

# Réhabilitation sismique des poteaux en béton armé de viaduc à l'aide de matériaux composites

**Nathalie Roy, Patrick Paultre et Jean Proulx**

**INFRA2007**

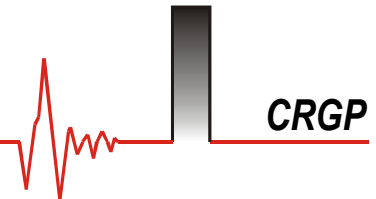
**5 au 7 novembre 2007**

**Sheraton Laval et Centre des congrès de Laval**



UNIVERSITÉ DE  
**SHERBROOKE**

Earthquake Engineering and Structural Dynamics Research Center  
Centre de recherche en génie parasismique et en dynamique des structures  
Département de génie civil, Faculté de génie



**CRGP**

# Objectifs

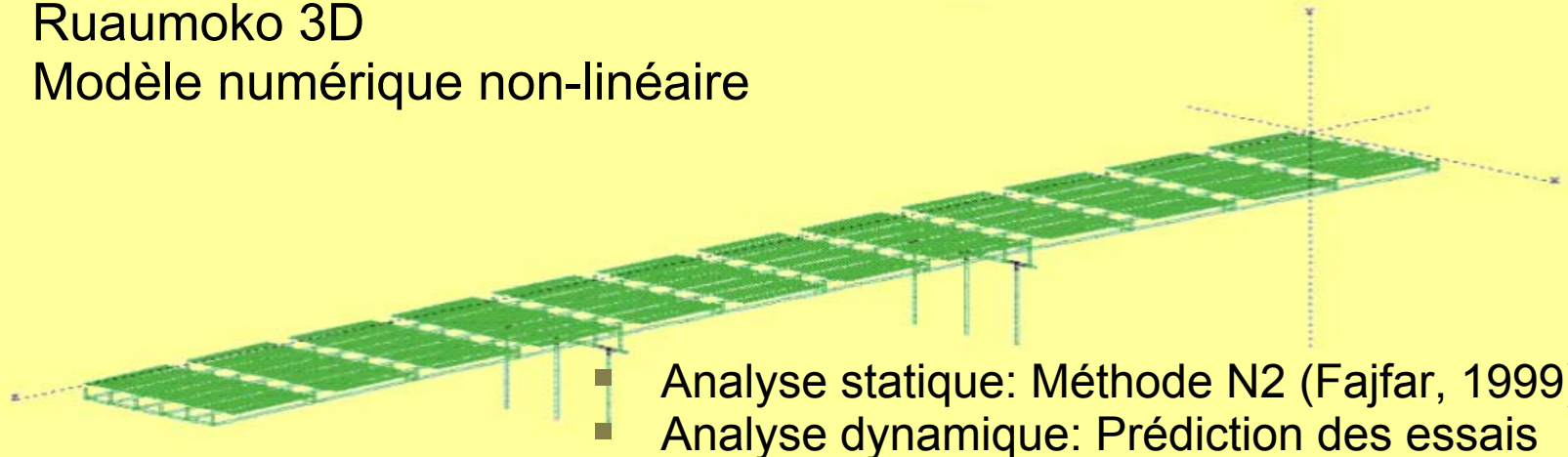
- Optimiser une **méthode de renforcement** consistant à confiner les poteaux à l'aide de polymères renforcés de fibres de carbone (**PRFC**)
  - Objectifs de performance
  - Critères de déplacement
- Évaluer la **capacité sismique** des poteaux
- Évaluer la performance de la réhabilitation à l'aide **d'essais pseudo-dynamique par sous-structures**

# Sélection du pont type



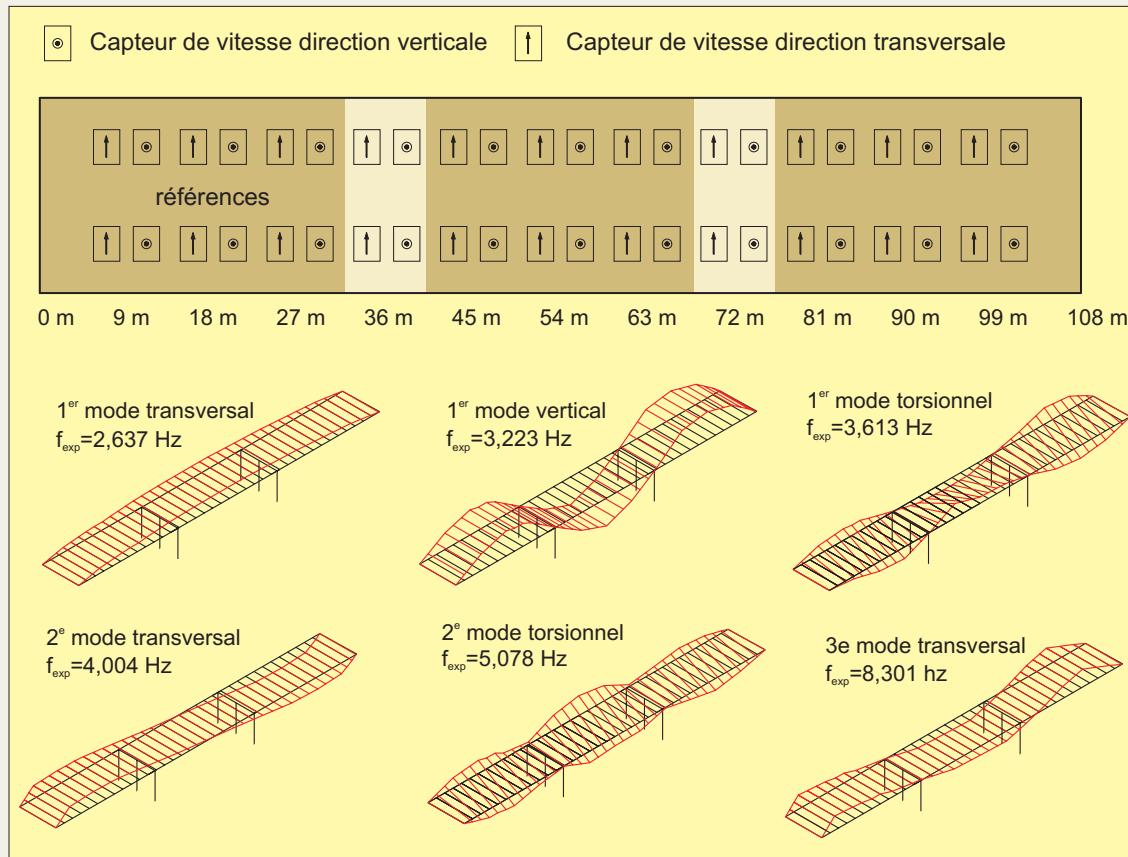
- CNBC 1995 :
  - 475 ans
  - $PGA = 0,12\text{ g}$
- CNBC 2005
  - 2500 ans
  - $PGA = 0,40\text{ g}$

