle.

## 2 Outils de modélisation

### 2.1 Elements poutres multifibres

Les éléments poutres multifibres permettent de simplifier la modélisation d'une structure. La section d'un élément multifibres est décomposée en plusieurs fibres parallèles à l'axe de la poutre. A chacune des fibres peut être appliquée une loi de comportement propre. Ceci permet de représenter plusieurs matériaux dans une même section (figure 1). Chaque loi de comportement ne nécessite qu'une écriture uniaxiale. Les éléments multifibres utilisés dans ces travaux sont des éléments poutres Timoshenko [1],[2],[3] et sont utilisés dans le code éléments finis FedasLab [4].

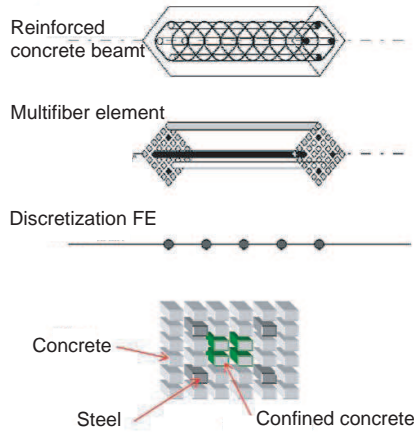


FIG. 1 – Modélisation d'une poutre multifibres.

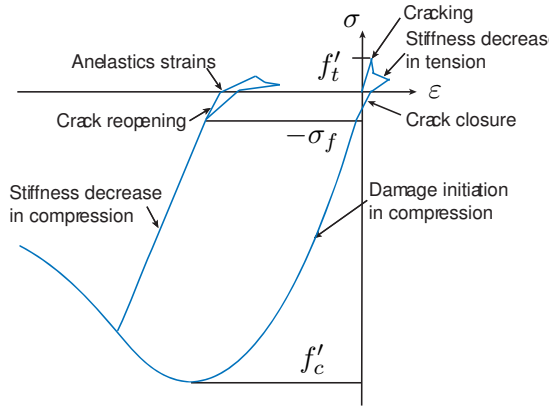


FIG. 2 – Modèle cyclique La Borderie : relation contrainte-déformation uniaxiale.

## 2.2 Béton non confiné (modèle cyclique)

Le comportement du béton armé (non confiné par le TFC) sous sollicitations cycliques est modélisé par le modèle d'endommagement La Borderie [5],[6]. Ce modèle prend en compte les phénomènes d'ouverture et de refermeture des fissures lors de sollicitations cycliques (figure 2). L'écriture générale de ce modèle est tridimensionnelle (3D), mais l'utilisation d'éléments multifibres ne nécessite qu'une écriture uniaxiale (1D). Les déformations totales ( $\varepsilon$ ) sont définies comme la somme des déformations élastiques ( $\varepsilon_e$ ) et anélastiques ( $\varepsilon_a$ ) :

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_a \quad (1)$$

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma^+}{E(1-D_1)} + \frac{\sigma^-}{E(1-D_2)} \quad (2)$$

$$\varepsilon_a = \frac{\beta_1 D_1}{E(1-D_1)} F'(\sigma) + \frac{\beta_2 D_2}{E(1-D_2)} \quad (3)$$

$$D_i = 1 - \frac{1}{1 + [A_i(Y_i - Y_{0i})]^{B_i}} \quad i=1 \text{ or } 2 \quad (4)$$

$\sigma^+$  sont les contraintes de traction et  $\sigma^-$  les contraintes de compression;  $E$  est le module d'Young initial du béton;  $\beta_1$  et  $\beta_2$  sont des constantes matériaux qui pilotent les déformations plastiques respectivement en traction et en compression;  $F'(\sigma)$  est une fonction qui caractérise le mécanisme de refermeture des fissures;  $D_1$  et  $D_2$  sont les variables d'endommagement, respectivement en traction et en compression (4);  $D_1$  et  $D_2$  sont pilotés par des paramètres énergétiques ( $Y_i$  et  $Y_{0i}$ ).  $D_1$  et  $D_2$  évoluent de 0 (matériau sain) à 1 (matériau endommagé). Une méthodologie du paramétrage de ce modèle est présentée dans [7].

