

Analyse et Réduction de la Vulnérabilité Sismique des Structures Existantes en béton armé:

Renforcement par Collage de Tissus de Fibre de Carbone (TFC).

Thèse de doctorat soutenue par : Cédric Desprez

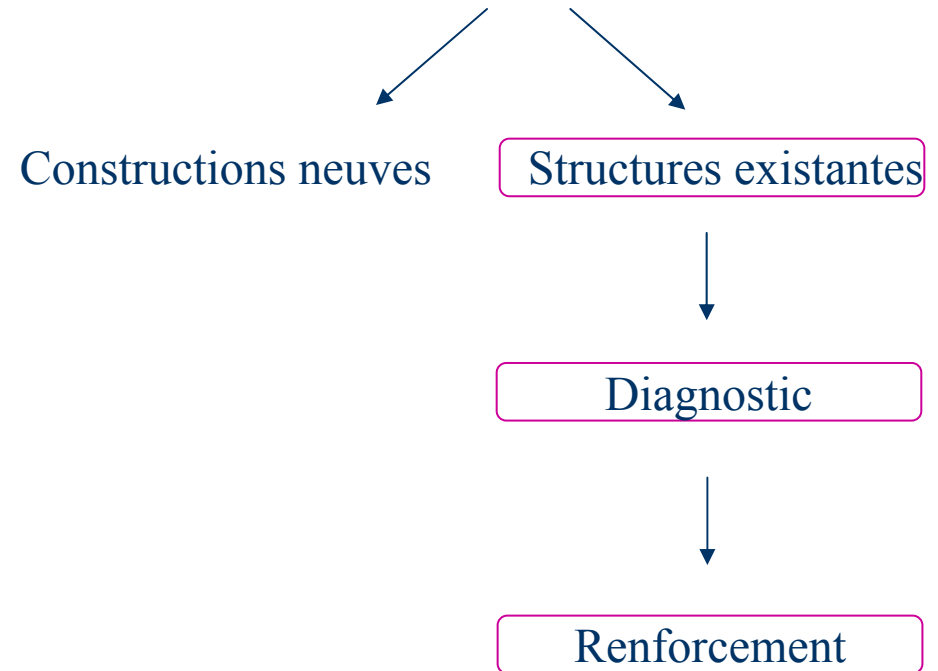
Encadrée par : Jacky Mazars
et Panagiotis Kotronis

Risque sismique et vulnérabilité des structures



*21 mai 2003 (6,7 échelle de Richter)
Régions de Boumerdès et d'Alger*

$$\text{Risque} = \text{Aléa} \times \text{Vulnérabilité} \times \text{Coût}$$



Programme ANR : ARVISE

Analyse et Réduction de la Vulnérabilité sismique des Structures Existantes



Analyse de la vulnérabilité

Réduction de la Vulnérabilité

Valorisation

Diagnostic des structures

Confortement

Outils et méthodes

Structures représentatives
du bâti Français

Rhône Alpes (Zone Ib)

Guadeloupe (Zone III)

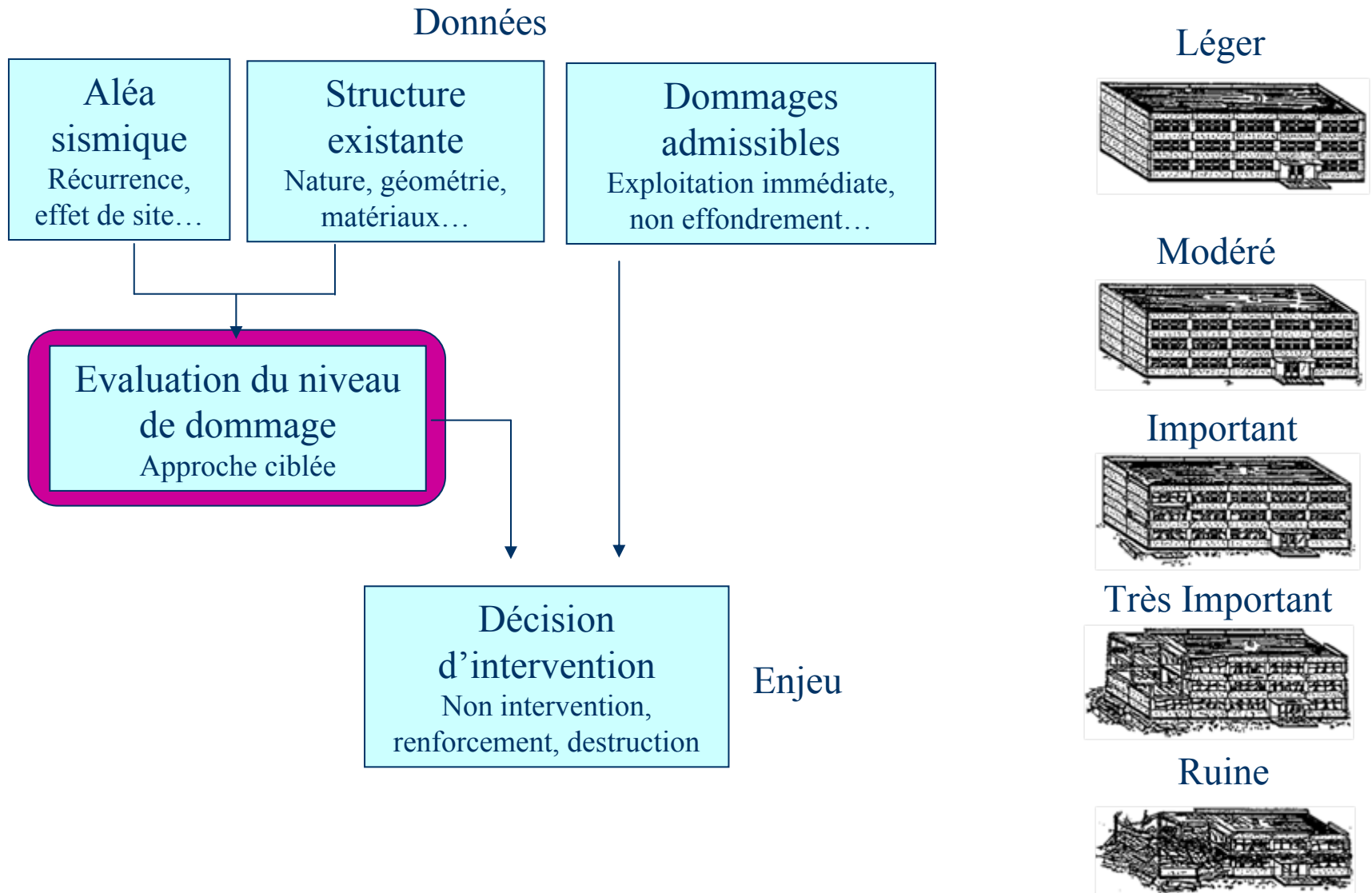
Approche d'ensemble

Approche ciblée

ANR Agence Nationale
de la Recherche



Contexte



Réduction de la vulnérabilité

Réduction de la demande



Isolateurs

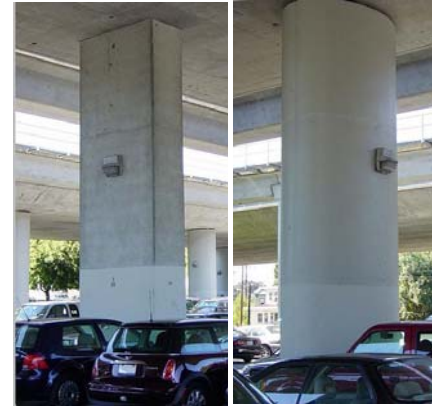


Amortisseurs



Masse mobile

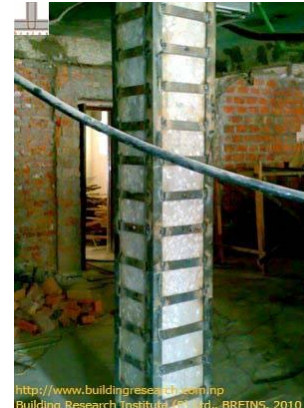
Augmentation de la capacité



Reprise d'éléments



Contreventement



<http://www.buildingresearch.com.np>
Building Research Institute, Ltd., BREINS, 2010



Reprise par matériau additionnel

Contexte

1. Stratégie d'analyse de la vulnérabilité

2. Stratégie de modélisation du renforcement par TFC

3. Etude de cas : Evaluation et renforcement de l'Hôtel de Ville de Grenoble

Conclusions et perspectives

Contexte

1. Stratégie d'analyse de la vulnérabilité

2. Stratégie de modélisation du renforcement par TFC

3. Etude de cas : Evaluation et renforcement de l'Hôtel de Ville de Grenoble

Conclusions et perspectives



Evaluation de la vulnérabilité

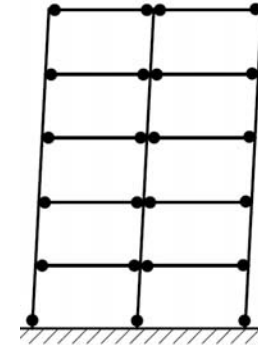
Approches ciblées

Evaluation mécanique
d'un ouvrage

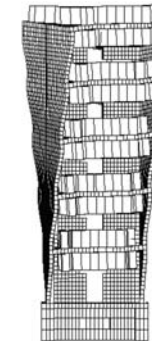


Outils de modélisation

Approche
globale



Approche
locale



(Ile & al, 2007)

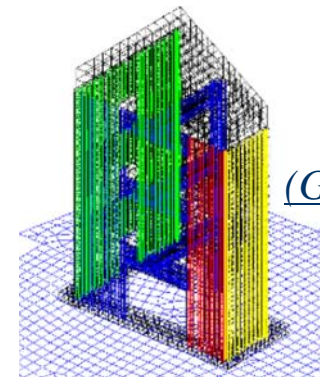
Principales Méthodes d'Analyse

Eurocode 8, UE 1998

RISKUE (LM2), UE, 2003

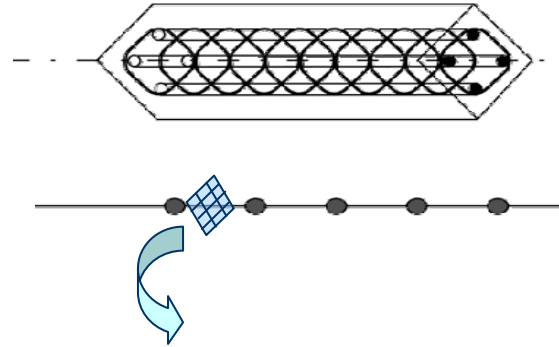
HAZUS (N2 et 3), USA, 1999

Approche
multifibres

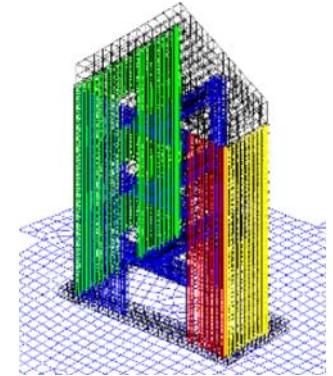


(Giry, 2009)

Eléments finis de type poutres multifibres



Modélisation 3D
simplifiée



Cinématiques Bernouilli ou Timoshenko (*Guedes & al 1994, Kotronis & al 2004*)
Adhérence parfaite entre les fibres

Codes de calcul

FEDEASLab : Toolbox de Matlab
(*Filippou & al 2004*)

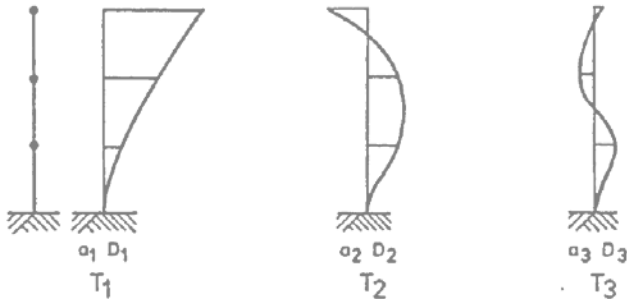
Cast3m : CEA
(*Combesure, 2000*)