Ruaumoko 3D  
Modèle numérique non-linéaire



# Essais dynamiques sous-vibrations ambiantes

- Calibration du modèle dans le domaine linéaire
- Décomposition dans le domaine fréquentiel avec le logiciel ARTeMIS Extractor



# Matrice de performance

## Objectifs de performance

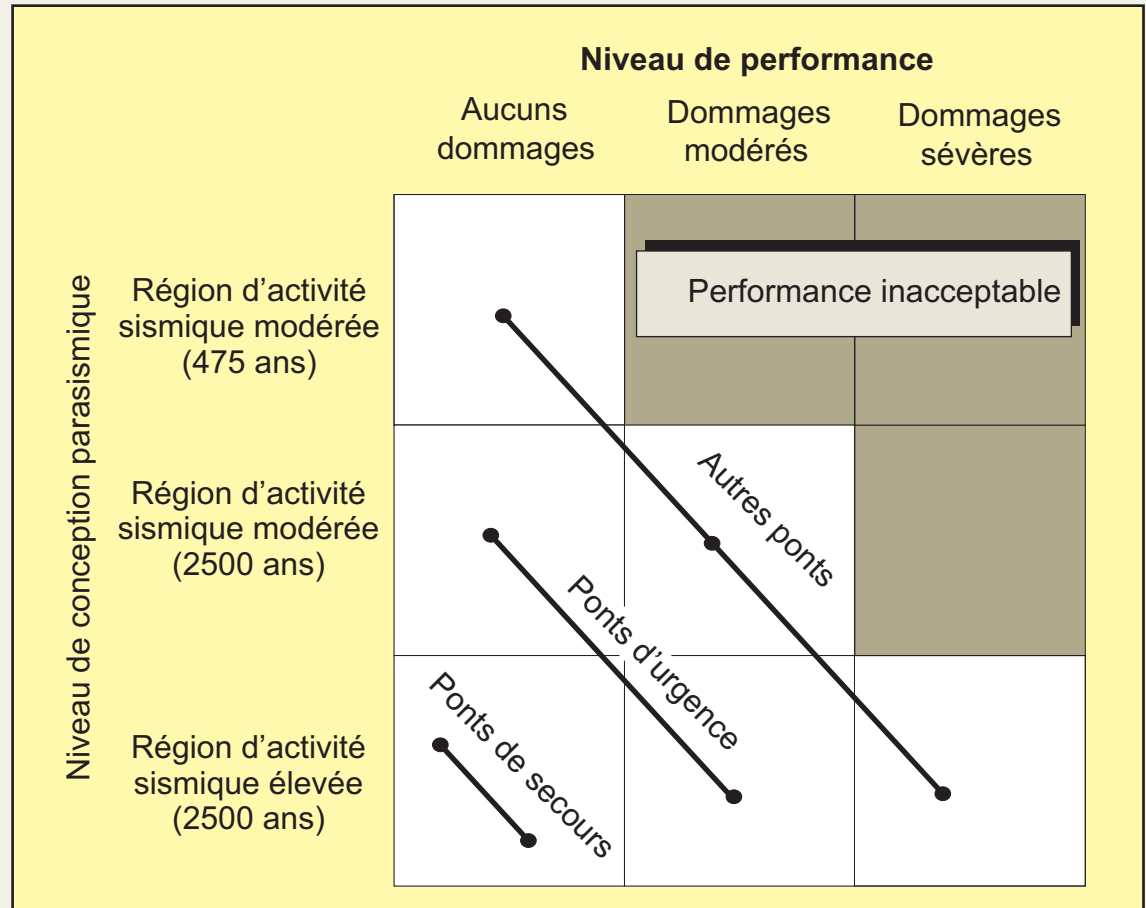
- Opérationnel
- Objectif intermédiaire
  - Limiter les dommages
- Survie et sécurité