## 2.3 Béton confiné (modèle monotone)

Le développement du modèle cyclique de béton confiné proposé par la suite se base sur le modèle de Eid & Paultra [8]. Ce modèle monotone globale concerne les poteaux circulaires confinés intérieurement (cadres) et extérieurement (TFC) (figure 3). La partie pré-pic de la courbe est définie par l'équation (5), la partie post-pic avant rupture du TFC est décrite par l'équation (6) et la partie post-pic après rupture du TFC est modélisé par l'équation (7).

$$\sigma_c = \frac{a\varepsilon_c}{1 + b\varepsilon_c + z\varepsilon_c^2} \quad \varepsilon_c \leq \varepsilon'_{cc} \quad (5)$$

$$\sigma_c = f'_{cc} \exp \left[ k_1 (\varepsilon_c - \varepsilon'_{cc})^{k_2} \right] + E_{cu} (\varepsilon_c - \varepsilon'_{cc}) \quad \varepsilon_{cu} > \varepsilon_c \geq \varepsilon'_{cc} \quad (6)$$

$$\sigma_c = f'_{cc,s} \exp \left[ k_{1,s} (\varepsilon_c - \varepsilon'_{cc,s})^{k_{2,s}} \right] \quad \varepsilon_c \geq \varepsilon_{cu} \quad (7)$$

$\sigma_c$  et  $\varepsilon_c$  sont les contraintes et déformations axiales pour le béton confiné;  $f'_c$  et  $\varepsilon'_c$  sont les contraintes et déformations au pic en compression pour le béton non confiné;  $f'_{cc}$  et  $\varepsilon'_{cc}$  représentent les valeurs au pic du béton confiné (cadres et TFC);  $f'_{cu}$  et  $\varepsilon'_{cu}$  sont les contraintes et déformations à la rupture pour le matériau confiné;  $f'_{cc,s}$  et  $\varepsilon'_{cc,s}$  définissent les caractéristiques au pic pour le béton simplement confiné par les armatures transversales;  $a$ ,  $b$  et  $z$  sont des constantes qui contrôlent la pente initiale et la courbure pré-pic;  $k_1$  et  $k_2$  sont des paramètres pilotant la forme de la partie post-pic. Une présentation complète de ce modèle est présentée dans [8].

## 2.4 Comportement des aciers

Le comportement de l'acier est représenté par le modèle classique de Menegotto-Pinto (figure 4).

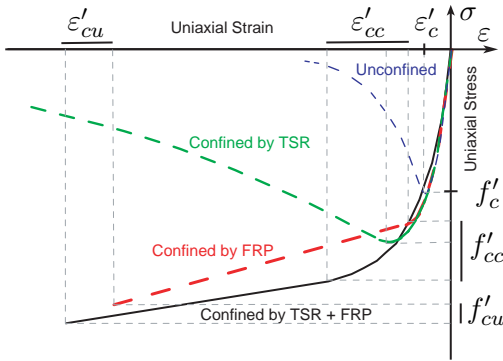


FIG. 3 – Modèle monotone Eid & Paultre : relation contrainte-déformation uniaxiale.

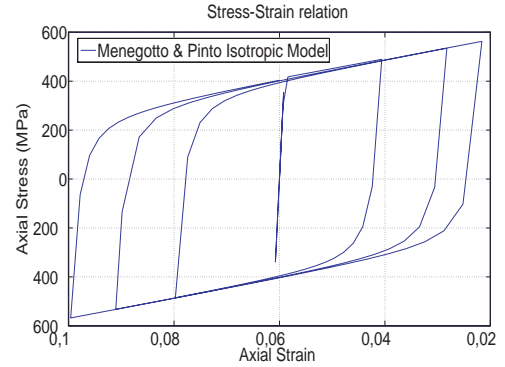


FIG. 4 – Modèle cyclique Menegotto-Pinto : relation contrainte-déformation uniaxiale.

