



HAL
open science

Modèle cyclique de béton renforcé par TFC : Modélisation numérique de poteaux confinés, approche par éléments finis multifibres

C. Desprez, Panagiotis Kotronis, J. Mazars

► **To cite this version:**

C. Desprez, Panagiotis Kotronis, J. Mazars. Modèle cyclique de béton renforcé par TFC : Modélisation numérique de poteaux confinés, approche par éléments finis multifibres. 8ème Colloque National de l'Association Française de Génie Parasismique, AFPS 2011, Sep 2011, Marne-La-Vallée, France. pp.835-844. hal-01008447

HAL Id: hal-01008447

<https://hal.science/hal-01008447>

Submitted on 13 Jan 2020

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.



Modèle cyclique de béton renforcé par TFC : Modélisation numérique de poteaux confinés, approche par éléments finis multifibres.

Cédric Desprez*,* — Panagiotis Kotronis** —, Jacky Mazars***.

* Laboratoire de Mécanique et de Technologie, Ecole Normale Supérieure de Cachan
61 avenue du Président Wilson, 94235 Cachan cedex, France
Desprez@dgc.ens-cachan.fr

** LUNAM Université, Ecole Centrale de Nantes, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM),
UMR CNRS 6183, 1 Rue de la Noë, F-44321 Nantes, France

***Laboratoire Sols, Solides, Structures – Risques, Institut National Polytechnique de Grenoble
Domaine Universitaire BP53 38041 Grenoble Cedex 9, France

RÉSUMÉ. En génie parasismique, la réduction de la vulnérabilité des structures existantes est un enjeu majeur. Le renforcement externe d'éléments par collage de Tissus 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 et Paultre). Le modèle est implanté dans un code éléments finis avec des poutres 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 et 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 ; Poutre multifibres

KEYWORDS : Reinforcement ; FRP ; Reinforced concrete ; Confined concrete ; Multifibers beam.

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 poutres multifibres. Le cas étudié est celui du confinement des poteaux. 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. Eléments poutres multifibres

Les éléments poutres multifibres permettent de simplifier la modélisation d'une structure. A chacune des fibres peut être appliquée une loi de comportement propre. Ceci permet de représenter plusieurs matériaux dans une même section (figure 1). Les éléments multifibres utilisés dans ces travaux sont des éléments poutres Timoshenko (Kotronis et al., 2005), (Mazars et al., 2006), (Kotronis, 2008) et sont utilisés dans le code éléments finis FedeaLab (Filippou et al., 2004).

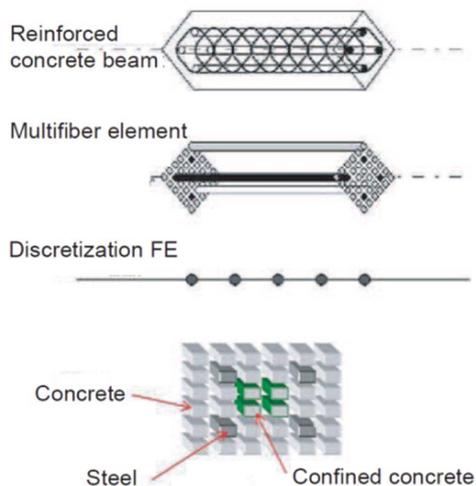


Figure 1. *Élément poutre multifibres (Guedes et al., 1994, Kotronis, 2000).*

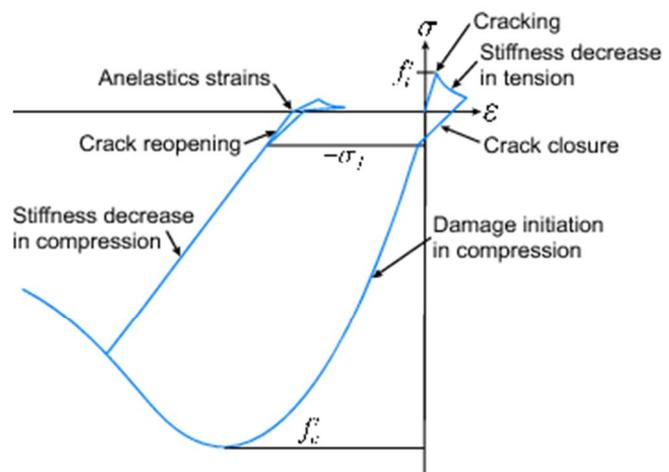


Figure 2. *Modèle cyclique de béton (La Borderie, 1991) - Relation contrainte-déformation uniaxiale.*