## Critères de performance

- Endommagement mineur, moyen ou important

## Aléa sismique

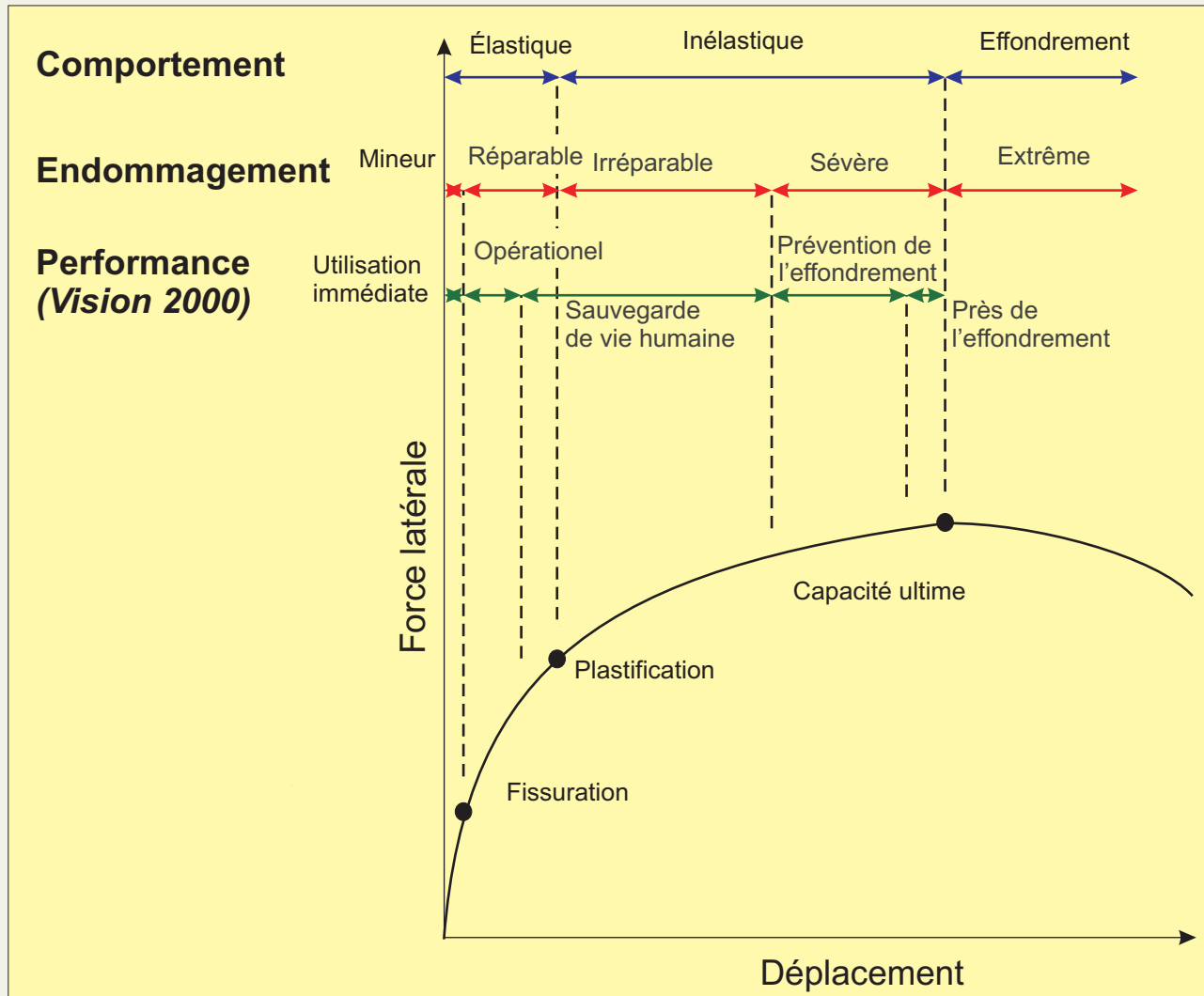
- Spectre d'aléa sismique uniformisé



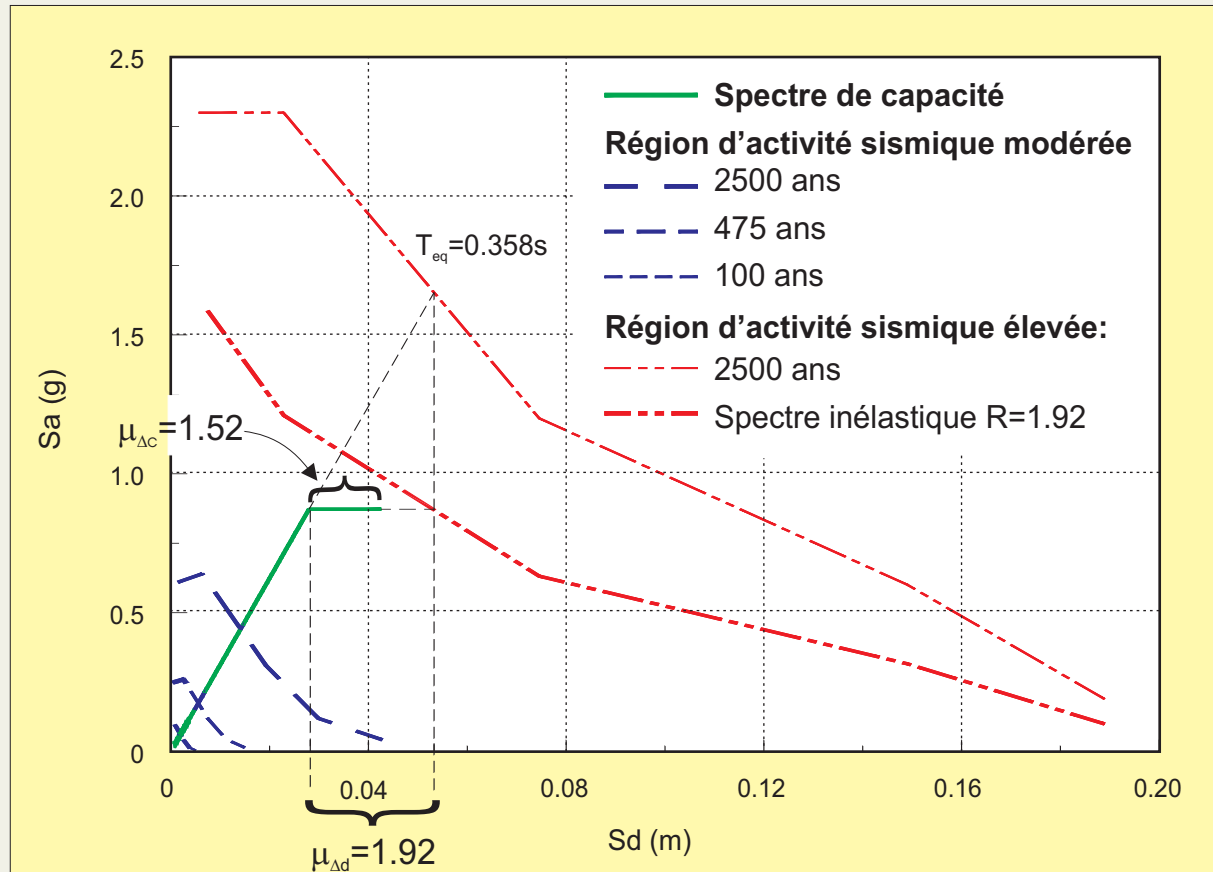
Programme expérimental



# Critères de performance typiques et endommagement correspondant (Ghobarah, 2004)



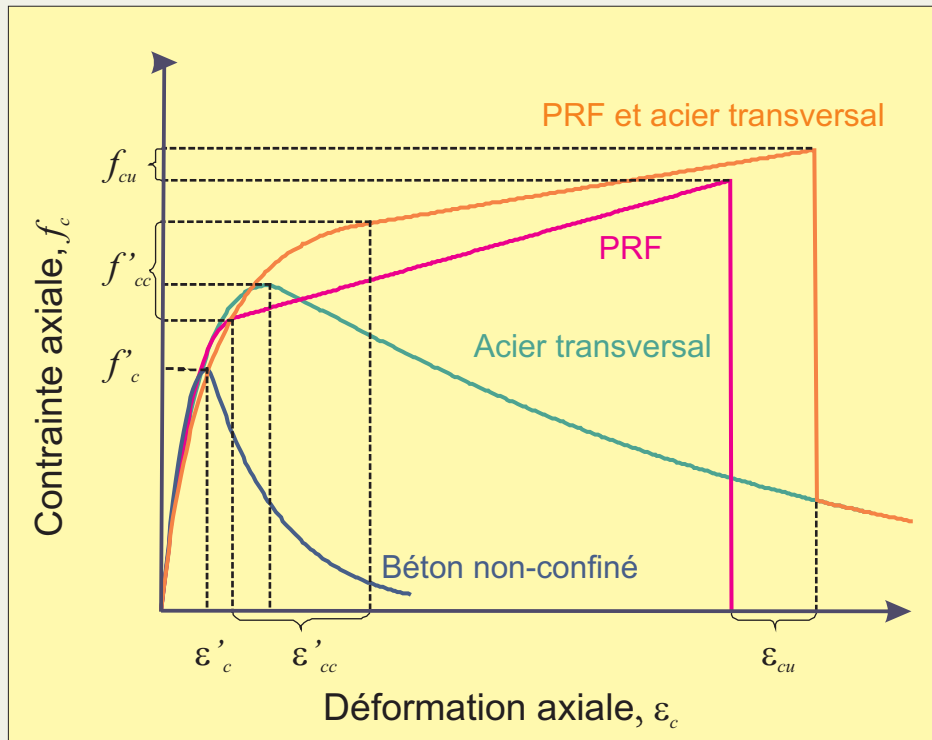
# Évaluation de la capacité sismique



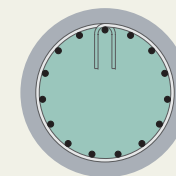
- Réhabilitation de la structure pour l'aléa sismique sévère :
  - Demande en ductilité  $\mu_{\Delta} = 1,92$

# Comportement des sections confinées

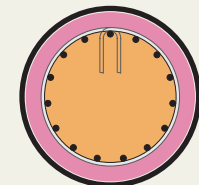
- Prédiction de la réponse de la section confinée :
  - modèle de **Eid et Paultre (2006)**



- Considère l'effet de confinement par :
  - L'armature transversale
  - Les PRFC
- WMNPhi (programme d'analyse sectionnelle)