## 3 Construction d'un modèle cyclique de béton confiné par TFC pour poteaux circulaires

### 3.1 Principe

Sur le plan mécanique, le confinement réduit le développement de l'expansion latérale qui est la cause majeure de l'endommagement. Une manière de prendre en compte cet effet dans le modèle uniaxial de La Borderie consiste à adapter la loi d'évolution de l'endommagement. L'évolution de l'endommagement est modifiée dans le but de reproduire le comportement en compression du modèle Eid & Paultre [8]. Seul l'effet du confinement orthoradial est traité dans cette partie. Les fibres de TFC sont donc supposées orientées circonférentiellement autour du poteau. La prise en compte d'un renforcement axial induit par des fibres supplémentaires de TFC orientées longitudinalement est possible [9], mais n'est pas présenté ici. Dans le cas uniaxial du modèle La Borderie, les équations (1), (2) et (3) donnent la relation contraintes-déformations suivante :

$$\varepsilon = \frac{\sigma^+}{E(1 - D_1)} + \frac{\sigma^-}{E(1 - D_2)} + \frac{\beta_1 \cdot D_1}{E(1 - D_1)} F'(\sigma) + \frac{\beta_2 \cdot D_2}{E(1 - D_2)} \quad (8)$$

Dans le cas de la compression uniaxiale monotone, après refermeture des fissures, la relation (8) devient :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon (1 - D_2) - \beta_2 D_2 \quad (9)$$

Nous pouvons alors extraire l'expression de l'endommagement  $D_2$  suivante :

$$D_2 = \frac{E \cdot \varepsilon - \sigma}{E \cdot \varepsilon + \beta_2} \quad (10)$$

Cette expression permet d'étudier l'évolution de la variable d'endommagement en compression  $D_2$  à partir des contraintes et déformations axiales issues d'un essai de compression uniaxial. Les figures 5 et 6 présentent les courbes contraintes-déformations en compression ainsi que l'évolution de l'endommagement pour les modèles La Borderie (non confiné) et Eid & Paultre (confiné). Comme nous l'avons évoqué précédemment, on observe que le confinement réduit l'évolution de l'endommagement. L'évolution de  $D_2$  en fonction de la déformation axiale est plus faible dans le cas du béton confiné. Nous pouvons alors exprimer la relation constitutive de la variable d'endommagement de La Borderie modifiée en y intégrant le modèle Eid & Paultre. Cette nouvelle variable d'endommagement est nommée  $D_{2c}$  :

$$D_{2c} = \frac{E \cdot \varepsilon_c - \sigma_c}{E \cdot \varepsilon_c + \beta_2} \quad (11)$$

$\sigma_c$  est la contrainte axiale déterminée avec les équations (5), (6) et (7). L'hypothèse est faite que le processus de déchargement et le comportement en traction du béton ne sont pas affectés par le confinement. En substituant  $D_{2c}$  à  $D_2$  dans les équations (8) et (9) on décrit alors le comportement uniaxial cyclique pour le matériau confiné (figure 7). Par la suite, le modèle obtenu est nommé LMCC (La Borderie Modified for Confined Concrete).

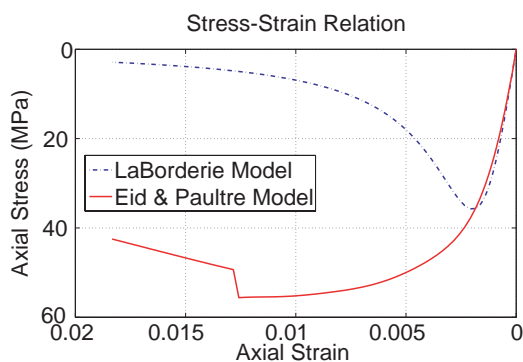


FIG. 5 – Modèles La Borderie et Eid & Paultre : comportement monotone contrainte-déformation uniaxiale en compression.