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 (La Borderie, 1991), (La Borderie, 2003). 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 de cinématique Bernoulli ne nécessite qu'une écriture uniaxiale (1D). Les déformations totales (ε) sont définies comme la somme des déformations élastiques (ε_e) et anélastiques (ε_a) :

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_a \quad [1]$$

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

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

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

σ^+ sont les contraintes de traction et σ^- les contraintes de compression ; E est le module d'Young initial du béton ; β_1 et β_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 (eq 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 (Legeron et al., 2005).

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 et Paultre (Eid et al., 2008). Cette loi 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].

$$\sigma_c = \frac{\alpha \cdot \varepsilon_c}{1 + b \cdot \varepsilon_c + z \cdot \varepsilon_c^2} \quad \varepsilon_c \leq \varepsilon'_{cc} \quad [5]$$

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

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

σ_c et ε_c sont les contraintes et déformations axiales pour le béton confiné ; f'_{cc} et ε'_{cc} représentent les valeurs au pic du béton confiné (cadres et TFC) ; f'_c et ε'_c , intervenant dans le calcul de f'_{cc} et ε'_{cc} sont les contraintes et déformations au pic en compression pour le béton non confiné (figure 3) ; f'_{cu} et ε'_{cu} sont les contraintes et déformations à la rupture pour le matériau confiné ; $f'_{cc,s}$ et $f'_{cc,s}$ 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 (Eid et al., 2008).

2.4. Comportement des aciers

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

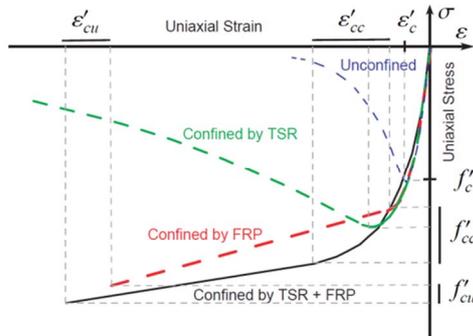


Figure 3. Modèle monotone de béton confiné (Eid et Paultre, 2008) – Relation contrainte - déformation uniaxiale.

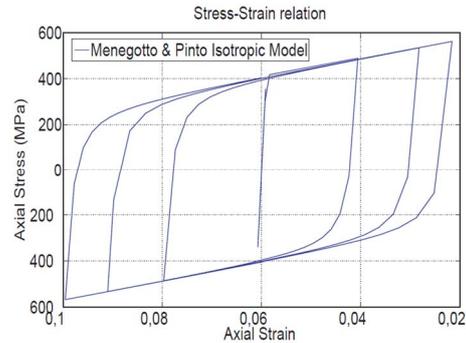


Figure 4. Modèle cyclique d'acier (Menegotto et al., 1973) - Relation contrainte - déformation uniaxiale.

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 du béton. 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 et Paultre (Eid et al., 2008). Seul l'effet du confinement 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 (Desprez, 2010), mais n'est pas présentée 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 (eq 8) devient :

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

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 et Paultre (confiné).

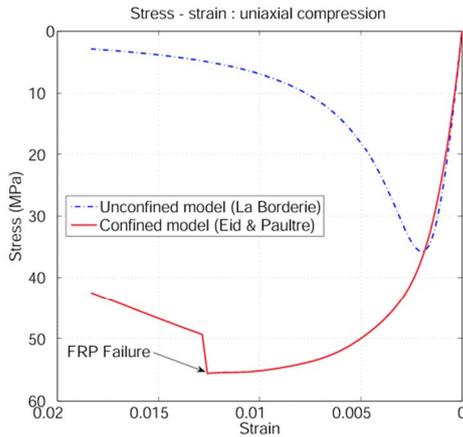


Figure 5. Modèles La Borderie et Eid et Paultre model. Relation monotone contrainte - déformation uniaxiale.