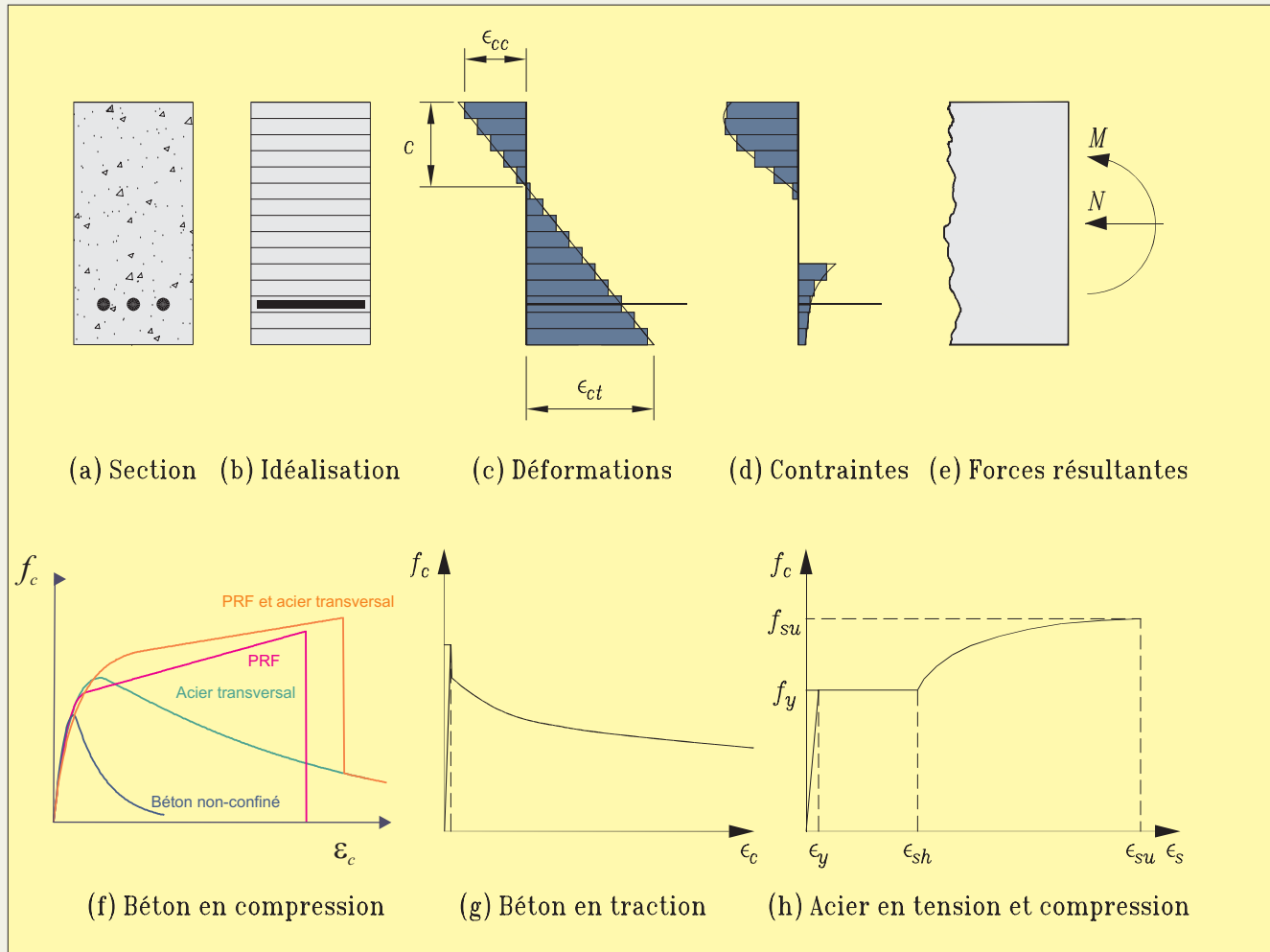
Section sans PRF



Section avec PRF



# Analyse sectionnelle à l'aide de WMNPhi



# Réhabilitation basée sur des critères de déplacement

1. Déterminer la demande cyclique en déplacement

$$\mu_{\Delta, \text{requis}} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} = 1,92$$

2. Calculer la demande en ductilité sectionnelle correspondante (Park et Paulay, 1975)

$$\mu_{\phi, \text{requis}} = \frac{\phi_u}{\phi_y} = 1 + \frac{\mu_{\Delta} - 1}{3 \frac{l_p}{l} \left( 1 - \frac{l_p}{2l} \right)}$$

où la longueur de rotule plastique équivalente est calculée à partir de la relation suivante (Priestley et al. 1996)

$$l_p = g + 0,044d_b f_y$$

# Réhabilitation basée sur des critères de déplacement

3. Calculer la déformation du béton à la fibre comprimée maximum requise

$$\varepsilon_{\text{requis}} = \varphi_{\text{requis}} c$$

où l'axe neutre  $c$  est calculé à l'aide du logiciel de calcul de réponse sectionnelle moment-courbure WMNPhi

4. Calculer la déformation du béton à la fibre comprimée maximum fournie et l'épaisseur  $t$  de PRFC correspondante (Lam et Teng 2004)

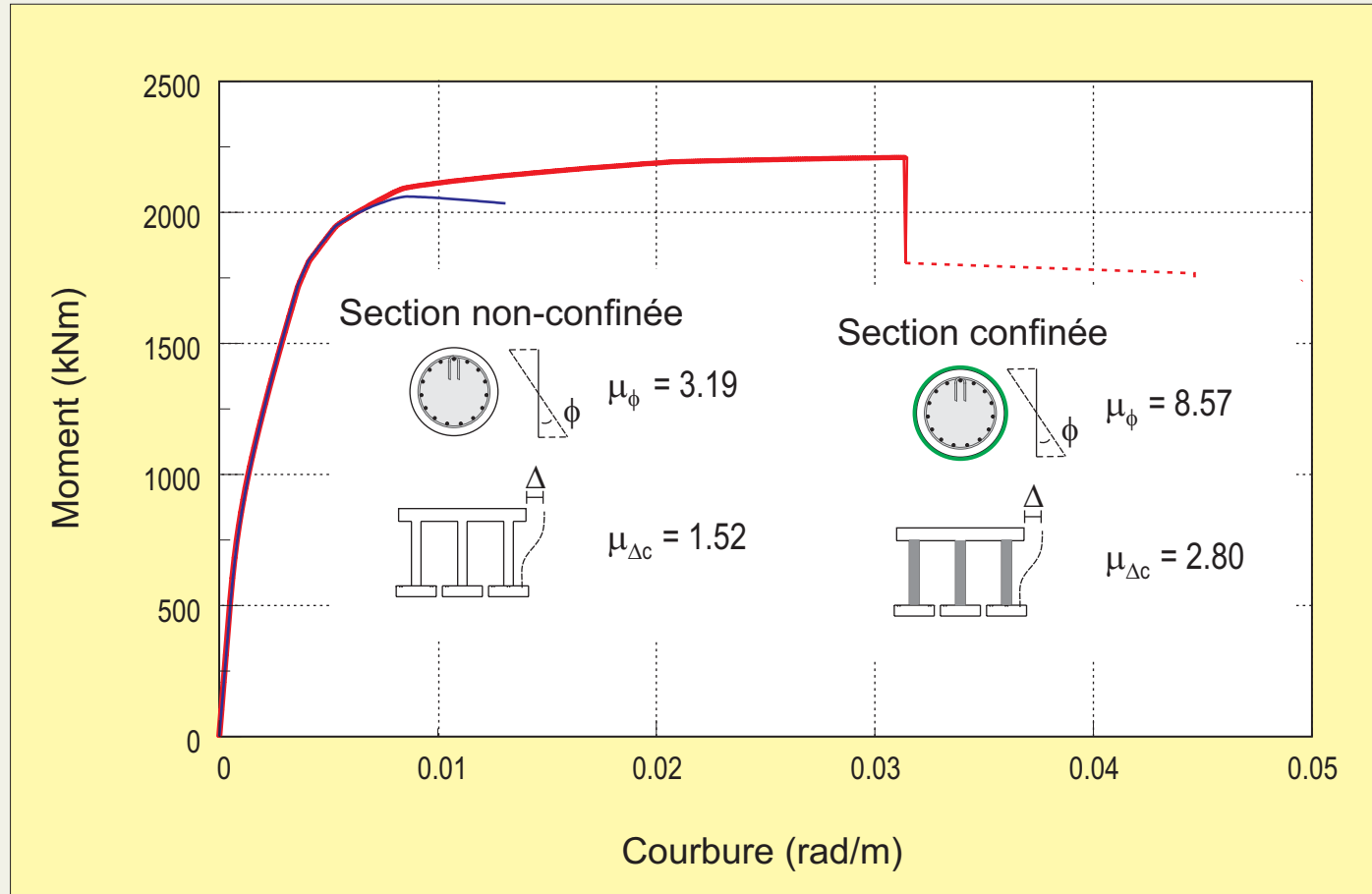
$$\varepsilon_{\text{fourni}} \geq \varepsilon_{\text{requis}}$$

$$\varepsilon_{\text{requis}} = \varepsilon_{c0} \left[ 1,75 + 5,53 \left( k_e \frac{A_{sh} f_{hy}}{s D_c f_{c0}} + \frac{2t E_f \varepsilon_{fu}}{D f_{c0}} \right) \left( \frac{\varepsilon_{fu}}{\varepsilon_{c0}} \right)^{0,45} \right]$$