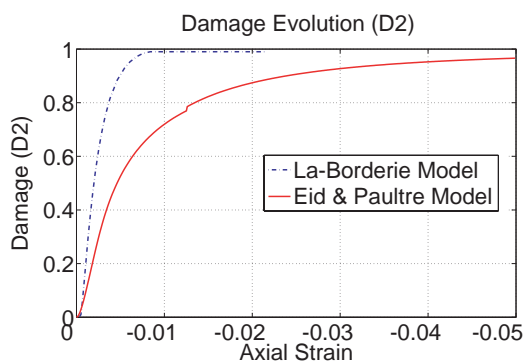


FIG. 6 – Modèles La Borderie et Eid & Paultre : évolution de l'endommagement ( $D_2$ ) due à la compression.

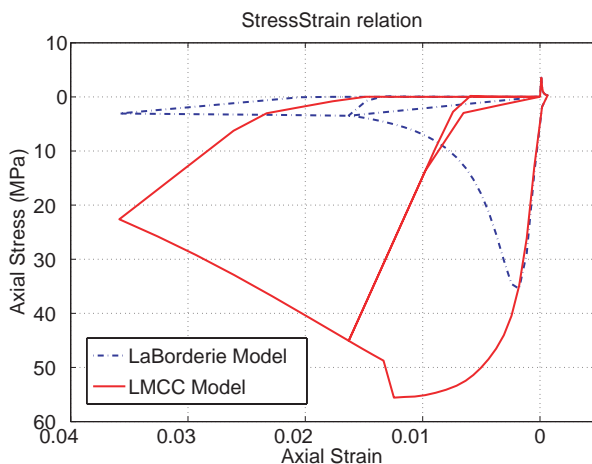


FIG. 7 – Comportement cyclique du modèle La Borderie modifié pour béton confiné (LMCC).

### 3.2 Validation expérimentale : Poteaux sous chargement cyclic de flexion-compression

Les données expérimentales utilisées dans cette section proviennent d'essais réalisés à l'Université de Sherbrooke [10] sur poteaux confinés par TFC ( $P1$  et  $P2$ ) et poteaux non confinés ( $P3$  et  $P4$ ) (figure 8). Les poteaux sont en béton armé, cylindriques et de construction identique (figure 9 et 10). Pendant la durée de l'essai la charge axiale est gardée constante avec une valeur de 10% ( $P1$  et  $P3$ ) ou 35% ( $P2$  et  $P4$ ) de la capacité portante estimée du poteau en compression uniaxiale ( $A_g f'_c$ ), (table 1). Un déplacement horizontal cyclique est appliqué en tête de poteau. Les caractéristiques détaillées de ces essais sont disponibles dans [10].

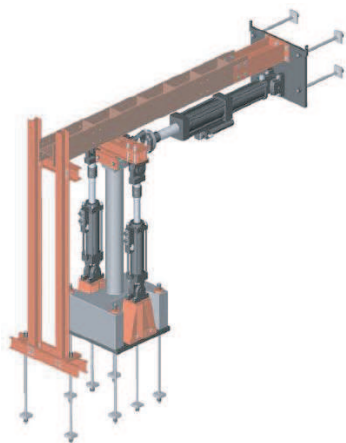


FIG. 8 – Montage expérimental.

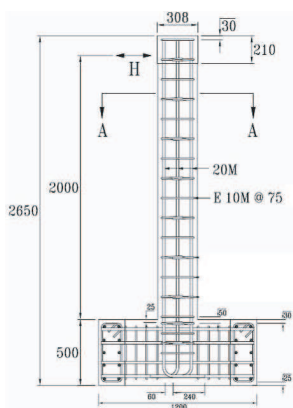


FIG. 9 – Caractéristiques géométriques des poteaux.

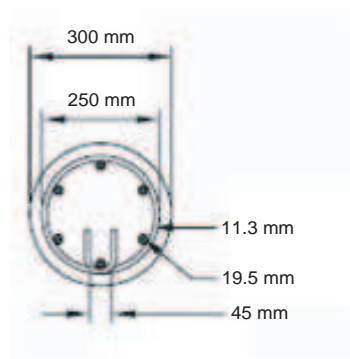


FIG. 10 – Section des poteaux.