Méthodes d'analyse

Analyse linéaire

Statique équivalente

Modale spectrale

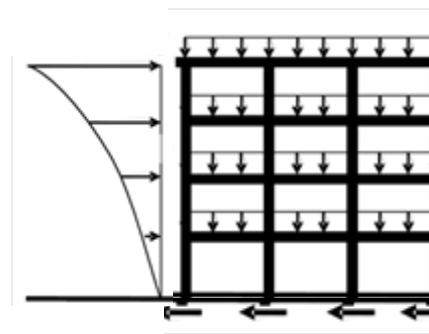


Non linéarité introduite par un coefficient de comportement : q

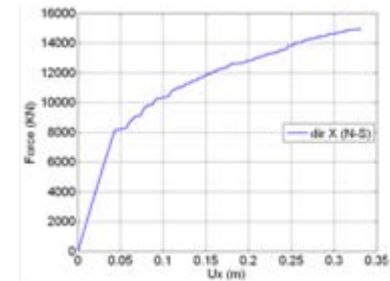
Mal adapté aux structures existantes

Analyse non linéaire

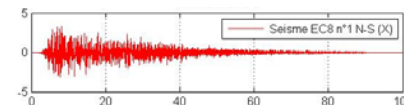
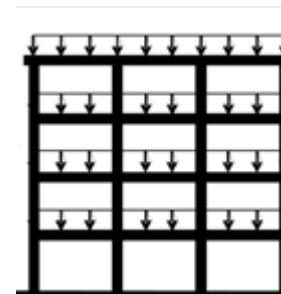
Statique par poussée progressive



Evolution force-déplacement



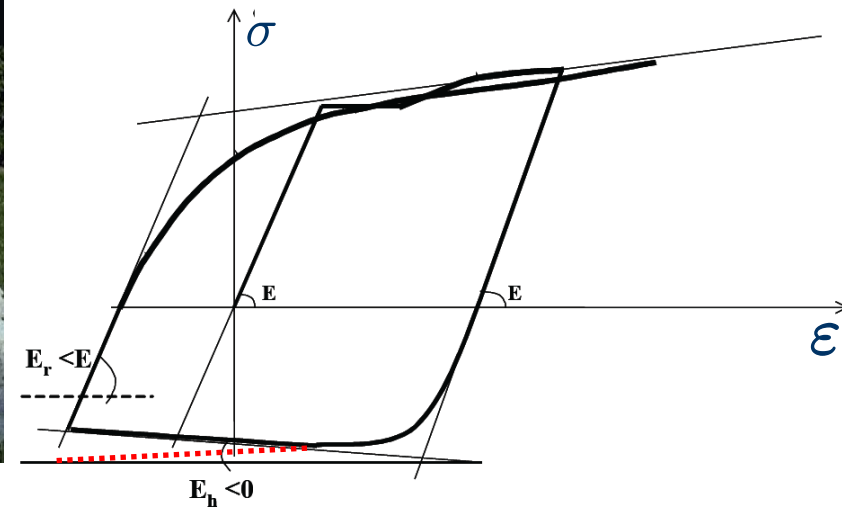
Dynamique



Acier d'armatures : Modèle de plasticité (Menegotto & al, 1973)

Ecrouissage cinématique

Flambement des armatures

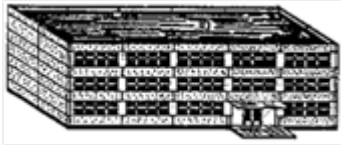


Paramètres		
Module d'Young	$E_a = 200 \text{ GPa}$	
Coefficient de Poisson	$\nu_s = 0.3$	
Limites d'élasticité	$\varepsilon_{sy} = 0.002$	$\sigma_{sy} = 400 \text{ Mpa}$
Début d'écrouissage	$\varepsilon_{sh} = 0.003$	
Limites de rupture	$\varepsilon_{suk} = 0.09$	$\sigma_{suk} = 460 \text{ MPa}$
Coefficients de comportement	$A1 = 18.5$	$A2 = 0.15$
	$A_{fac} = 0.006$	$A6_{fac} = 620$
	$\rho_{fac} = 20$	
Rapport de la rigidité d'écrouissage cyclique sur la rigidité élastique	$B_{fac} = 0.00357$	$C_{fac} = 0.5$
Rapport de l'espacement des cadres sur le diamètre de la barre	$f_{ald} = 5$	

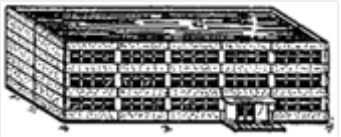
Qualification du niveau de dommage

Echelle de dommage EMS-98

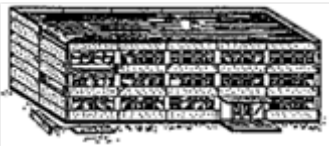
Léger



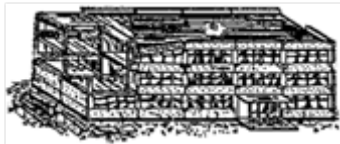
Modéré



Important



Très Important



Ruine



(*RISK-UE (LM2), 2003*)

(*HAZUS, 1999*)

(*Lang, 2002*)

Indicateurs globaux

Déplacement en tête

Drift $\left[\frac{\text{Déplacement plancher } i_{+1} - \text{Déplacement plancher } i}{\text{hauteur étage}} \right]$

Résistance latérale de l'ouvrage

Réserve de capacité

Indicateurs locaux

Courbure, rotation d'un élément

Efforts internes

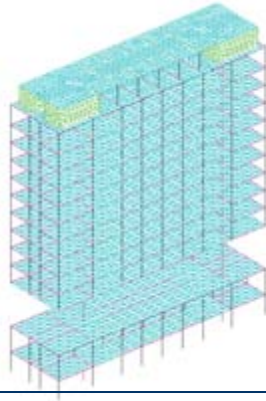
Déformations

Variables d'endommagement

Prise en compte du TFC



Outils de modélisation
Méthode d'analyse



Renforcement par TFC



Objectif : évaluation avant et après confortement de la structure

Contexte

1. Stratégie d'analyse de la vulnérabilité

2. Stratégie de modélisation du renforcement par TFC

3. Etude de cas : Evaluation et renforcement de l'Hôtel de Ville de Grenoble

Conclusions et perspectives

Renforcement axial

Les fibres sont orientées **axialement**



Confinement de poteaux

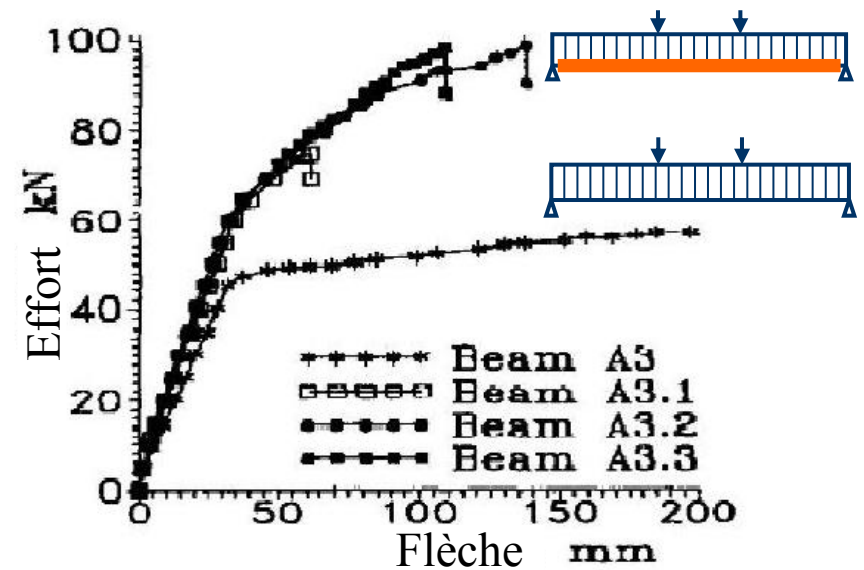
Les fibres sont **orientées circonférentiellement**



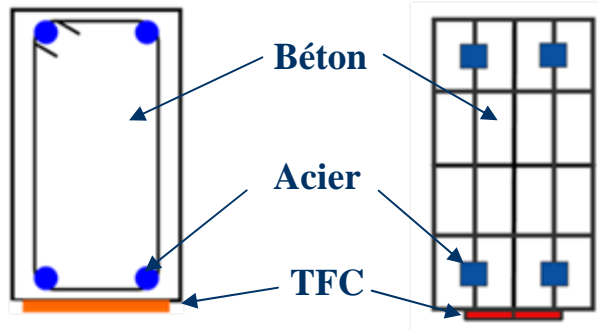
Renforcement axial



Effet du TFC (*Spadea & al, 1998*)



Modélisation



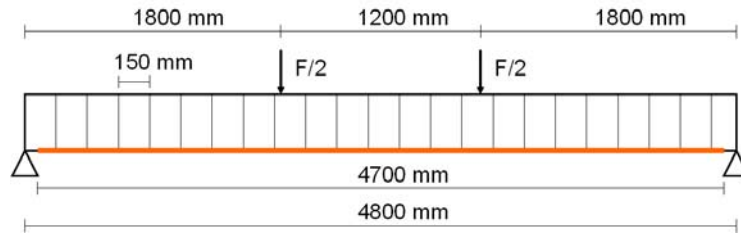
TFC : Elastique linéaire fragile

E (Gpa)	Limite élastique (Mpa)	Rupture (Mpa)	Allongement à rupture (%)
152	2300	2300	1.51

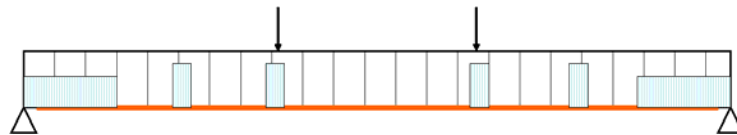
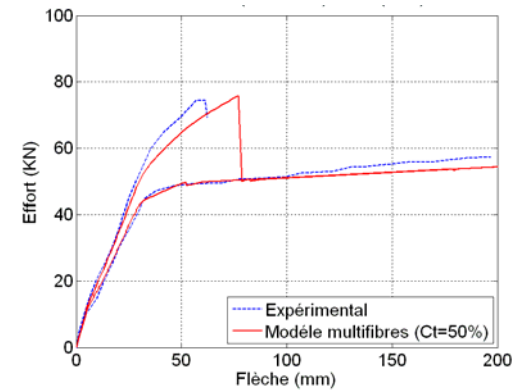
Prise en compte du délaminage : C
 $\epsilon_{\text{efficace}} = C \times \epsilon_{\text{ultime}}$

Essais expérimentaux Vs Analyse numérique

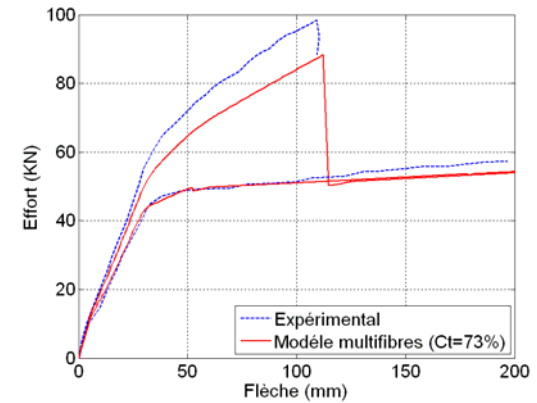
Essais de flexion 4 points (*Spadea & al, 1998*)