5. Calculer la ductilité cyclique en déplacement de la section confinée

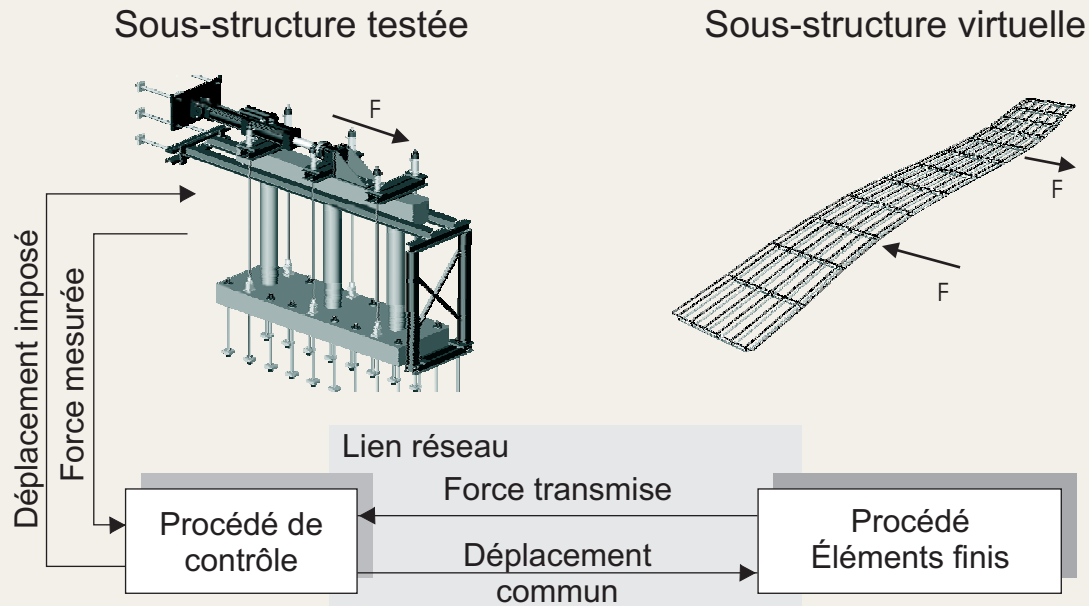
$$\mu_{\Delta, \text{section confinée}} = 2,80$$