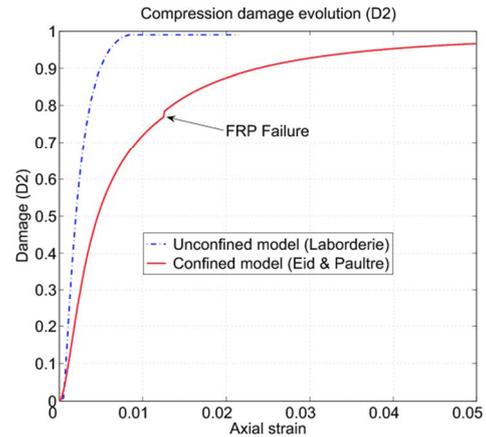


Figure 6. Modèles La Borderie et Eid et Paultre. Evolution de l'endommagement en compression.

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 et Paultre. Cette nouvelle variable d'endommagement est nommée D_{2c} :

$$D_{2c} = \frac{E \cdot \varepsilon - \sigma_c}{E \cdot \varepsilon + \beta_2} \quad [16]$$

σ_c est la contrainte axiale déterminée avec les équations (eq 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 (eq 8 et 9) on décrit alors le comportement uniaxial cyclique pour le matériau confiné (eq 17 et figure 5). Par la suite, le modèle obtenu est nommé CMCC (Cyclic Model for Confined Concrete).

$$\varepsilon = \frac{\sigma^+}{E(1-D_1)} + \frac{\sigma^-}{E(1-D_{2c})} + \frac{\beta_1 \cdot D_1}{E(1-D_1)} F'(\sigma) + \frac{\beta_2 \cdot D_{2c}}{E(1-D_{2c})} \quad [17]$$

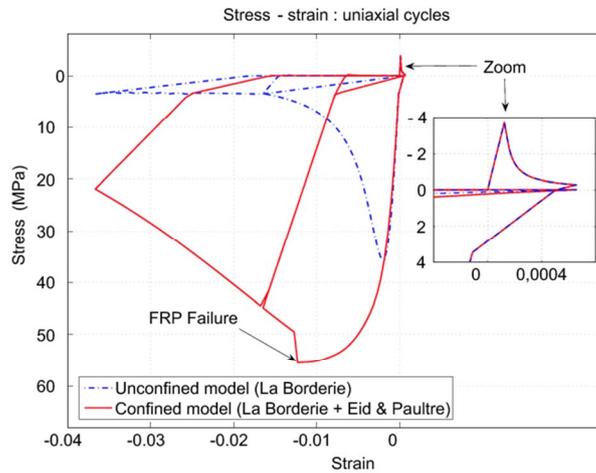


Figure 7. Modèle cyclique pour béton confiné (modèle CMCC) – Evolution cyclique contrainte – déformation uniaxiale.

3.2. Validation expérimentale : Poteaux sous chargement cyclique de flexion-compression

Les données expérimentales utilisées dans cette section proviennent d'essais réalisés à l'Université de Sherbrooke (Trudeau et al., 2009) sur poteaux confinés par TFC (*P1* à *P4*) et poteaux non confinés (*P1C* à *P4C*) (figure 8 et 9). Les poteaux sont en béton armé, cylindriques et de construction identique (figures 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 (Trudeau et al., 2009).



Figure 8. Poteau sous chargement cyclique - Montage expérimental

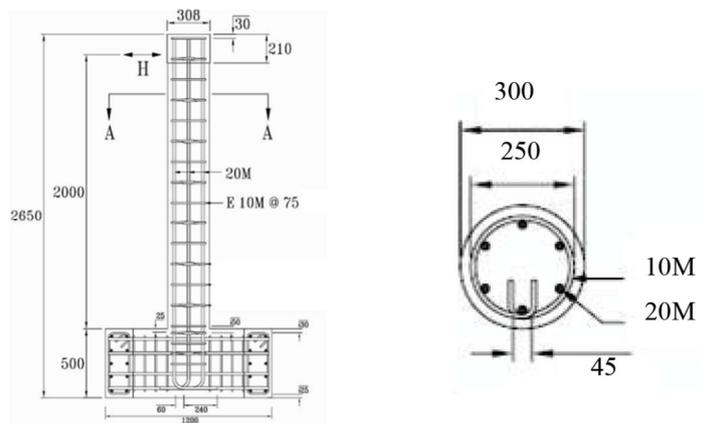


Figure 9. Caractéristiques géométriques des poteaux. (Diamètre des armatures : 10M = 11,5mm, 20M = 19,5mm)

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 (*P1* à *P4*), le modèle CMCC (Cyclic model for confined concrete) est utilisé pour les fibres de béton confiné (*P1C* et *P2C*) et le modèle Menegotto-Pinto est employé pour les fibres d'acier. Les propriétés matériaux employées (E , f'_c) proviennent de caractérisations expérimentales (Trudeau et al., 2009).