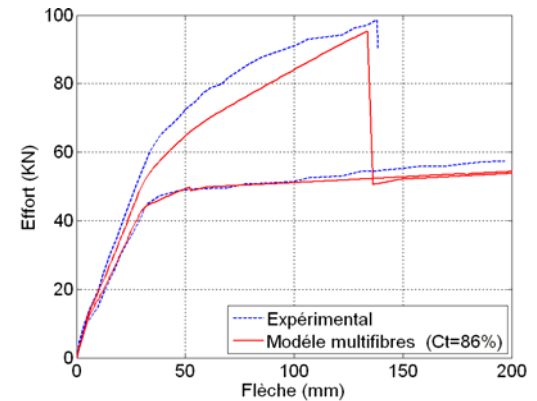
C=50%



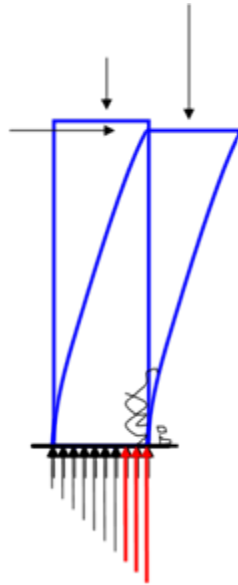
C=73%



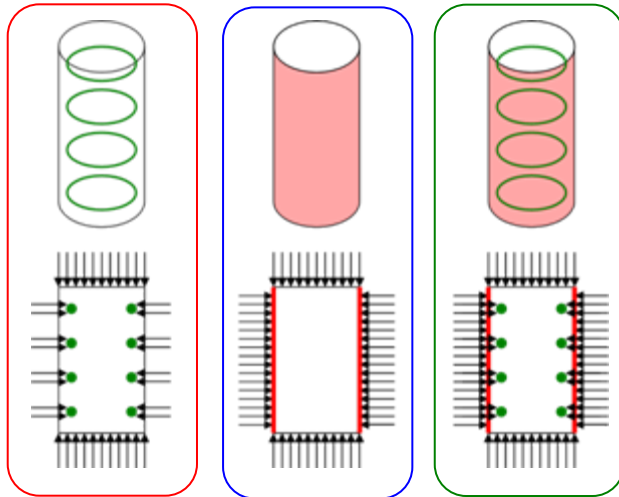
C=86%



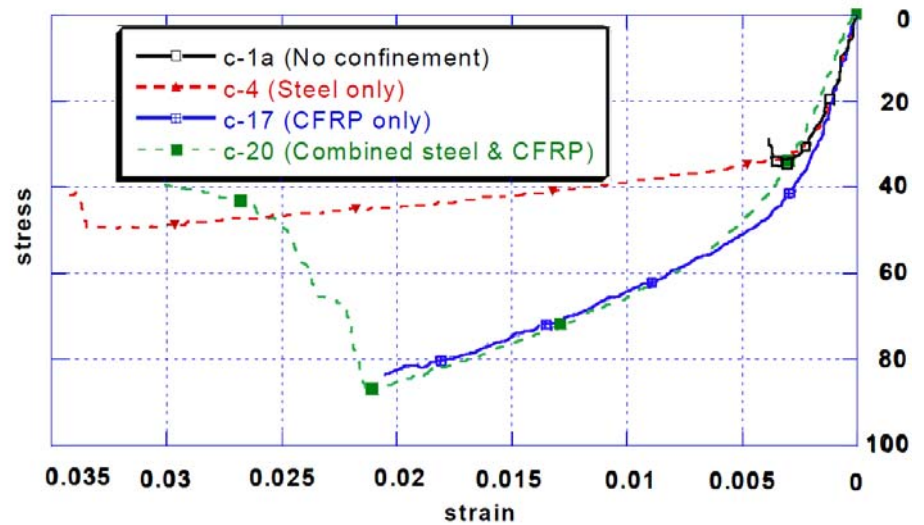
Confinement de poteaux par TFC



UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE



Effet du TFC (Ongpeng & al, 2003)



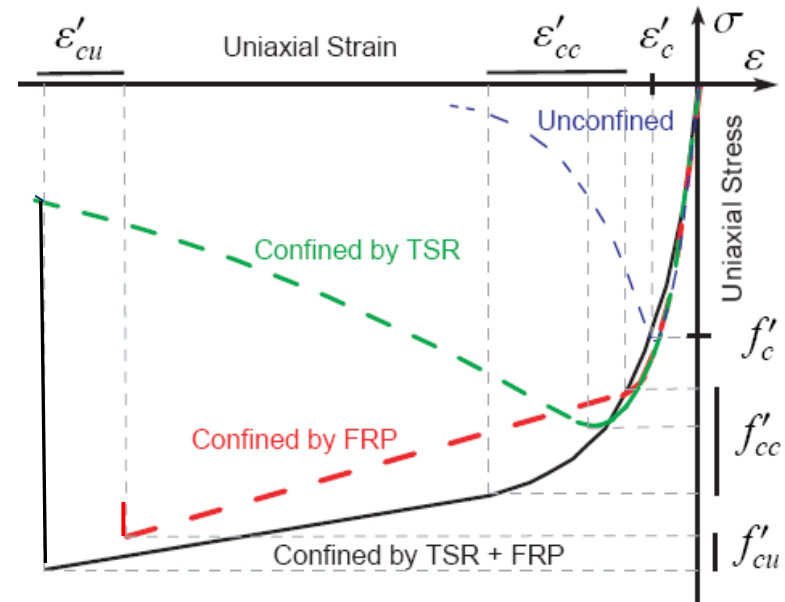
Béton confiné : modèle Eid & Paultre (Eid & Paultre, 2008)

- Modèle **prédictif** basé sur des études expérimentales (poteaux circulaires)
- Relation uniaxiale: $\sigma_c = f(\varepsilon_c)$

$$\sigma_c = \frac{a\varepsilon_c}{1 + b\varepsilon_c + z\varepsilon_c^2} \quad \text{Pré-pic}$$

$$\sigma_c = f'_{cc} \exp\left[k_1(\varepsilon_c - \varepsilon'_{cc})^{k_2}\right] + E_{cu}(\varepsilon_c - \varepsilon'_{cc}) \quad \text{Avant rupture TFC}$$

$$\sigma_c = f'_{cc,s} \exp\left[k_{1,s}(\varepsilon_c - \varepsilon'_{cc,s})^{k_{2,s}}\right] \quad \text{Après rupture TFC}$$



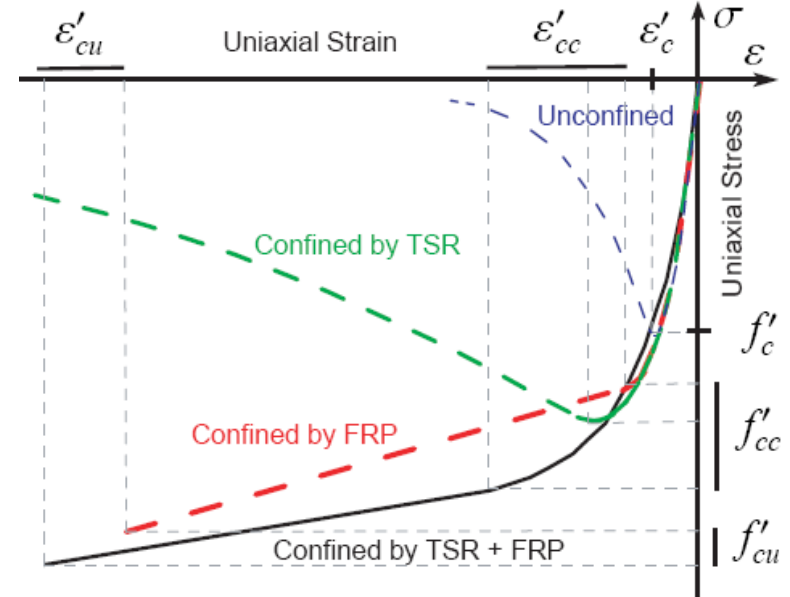
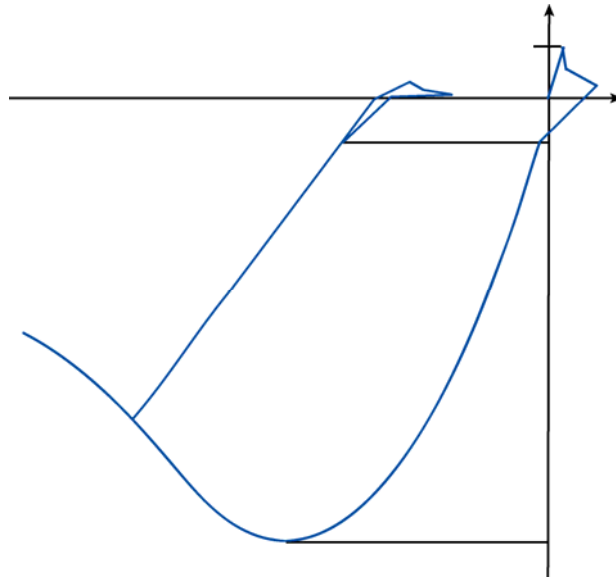
Diamètre extérieur du poteau	D	Épaisseur d'une couche de TFC	t_f
Enrobage du poteau	c	Module d'Young du TFC	E_f
Résistance au pic en compression du béton non confiné	f'_c	Contrainte de rupture en traction du TFC	f_{fu}
Déformation au pic du béton non confiné	ε'_c	Coefficient de performance du TFC	ε_{fu}
Déformation dans la partie post-pic pour une contrainte égale à 50% du pic	$\varepsilon_{c,50}$	Module d'Young de l'acier transversal	E_s
Module d'Young initial du béton	E	Contrainte de plastification de l'acier	F_{yh}
Coefficient de poisson du béton	v	Espacement des cadres	s
Nombre d'aciers longitudinaux	N_{sl}	Diamètre des cadres	ϕ_h
Diamètre des aciers longitudinaux	ϕ_l	Type de cadres (spiraales ou étriers)	1 ou 2

Construction d'un modèle cyclique de béton confiné

Construction d'un modèle basé sur : -le modèle cyclique La Borderie

(Desprez et al, 2009)

- le modèle Eid & Paultre pour béton confiné.



Modification de l'évolution en compression du modèle cyclique La Borderie afin de prendre en compte l'effet du confinement (modèle LMCC)

Expression du modèle La Borderie en compression

En compression uniaxiale :
(après refermeture des fissures)

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

D2 pilote l'évolution de
l'endommagement en
compression,

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

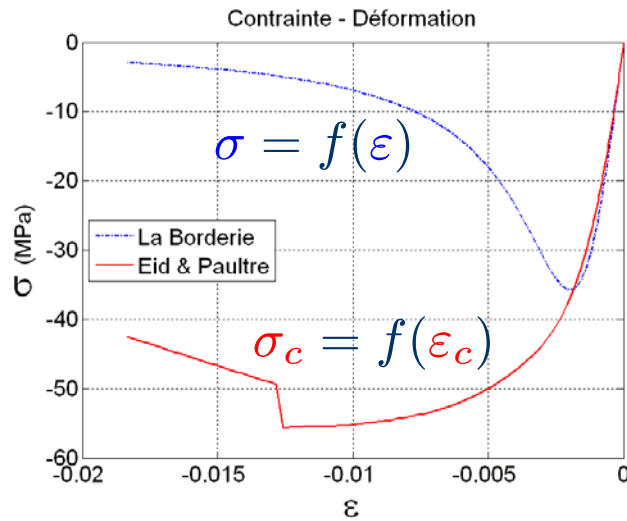
└ Constante de
comportement
anélastique

Conservation du comportement plastique lié aux déformations anélastiques (β_2)

Evolution de D2 en fonction
des contraintes et
déformations.

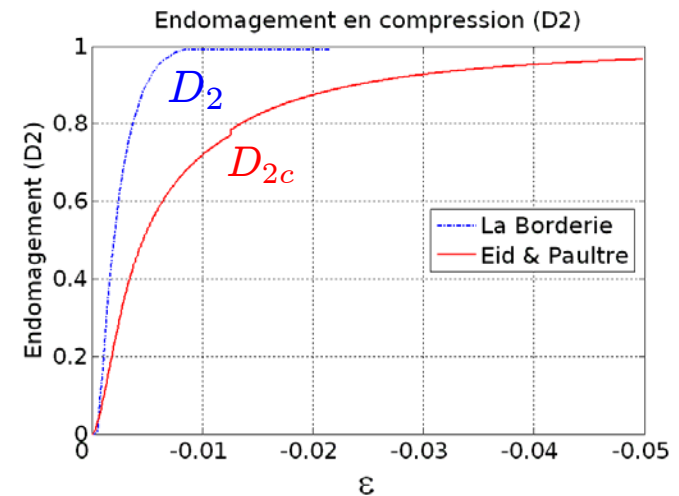
$$D_2 = \frac{E \cdot \varepsilon - \sigma}{E \cdot \varepsilon + \beta_2}$$

Evolution de D_2 en compression uniaxiale



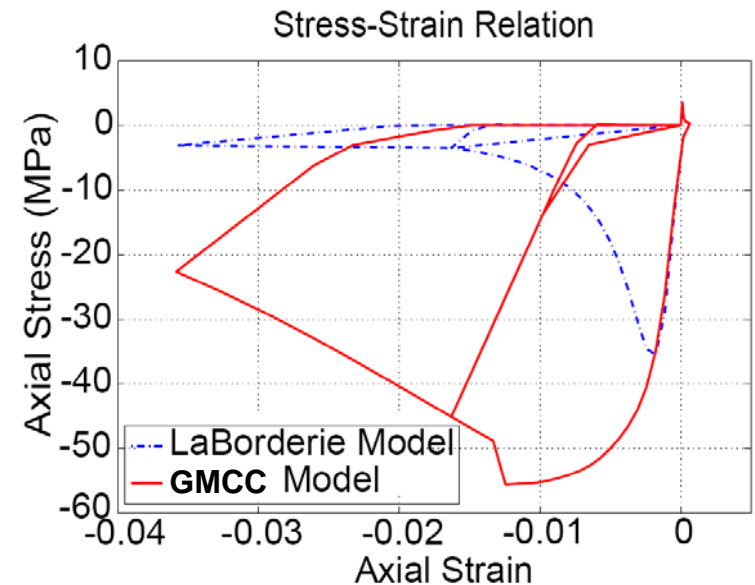
$$D_2 = \frac{E \cdot \varepsilon - \sigma}{E \cdot \varepsilon + \beta_2}$$