# Réponse moment-courbure

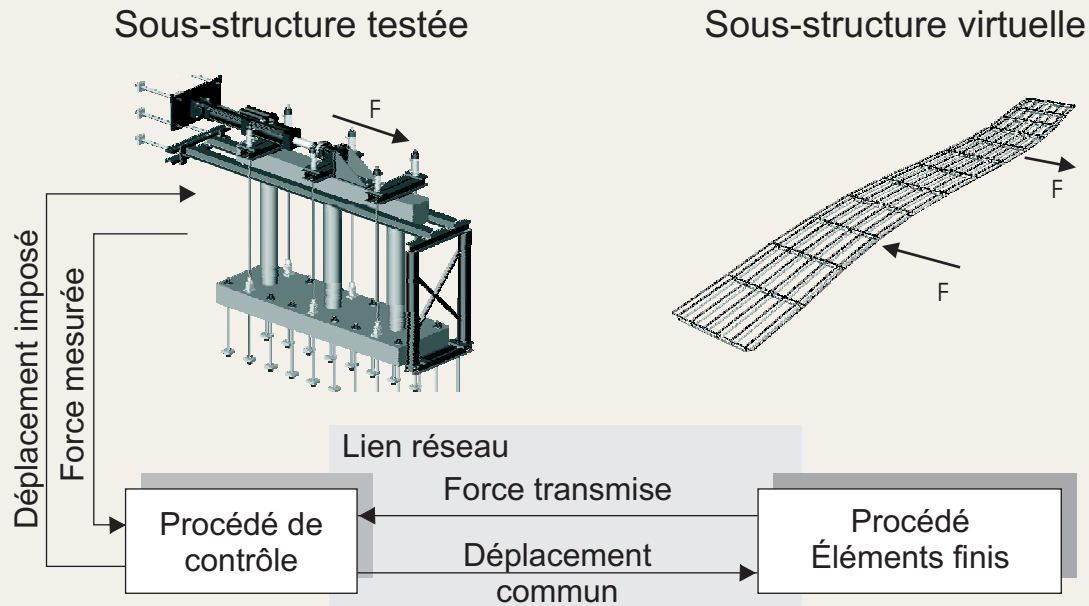


Comportement prévu à l'aide du modèle de Eid et Paultre

# Essais pseudo-dynamiques par sous-structures

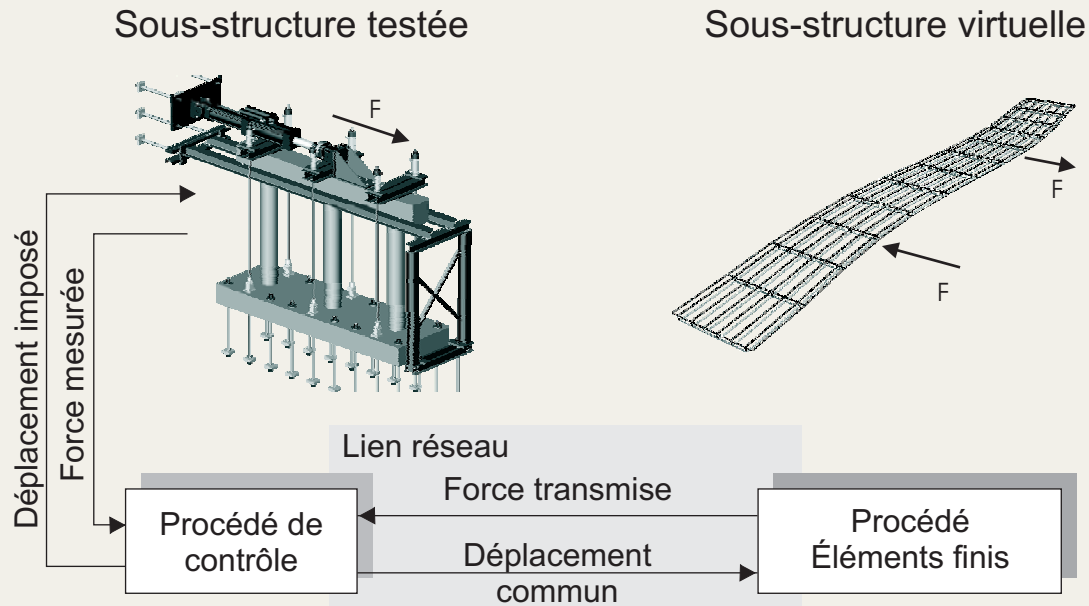
$$m\ddot{u} + c\dot{u} + r = f$$


# Essais pseudo-dynamiques par sous-structures

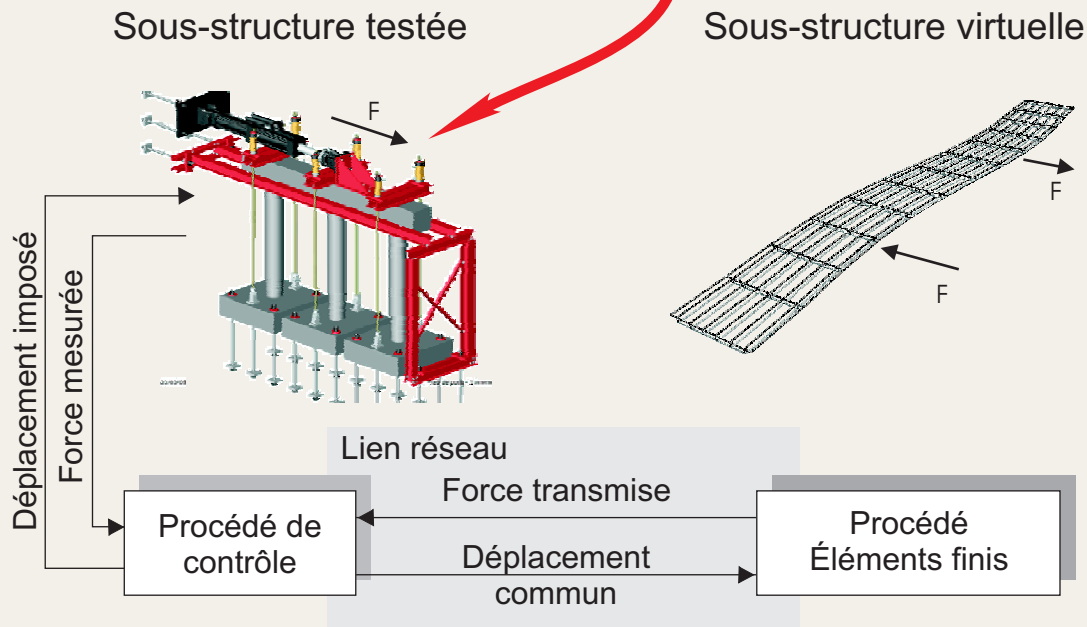
$$m\ddot{u} + c\dot{u} + r = f$$




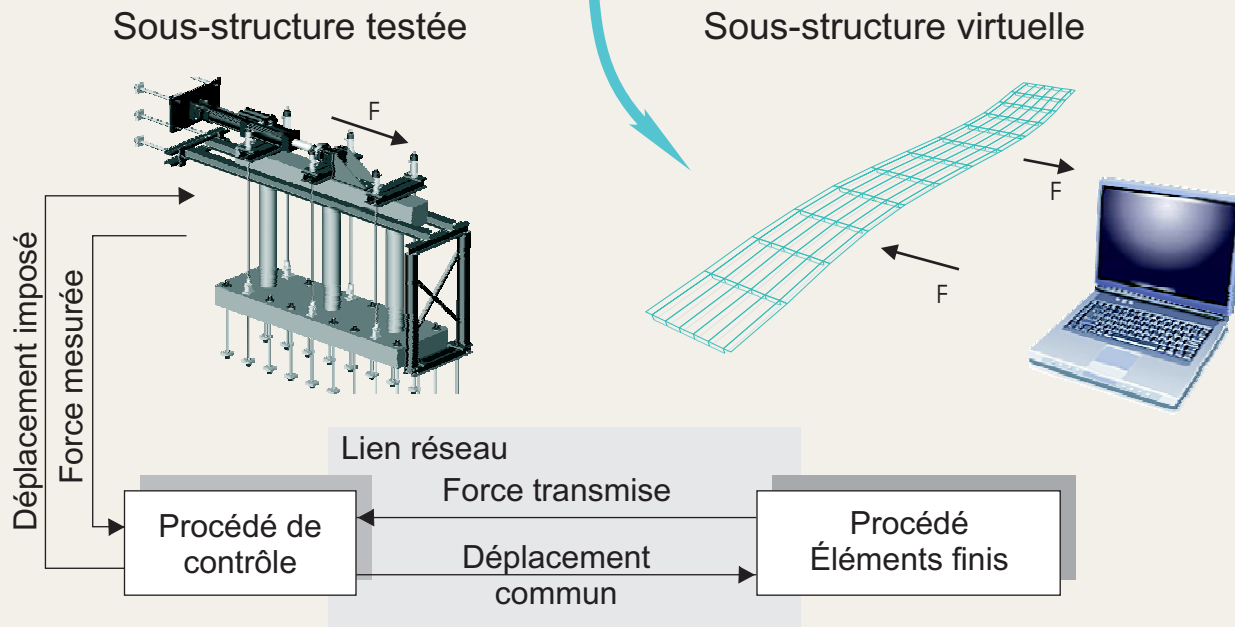
# Essais pseudo-dynamiques par sous-structures