Table 1. Caractéristiques des essais cycliques sur poteaux confinés et non confinés.

N°	TFC mm	TSR spacing mm	$f'_{cf_{c28}}$ MPa	$f_{cf_{c'essai}}$ Mpa	Axial load P_f KN	$\frac{P_f}{A_g}$	$\frac{P_f}{A_g f'_c}$
P1	0	75	32,5	33,9	234,3	10 %	9,6 %
P1C	1,016	75	30,9	35,8	224,3	10 %	8,6 %
P2	0	75	29,9	31,9	759,6	35 %	32,8 %
P2C	1,016	75	33,9	34,9	866,9	35 %	34 %
P3	0	150	34	36,1	247,7	10 %	9,4 %
P3C	1,016	150	34,4	34,4	249	10 %	10 %
P4	0	150	31,1	34	792,7	35 %	32 %
P4C	1,016	150	31,8	34,3	805,3	35 %	32,4 %

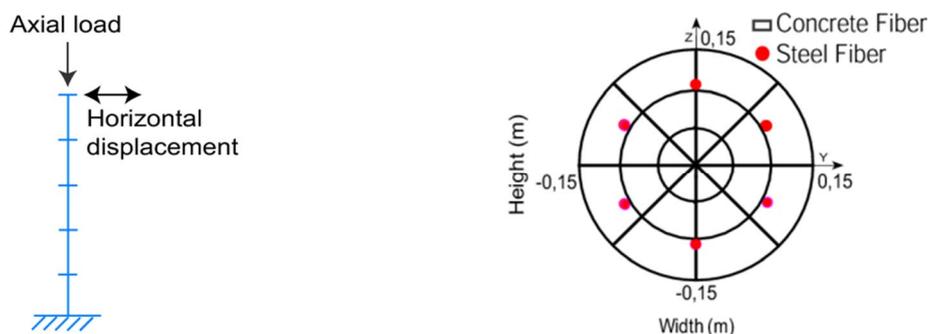
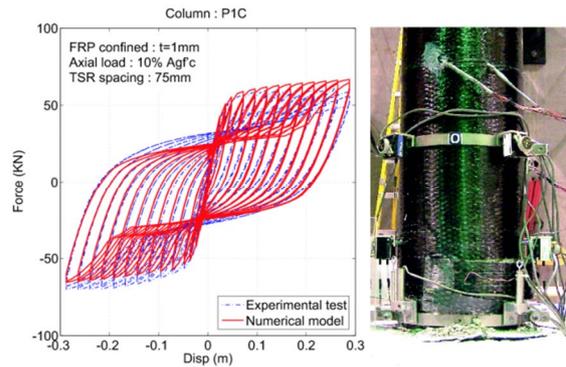
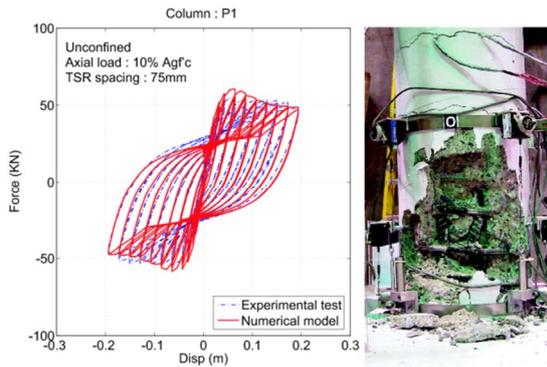


Figure 10. Modélisation numériques des poteaux testés sous chargement cyclique : (gauche) Maillage du poteau et (droite) Discretisation de la section multifibre.