### 3.2.1 Modélisation numérique

Chaque poteau est modélisé par 5 éléments poutres multifibres. Chaque section multifibres est composée de 24 fibres pour le béton et 6 pour les armatures d'acier longitudinales (figure 11). Les poteaux sont supposés encastrés en pied et libres en tête. Le modèle La Borderie est utilisé pour les fibres de béton non confiné ( $P3$  et  $P4$ ), le modèle LMCC (La Borderie modified for confined concrete) est utilisé pour les fibres de béton confiné ( $P1$  et  $P2$ ) et le modèle Menegotto-Pinto est employé pour les fibres d'acier. Les propriétés matériaux employées ( $E$ ,  $F_{c28}$ ..) proviennent de caractérisations expérimentales [10].

Test	FRP (mm)	Axial Load (KN)	% of capacity in compression
P1	1	224.3	10
P2	1	866.4	35
P3	0	234.3	10
P4	0	751.6	35

TAB. 1 – Description des essais.

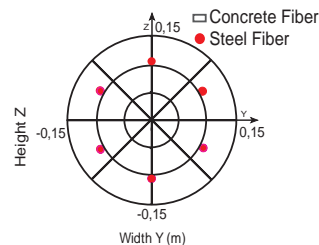


FIG. 11 – Section de la poutre multifibres : position des fibres.

### 3.2.2 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

L'accroissement significatif en résistance et en ductilité produit par le confinement est nettement représenté par le modèle LMCC. Comme le montrent les figures 12 à 15, les résultats du modèle numérique sont proches du comportement expérimental. La différence de comportement au cours des cycles entre une fibre de béton confiné (modèle LMCC) et non confiné (modèle La Borderie) est montrée dans la figure 16.

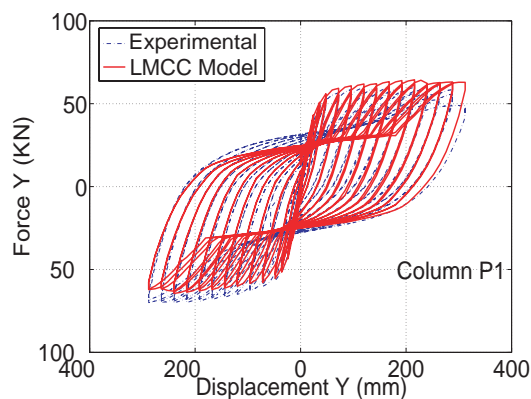


FIG. 12 – Poteau confiné  $P1$  : résultats numériques vs données expérimentales.

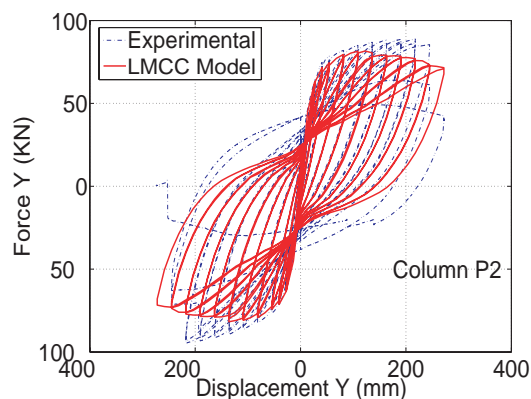


FIG. 13 – Poteau confiné  $P2$  : résultats numériques vs données expérimentales.

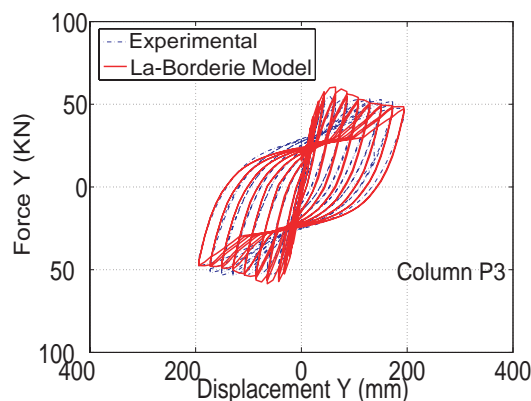


FIG. 14 – Poteau non confiné  $P3$  : résultats numériques vs données expérimentales.