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



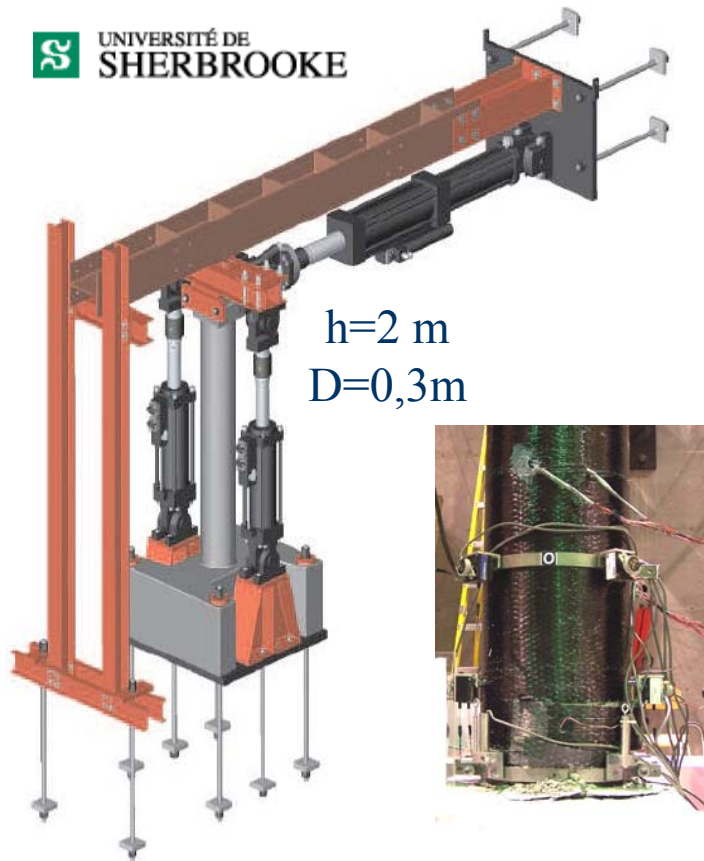
D_{2c} remplace D_2 dans le modèle unilatéral La Borderie.

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



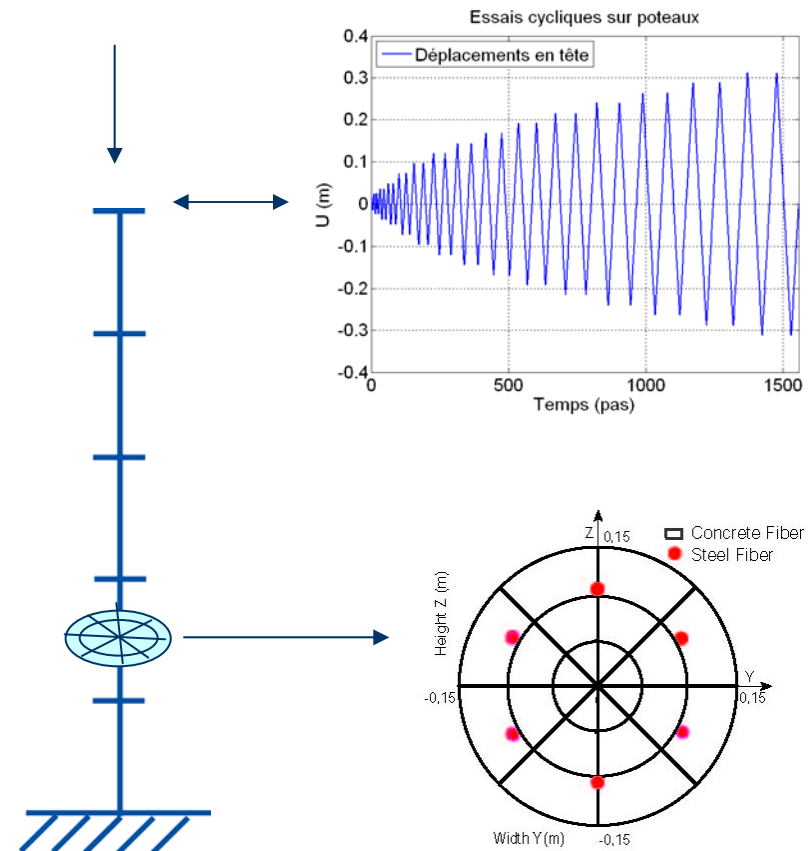
Validation expérimentale

Essais cycliques



(Trudeau & al, 2009)

Modélisation numérique

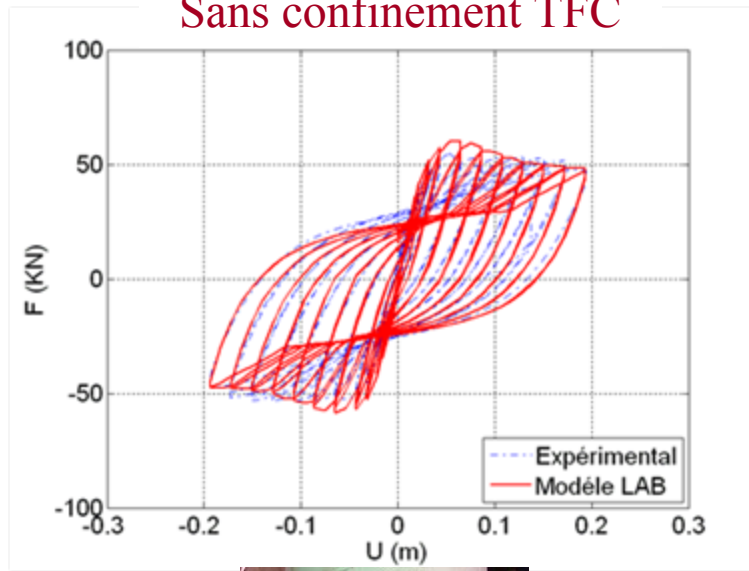


Essai prédictif

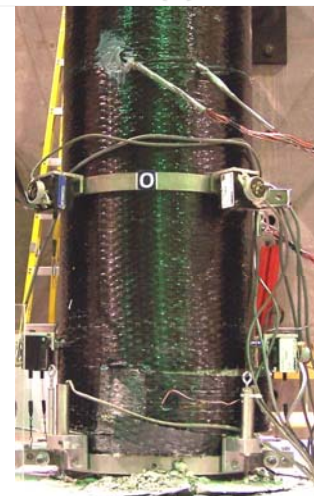
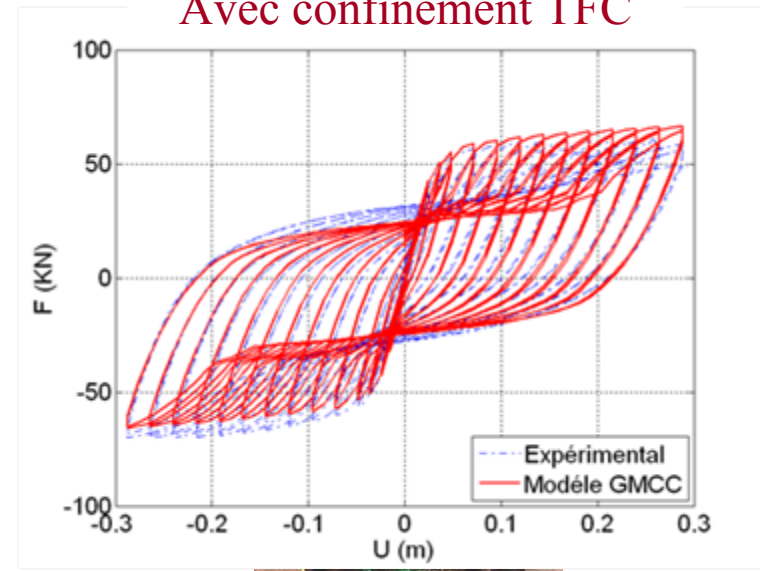
Validation expérimentale

Charge axiale = $10\% A_g \cdot f_c$

Sans confinement TFC



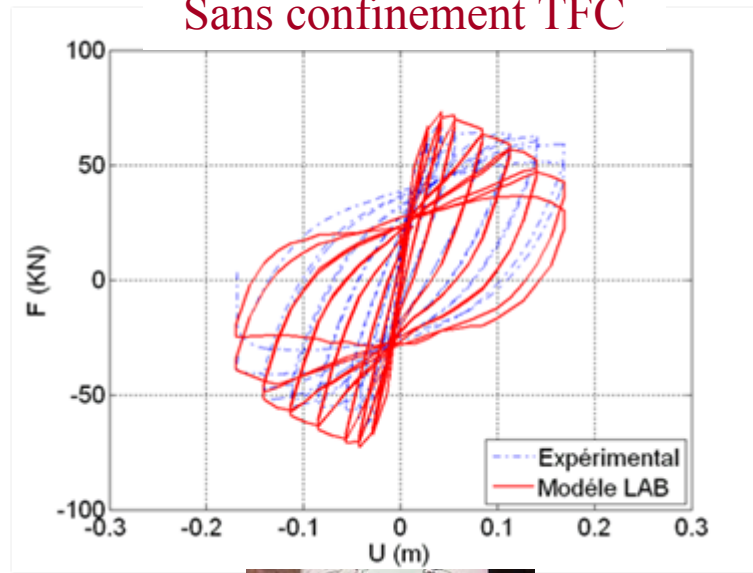
Avec confinement TFC



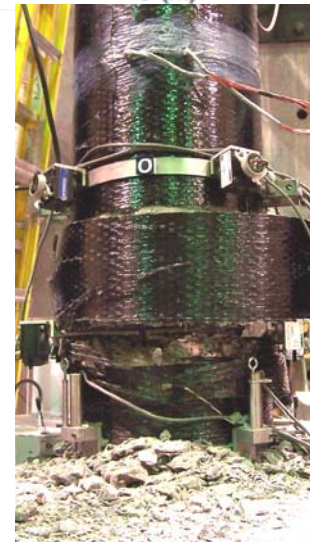
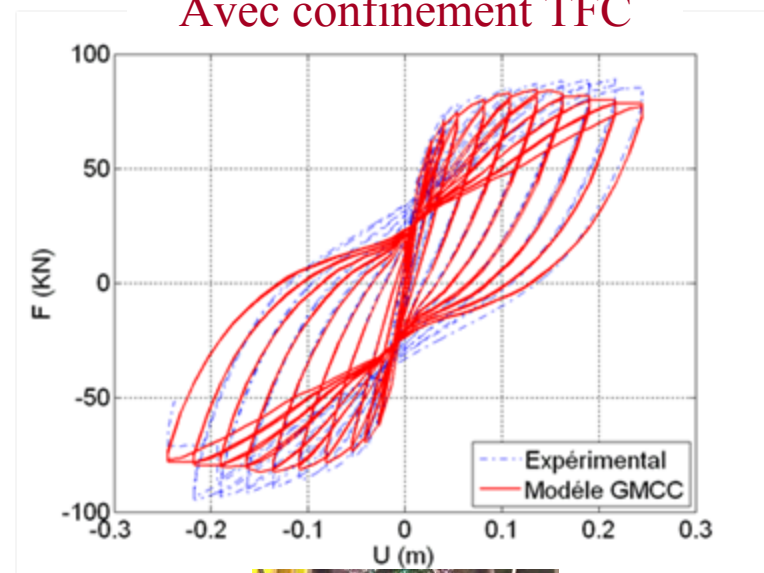
Validation expérimentale

Charge axiale = $35\% A_g \cdot f_c$

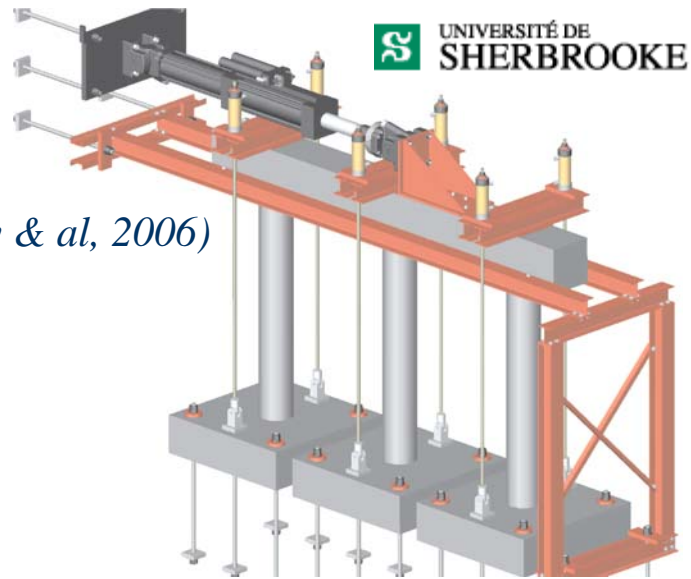
Sans confinement TFC



Avec confinement TFC



Renforcement d'une pile de pont



(Roy & al, 2006)