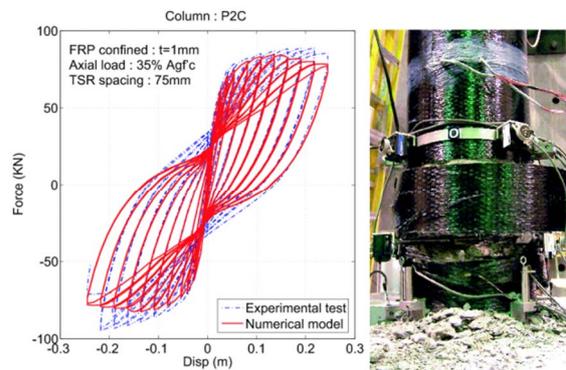
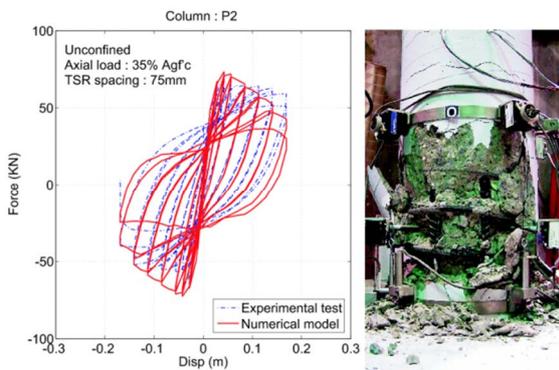
3.2.2. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

L'accroissement significatif en résistance et en ductilité produit par le confinement est nettement représenté par le modèle CMCC. Comme le montrent les figures 11-1 à 11-8, 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 CMCC) et non confiné (modèle La Borderie) est montrée dans la figure 12.



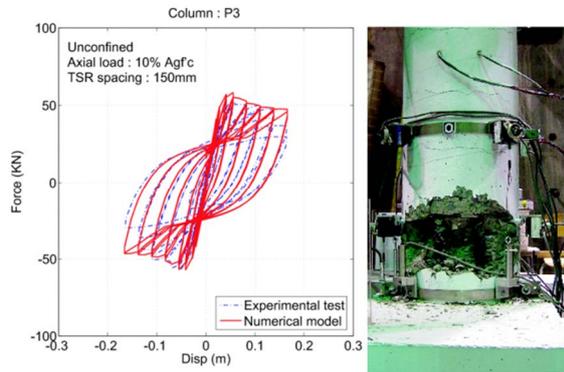
1) Sans TFC – Charge 10% de la capacité portante - Espacement des cadres 75mm.

2) Avec TFC – Charge 10% de la capacité portante - Espacement des cadres 75mm.

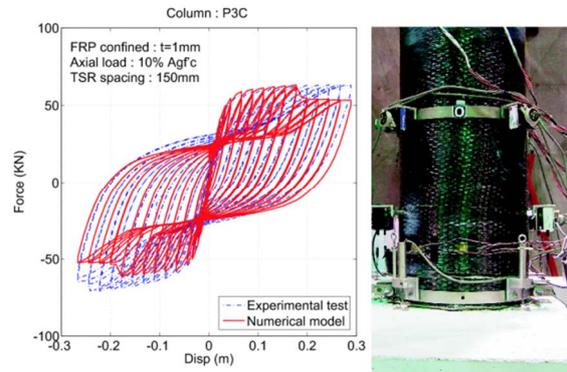


3) Sans TFC – Charge 35% de la capacité portante - Espacement des cadres 75mm.

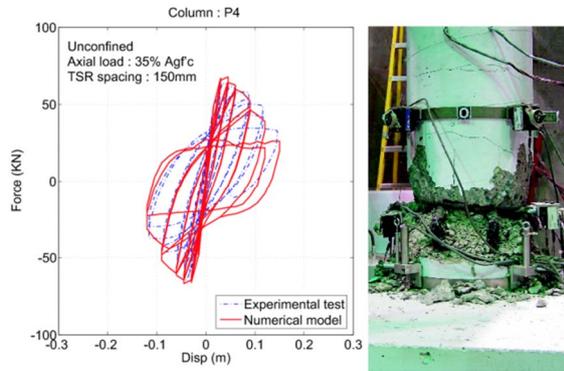
4) Avec TFC – Charge 35% de la capacité portante – Espacement des cadres 75mm.



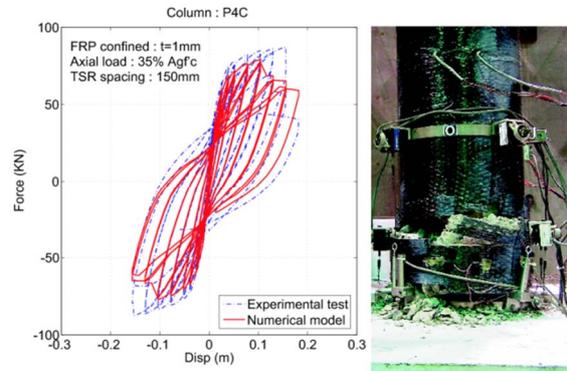
5) Sans TFC – Charge 10% de la capacité portante - Espacement des cadres 150mm.