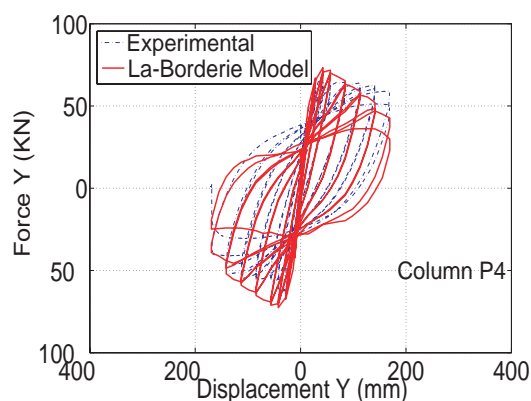


FIG. 15 – Poteau non confiné  $P4$  : résultats numériques vs données expérimentales.

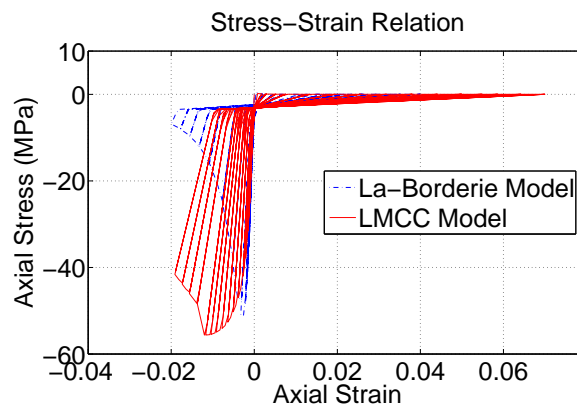


FIG. 16 – Comportement contrainte-déformation axiale dans une fibre de béton pour les poteaux  $P1$  et  $P3$  (résultats numériques).

## 4 Conclusion

Dans cette étude, une méthode permettant de modéliser le comportement des poteaux confinés par TFC sous chargement cyclique a été présentée. Un nouveau modèle basé sur le modèle cyclique d'endommagement La Borderie et le modèle monotone Eid & Paultre est proposé. Une campagne expérimentale menée à l'Université de Sherbrooke a permis de valider ce modèle. Les résultats des simulations numériques montrent une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux.

## Références

- [1] Kotronis P. and Mazars J. Simplified modelling strategies to simulate the dynamic behaviour of R/C walls. *Journal of Earthquake Engineering*, 9(2), 285–306, 2005.
- [2] Mazars J., Kotronis P., Ragueneau F., and Casaux G. Using multifiber beams to account for shear and torsion : Applications to concrete structural elements. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195(52), 7264–7281, 2006.
- [3] Kotronis P. Stratégies de modélisation de structures en béton soumises à des chargements sévères. Habilitation à diriger des recherches, <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00350461/fr/>, Université Joseph Fourier, 2008.
- [4] Filippou F. and Constandines M. Fedeslab getting started guide and simulations examples. Dpt of civil and env. Engng. UC Berkeley, 2004.
- [5] La Borderie C. Phénomènes unilatéraux dans un matériau endommageable : Modélisation et application à l'analyse des structures en béton. Thèse de doctorat, Université Paris VI, Paris, France, 1991.
- [6] La Borderie C. Stratégies et modèles de calculs pour les structures en béton. Habilitation à diriger des recherches, Université de Pau et des Pays de l'Adour, France, 2003.
- [7] Légeron F., Paultre P., and Mazars J. Damage mechanics modeling of nonlinear seismic behavior of concrete structures. *Journal of Structural Engineering*, 131(6), 946–955, 2005.
- [8] Eid R. and Paultre P. Analytical model for FRP-confined circular reinforced concrete columns. *Journal of Composites for Construction*, 12(5), 541–552, 2008.
- [9] Desprez C., Mazars J., Kotronis P., Paultre P., Roy N., and B-Trudeau M. Retrofitting reinforced concrete structures with frp : Numerical simulation using multifiber beam elements. *Proceedings of COMPDYN, ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Rhodes, Greece, 2009.
- [10] Trudeau M., Tavares D., Roy N., and Paultre P. Centre de Recherche en Génie Parasismique et en Dynamique des Structures (CRGP), Université de Sherbrooke, Works in progress, 2008.