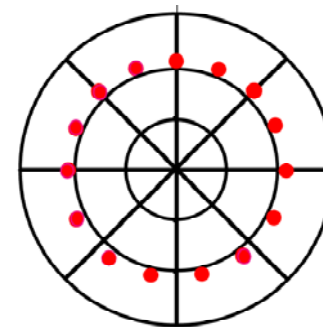
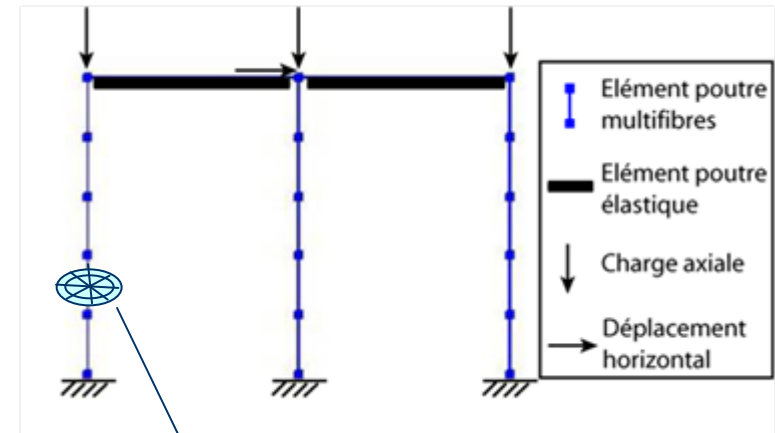


Confiné

Non-confiné

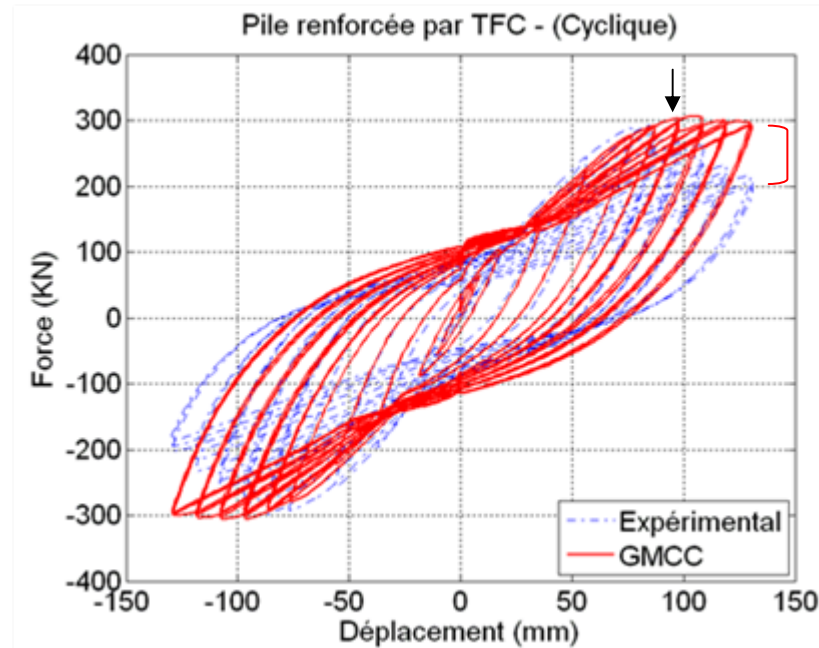
Confiné

Modélisation numérique



7 essais pseudo-dynamiques + 1 essai cyclique

Renforcement d'une pile de pont



Résultats expérimentaux
Vs

Simulation numérique

Hypothèses : rupture d'armatures par fatigue

Effet de la fatigue

Fatigue provoquée par les cycles de déformations

L'endommagement par fatigue est déterminé avec la théorie de Miner

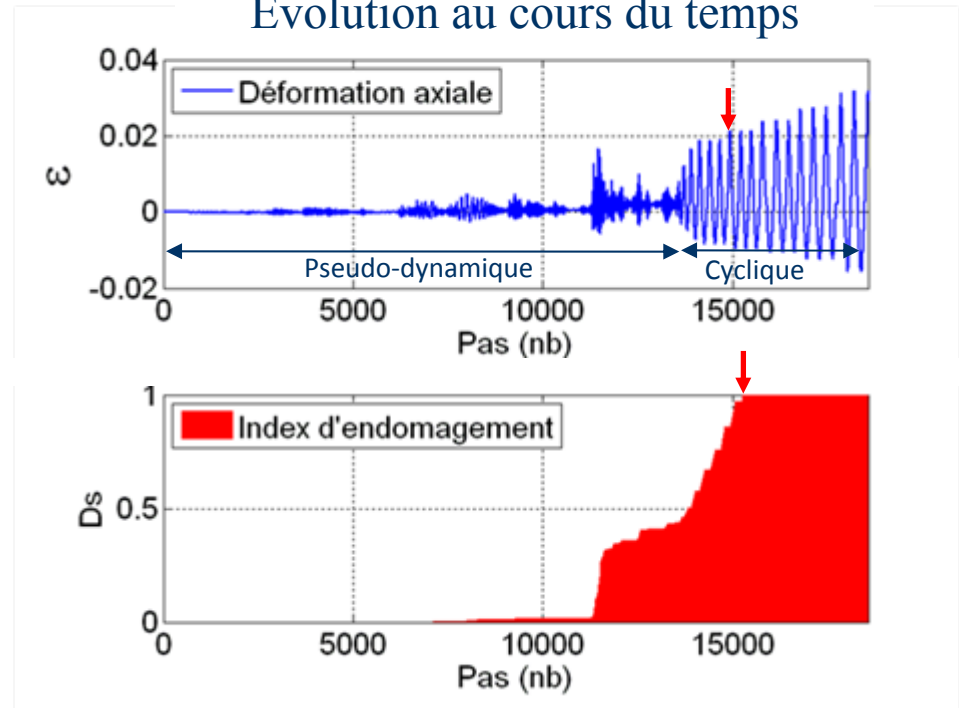
$$D_S = \sum_{i=1}^n D_{Si}$$

Domage au cours d'un cycle

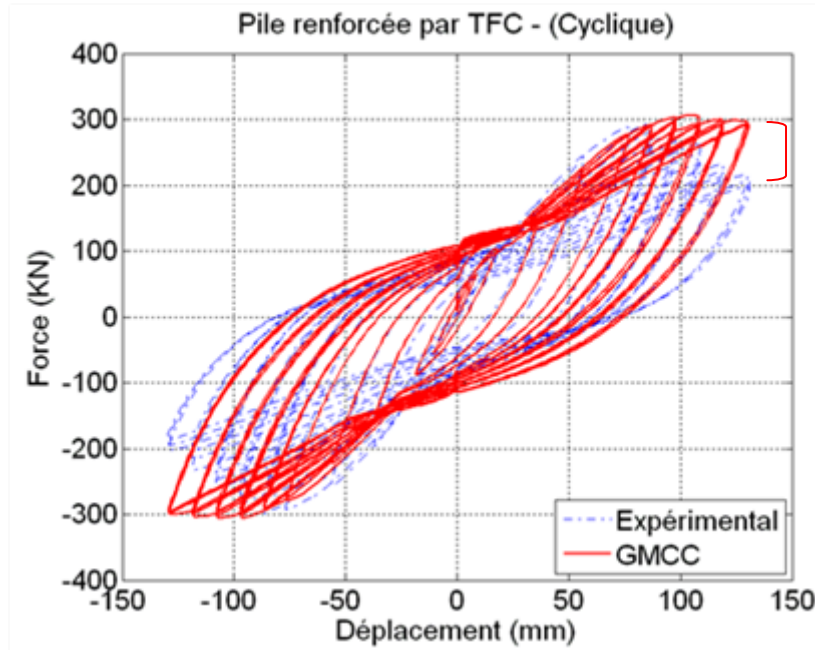
(absence d'endommagement en dessous d'un seuil)

(*Miner 1945, Coffin & Manson 1954*)

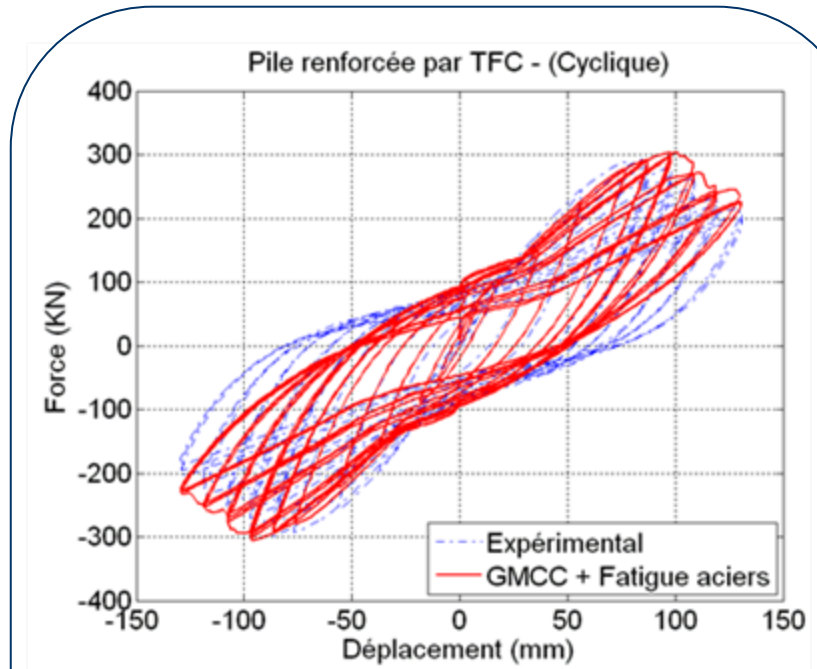
Evolution au cours du temps



Etude de cas n°1 : prise en compte de la fatigue



Sans effet de la fatigue



Avec effet de la fatigue

Contexte

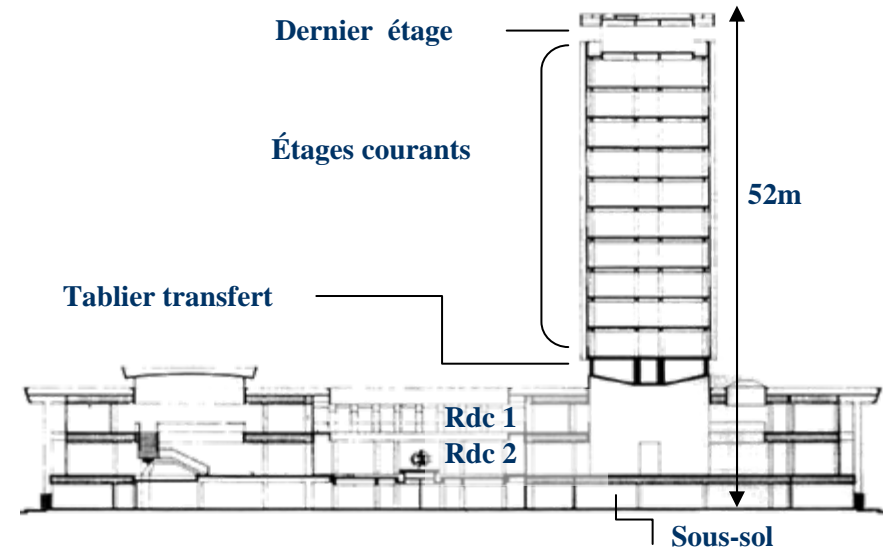
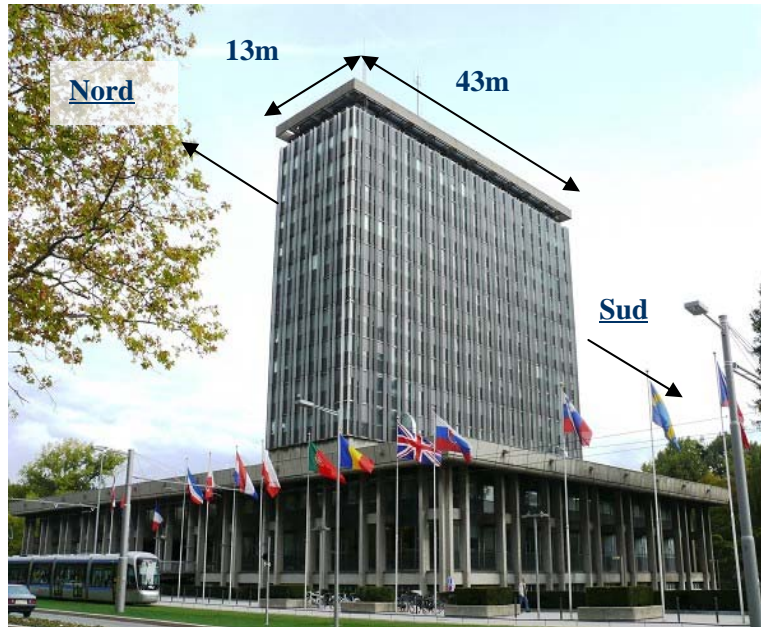
1. Stratégie d'analyse de la vulnérabilité