6) Avec TFC – Charge 10% de la capacité portante - Espacement des cadres 150mm.



7) Sans TFC – Charge 35% de la capacité portante - Espacement des cadres 150mm.



8) Avec TFC – Charge 35% de la capacité portante - Espacement des cadres 75mm.

Figure 11. Poteaux confinés et non confinés sous sollicitation cycliques - Force en pied Vs Déplacement en tête

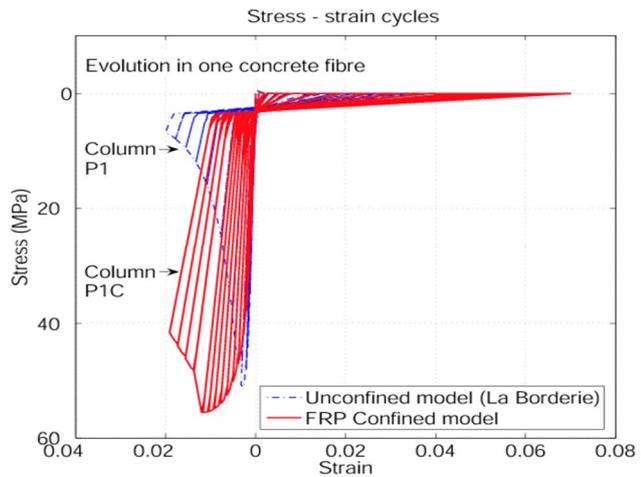


Figure 12. Poteau non confiné (P1) et poteau confiné (P1C) - Comportement numérique dans une fibre de béton.

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 et 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.

5. Remerciements

Ce travail a été effectué dans le cadre de l'ANR ARVISE, Projet ANR-2006-PGCU-007-01.

Patrick Paultre et l'équipe du CRGP de l'université de Sherbrooke sont vivement remerciés pour leur accueil.

Le programme Explora/doc est vivement remercié pour sa contribution aux échanges avec l'U.Sherbrooke.

6. Bibliographie

- Desprez C. Analyse et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes : renforcement par collage de tissus de fibres de carbone (TFC). Thèse de doctorat, Inp Grenoble, 2010, (<http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00560438/fr/>).
- Eid R. and Paultre P. "Analytical model for FRP-confined circular reinforced concrete columns", *Journal of Composites for Construction*, 12(5), 541–552, 2008.
- Filippou F. and Constandines M. Fedaslab getting started guide and simulations examples. Dpt of civil and env. Engng. UC Berkeley, 2004.
- Guedes J. Pégon, P. et Pinto, A. 1994. A fibre Timoshenko beam element in CASTEM 2000, Special publication nr. i.94.31. Technical report, J.R.C, I-21020, Ispra, Italy. 1994.
- Kotronis P. Cisaillement dynamique de murs en béton armé. Modèles simplifiés 2D et 3D. Thèse de doctorat ENS Cachan, 2000 (<http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00074469/fr/>).
- Kotronis P. and Mazars J. "Simplified modelling strategies to simulate the dynamic behavior of R/C walls", *Journal of Earthquake Engineering*, 9(2), 285–306, 2005.
- 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.
- 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.
- 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.
- Légeron F., Paultre P., and Mazars J., "Damage Mechanics Modeling of Nonlinear Seismic Behavior of Concrete Structures", *Journal of Structural Engineering*, 131, 946 (2005).
- 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.
- Menegotto M. and Pinto P. Method of analysis of cyclically loaded reinforced concrete plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending, IABSE Symposium on resistance and ultimate deformability of structures acted on by well-defined repeated loads, final report, Lisbon, 1973.
- Trudeau M.B. Comportement en flexion composée de poteaux circulaires en béton armé confinés par des polymères renforcés de fibre de carbone (PRFC), Mémoire de Maîtrise, Centre de Recherche en Génie Parasismique et en Dynamique des Structures (CRGP), Université de Sherbrooke. 2009.