2. Stratégie de modélisation du renforcement par TFC

3. Etude de cas : Evaluation et renforcement de l'Hôtel de Ville de Grenoble

Conclusions et perspectives

Présentation de la structure

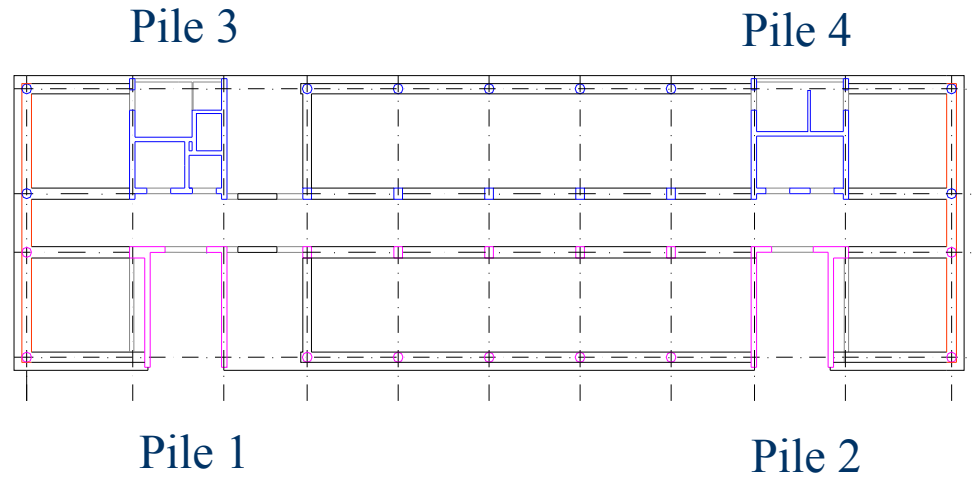


Instrumentation
Permanente
(LGIT)

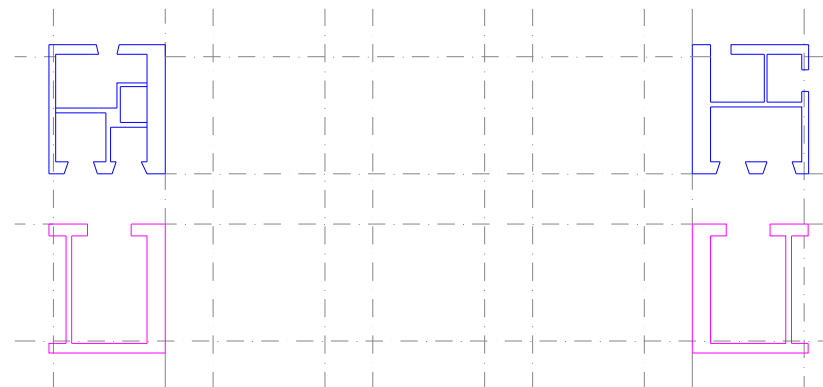
RAP



Présentation de la structure

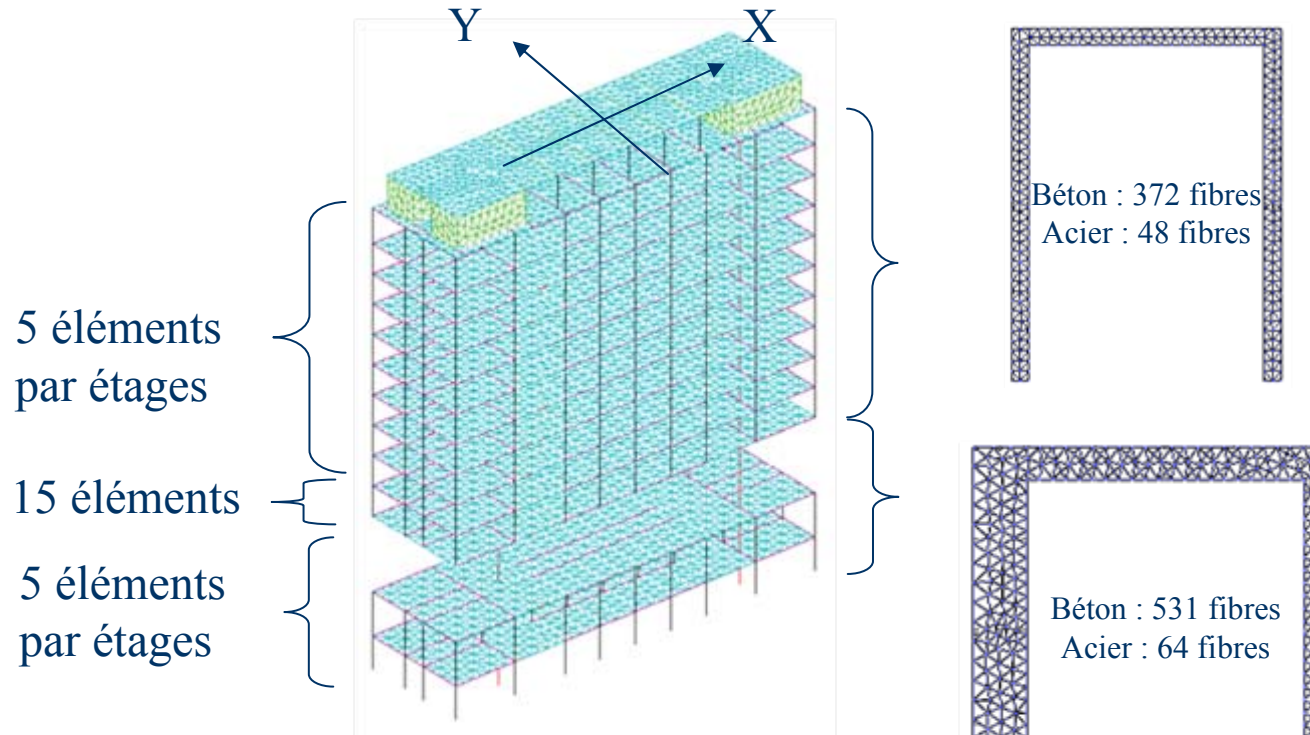


*Étage
courant*



*Rez de
chaussée*

Discretisation spatiale (Cast3m)



Conditions d'appuis :
Encastrement

18808 éléments
4658 éléments non linéaires
58848 ddl.

Paramètres matériaux

Paramètres	Traction	Compression
Module d'Young	$E_b = 32 \text{ GPa}$	
Coefficient de Poisson	$\nu_b = 0.2$	
Contrainte de refermetures des fissures	$\sigma_f = -3 \text{ MPa}$	
Seuils en énergie	$Y01 = 2,70 \cdot 10^{-4} \text{ MPa}$	$Y02 = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ MPa}$
Coefficients de comportement	$A1 = 3 \cdot 10^{-3}$	$A2 = 7 \cdot 10^{-6}$
	$B1 = 1.0$	$B2 = 1.45$
Gestion des déformations inélastiques	$\beta1 = 1.075 \text{ MPa}$	$\beta2 = -40 \text{ MPa}$

Paramètres		
Module d'Young	$E_\alpha = 200 \text{ GPa}$	
Coefficient de Poisson	$\nu_s = 0.3$	
Limites d'élasticité	$\varepsilon_{sy} = 0.002$	$\sigma_{sy} = 400 \text{ MPa}$
Début d'écrouissage	$\varepsilon_{sh} = 0.003$	
Limites de rupture	$\varepsilon_{su} = 0.09$	$\sigma_{su} = 460 \text{ MPa}$
Coefficients de comportement	$A1 = 18.5$	$A2 = 0.15$
	$A_{fac} = 0.006$	$A6_{fac} = 620$
	$\rho_{fac} = 20$	
Rapport de la rigidité d'écrouissage cyclique sur la rigidité élastique	$B_{fac} = 0.00357$	$C_{fac} = 0.5$
Rapport de l'espacement des cadres sur le diamètre de la barre	$f_{ald} = 5$	

Validation du modèle numérique

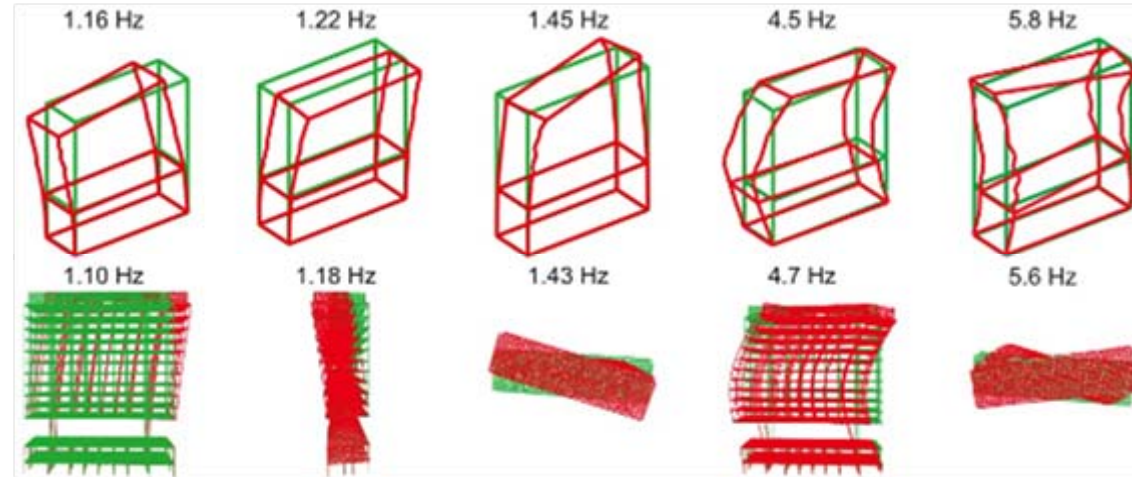
Mesures de vibrations ambiantes (LGIT)

(Michel & al, 2007, 2009)

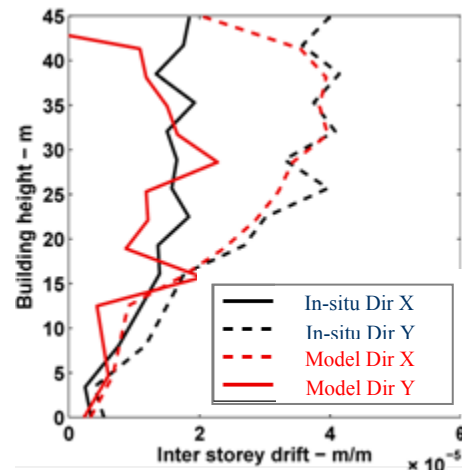
In-situ

Fréquences propres

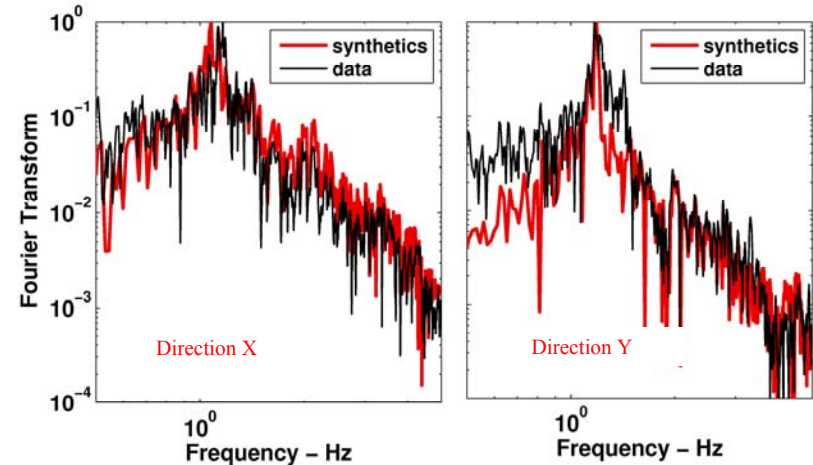
Modèle



Drift



Comportement fréquentiel

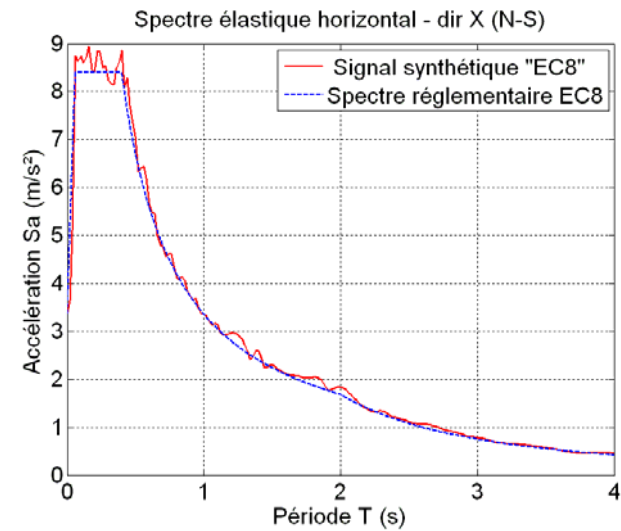
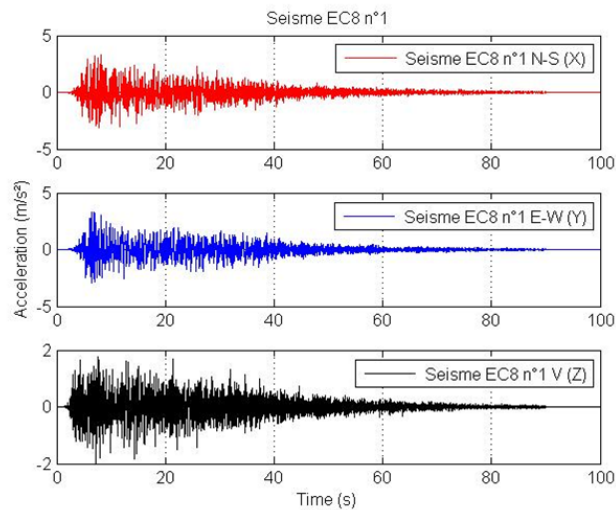


Comportement sous séisme faible

(El Arem & al, 2010)

Analyse dynamique non linéaire : séisme EC8

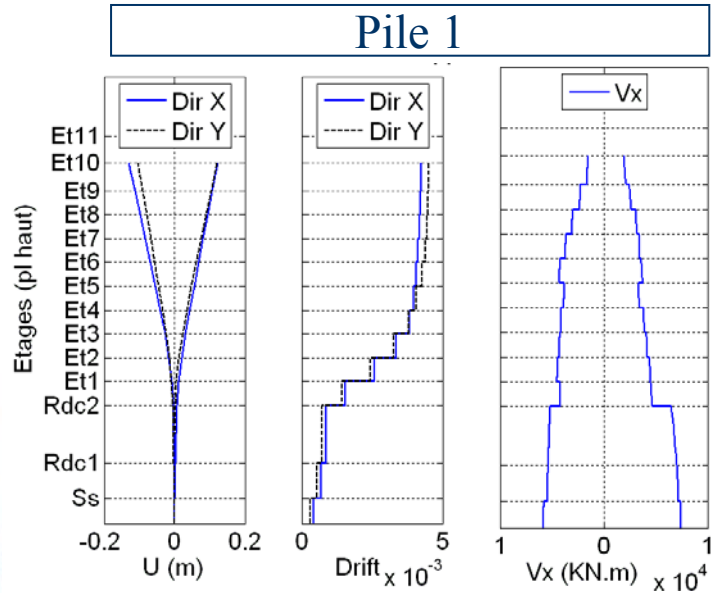
Séisme artificiel tri-directionnel respectant le spectre EC8 (LGIT).



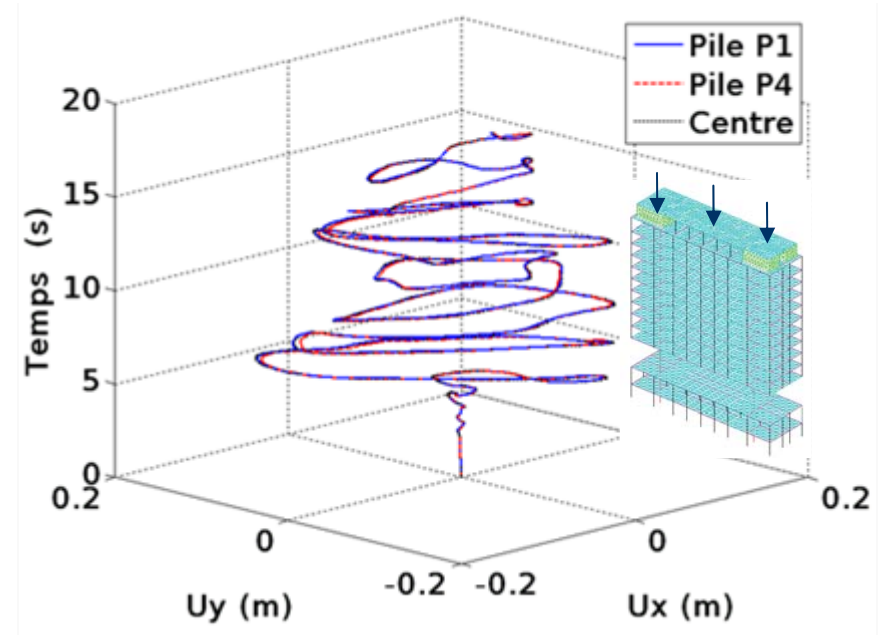
Spectres réglementaire EC8

Coût de calcul : 1 semaine pour 20 s de signal
(échantillonné à 0,01s)

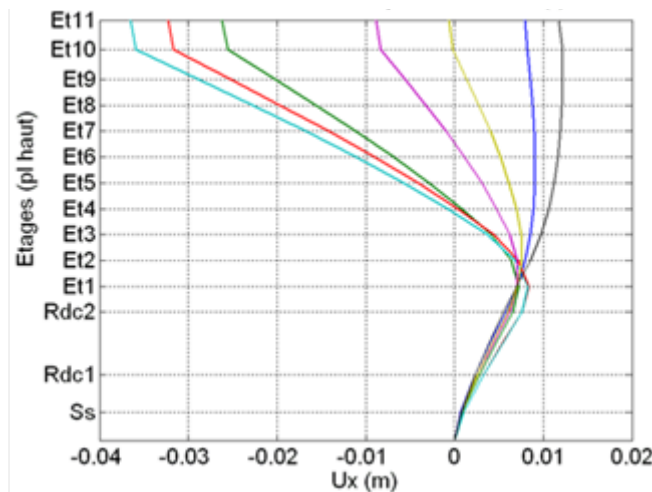
Comportement dynamique de la structure



Déplacements relatifs de 3 points au sommet



Evolution des déformées



Comportement de flexion

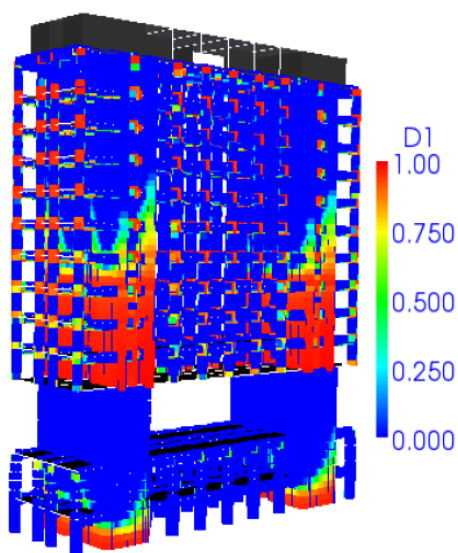
Absence de torsion

Effort tranchant non préjudiciable

Indicateurs de dommages locaux (échelle des fibres)

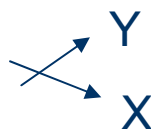
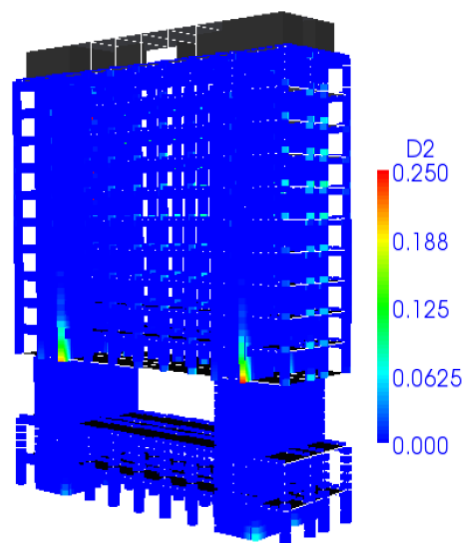
Endommagement du
béton en **traction**

D1 max = 1



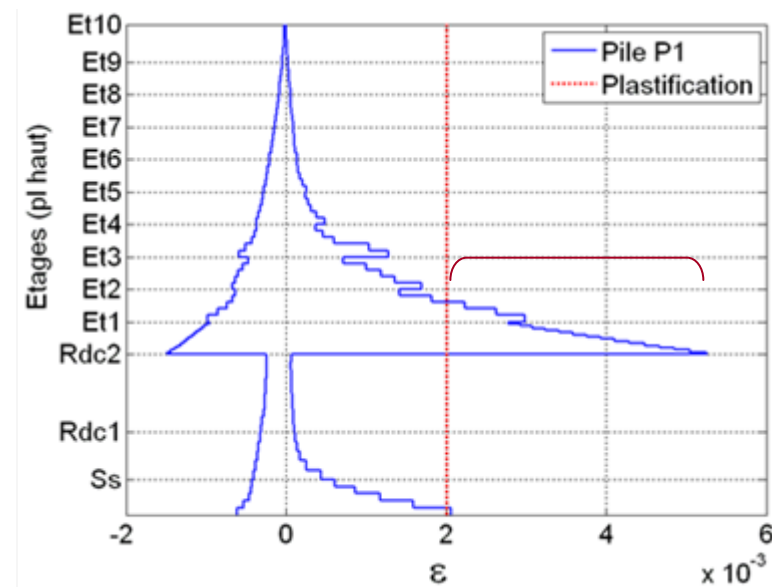
Endommagement du
béton en **compression**

D2 max = 0.25



Déformations des
armatures métalliques

$\epsilon_{\max} = 5,2 \cdot 10^{-3}$



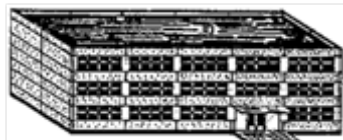
(courbe enveloppe)

Variables d'endommagement : modèle La Borderie

Plastification des
armatures dans les piles

Qualification du niveau de dommage

Léger



Modéré



Important



Très Important



Ruine



Analogie EMS-98 : Définition structurelle (Lang, 2002)
(classification européenne)

Fissuration en traction du béton

Plastification des armatures ($\epsilon_{\max} = 5,2 \cdot 10^{-3}$)

Absence de dommages en compression du béton

Souhait de ne pas dépasser un état de dommage Léger :

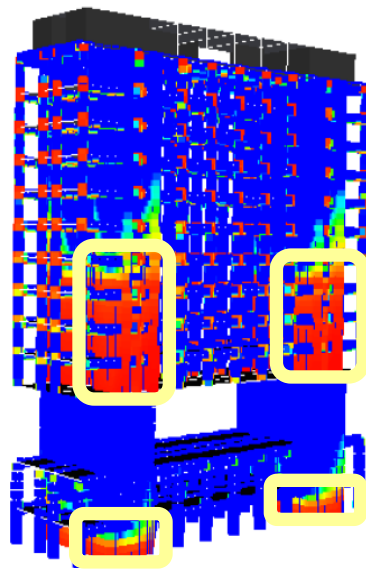
Confortement à effectuer afin d'éviter la plastification :

Renforcement par collage de TFC

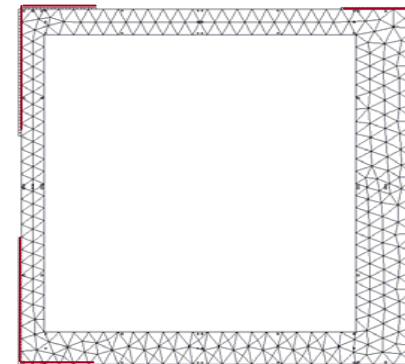
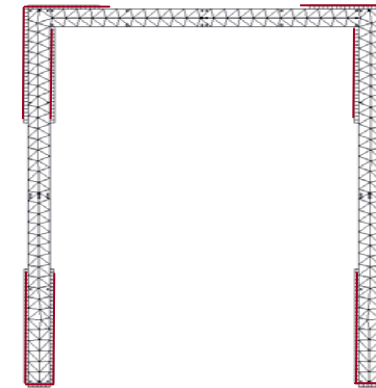


Confortement de l'HDV

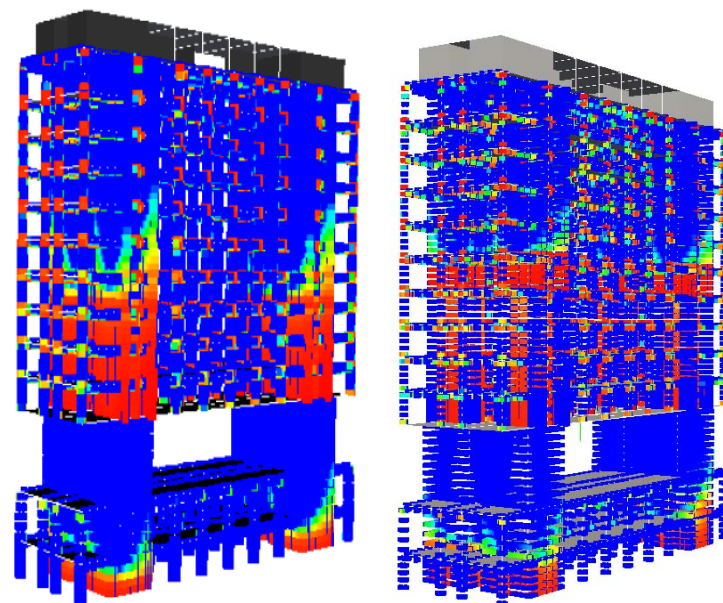
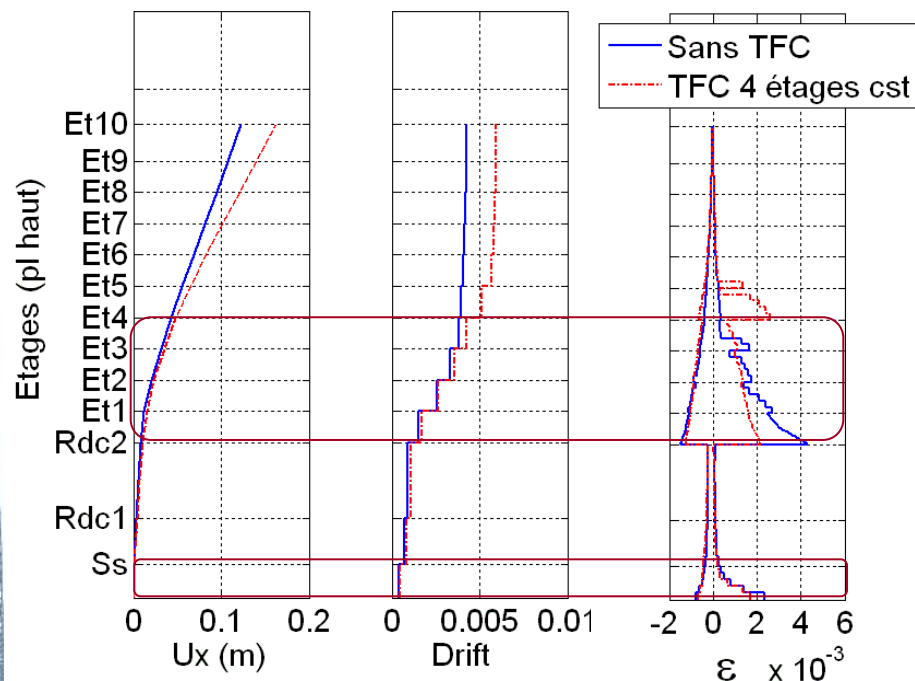
Renforcement axial des piles



Epaisseur constante 6mm



Analyse dynamique : Influence du TFC



Diminution des déformations

Le TFC reste peu sollicité ($\epsilon_{\max} < 3 \cdot 10^{-3}$)

Formation de nouvelles zones sensibles

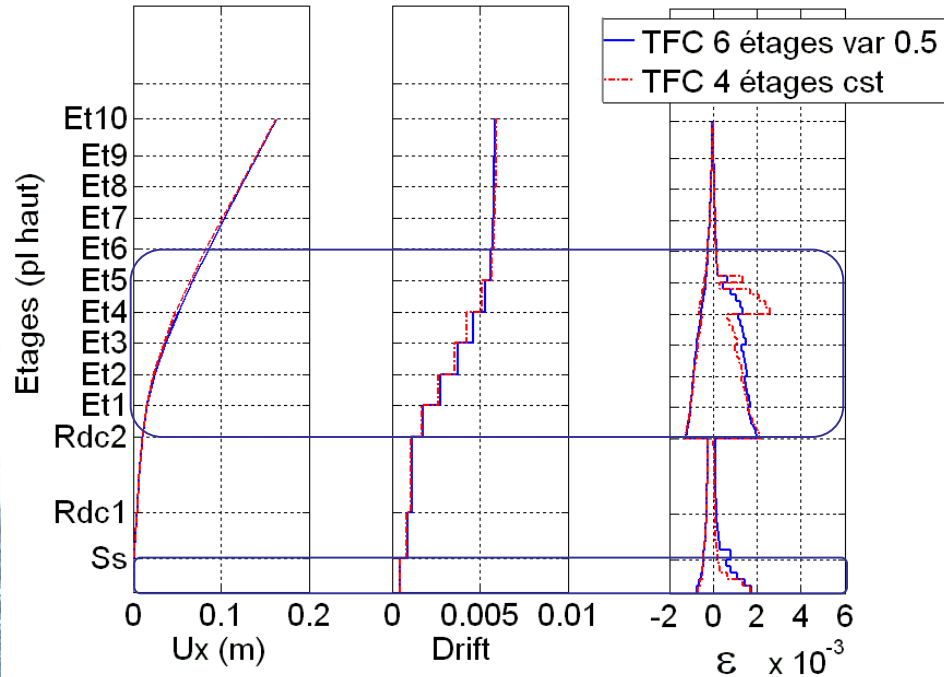
Augmentation des efforts et déplacements

Modéré



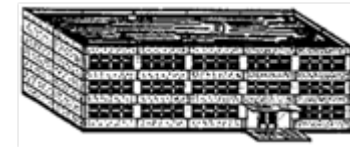
Objectif non atteint :
Optimisation du renforcement

Analyse dynamique : Influence du TFC



Renforcement dégressif sur 6 étages

Léger



Objectif atteint

Analyse dynamique non linéaire : Apports et limites

Peu d'hypothèses sur le fonctionnement de l'ouvrage

Analyse très détaillée

Peu utilisée en bureau d'étude (minimum 3 test selon l'EC8)

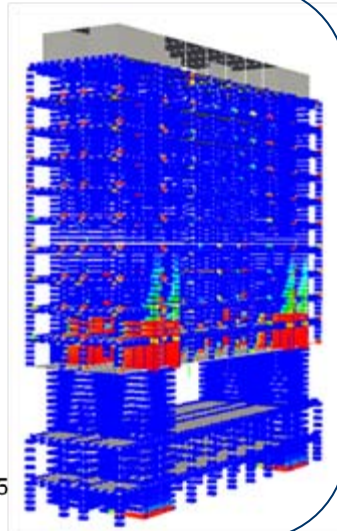
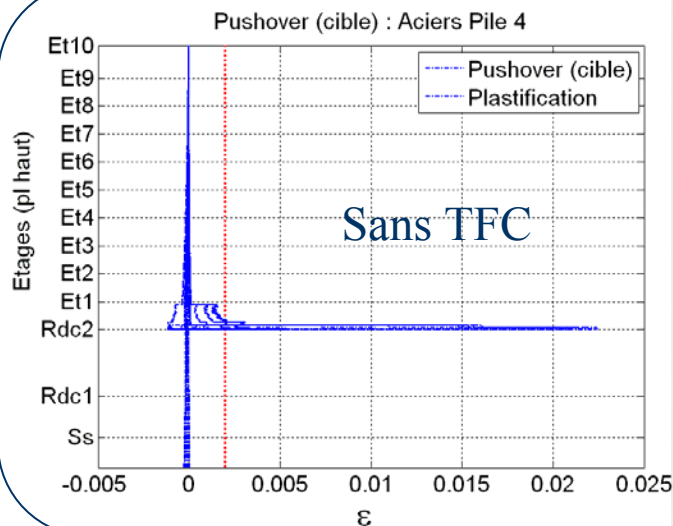
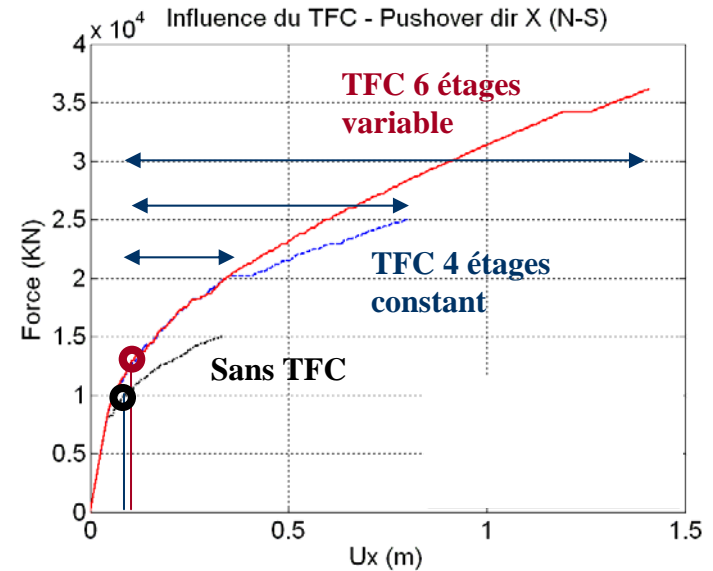
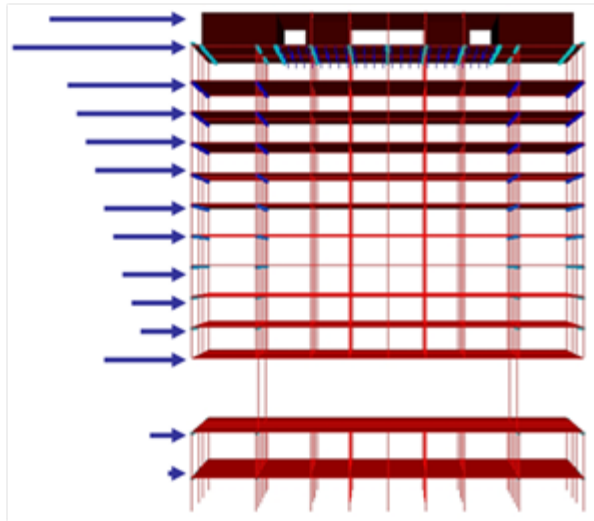
Absence d'information sur la réserve de capacité de l'ouvrage



Pushover

Analyse statique par poussée progressive : Pushover

Chargement statique équivalent



Permet de quantifier la réserve de ductilité

Permet d'estimer le déplacement envisagé en dynamique (cible)

Nécessite des hypothèses fortes sur le fonctionnement de la structure

Contexte

1. Stratégie d'analyse de la vulnérabilité

2. Stratégie de modélisation du renforcement par TFC

3. Etude de cas : Evaluation et renforcement de l'Hôtel de Ville de Grenoble

Conclusions et perspectives

Conclusions et perspectives 1/2

Stratégie de modélisation 3D simplifiée
par éléments finis poutres multifibres

→ Analyse 3D non linéaire devient abordable en coût de calcul
Complément de l'analyse Pushover

Définition réglementaire de dommage à partir des indicateurs locaux

Re-Localisation des déformations au droit des fissures
(vers du multi-échelle)

Adhérence acier -béton

Conclusions et perspectives 2/2

Prise en compte du renforcement par TFC dans la modélisation multifibres

→ Evaluation avant et après confortement

Développement d'un modèle cyclique unilatéral de béton confiné

Validation expérimentale et implémentation code EF

Intérêt de la prise en compte de la fatigue

Application à d'autres géométries de poteaux

Extension à d'autres types de matériaux (ductiles)



ANR Agence Nationale
de la Recherche



Merci de votre attention

Thèse de doctorat soutenue par : Cédric Desprez

**Encadrée par : Jacky Mazars
et Panagiotis Kotronis**

21 juillet 2010