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + r = f$$


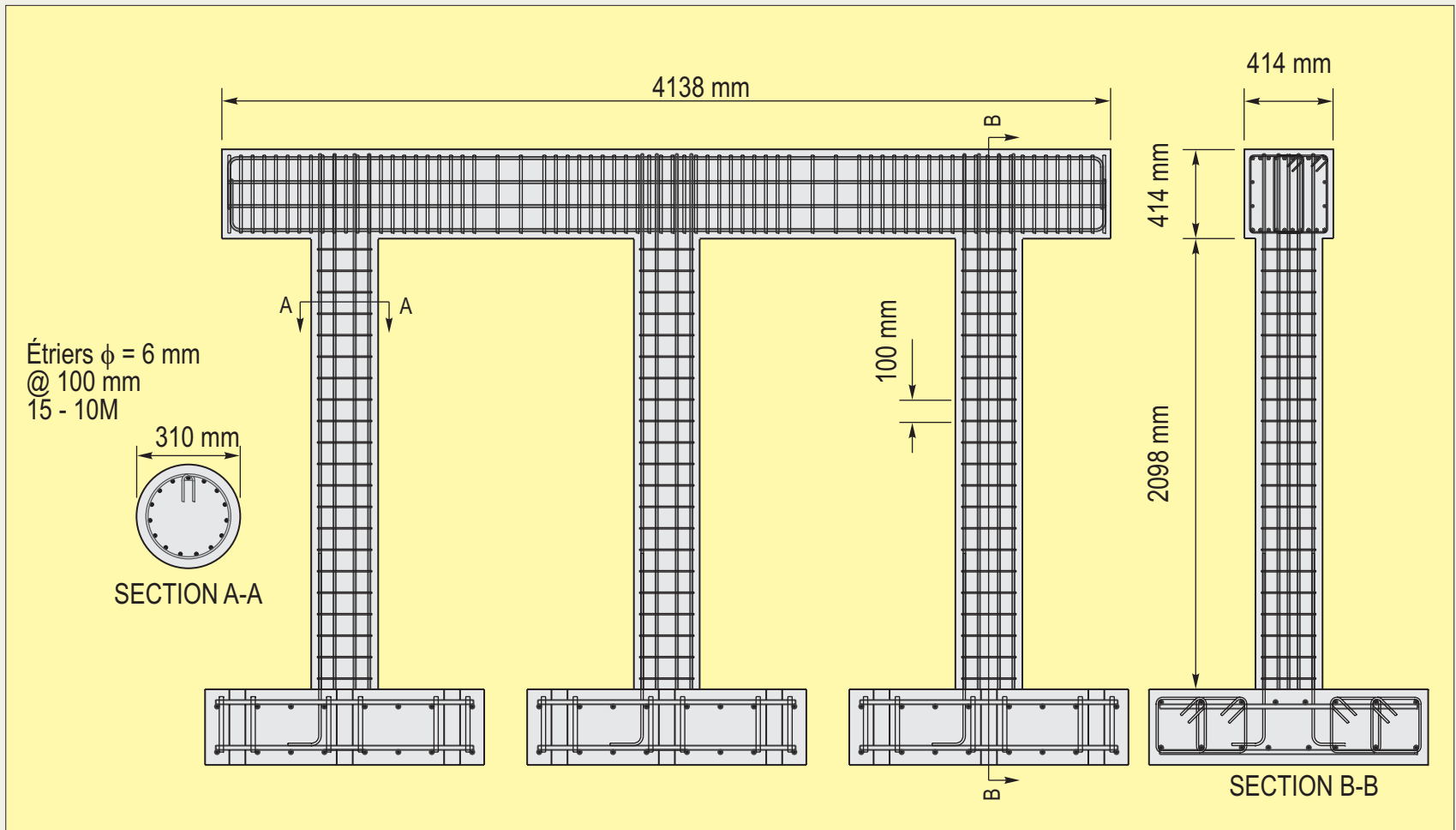
# Essais pseudo-dynamiques par sous-structures

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + r = f$$


# Essais pseudo-dynamiques par sous-structures

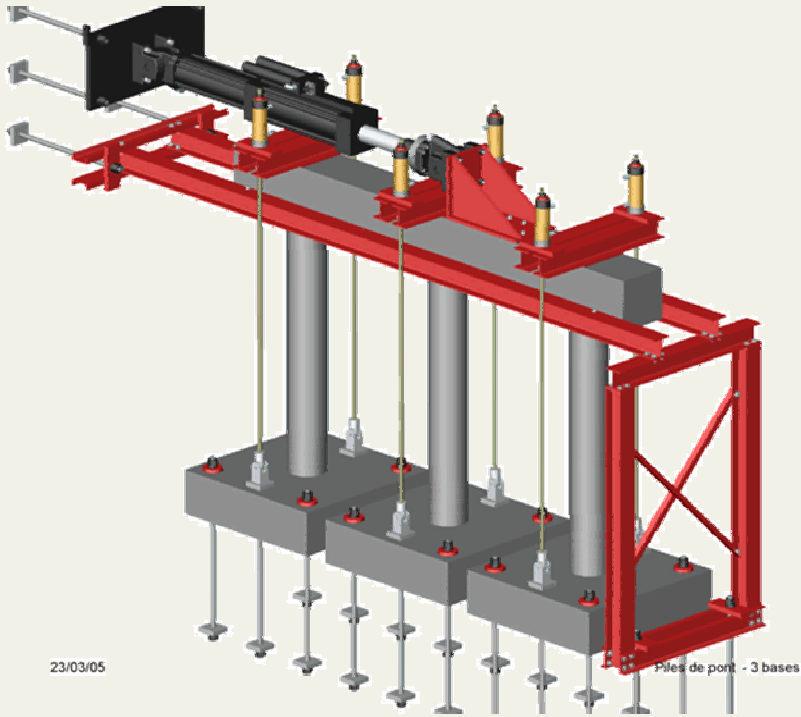
$$m\ddot{u} + c\dot{u} + r = f$$


# Dispositions constructives



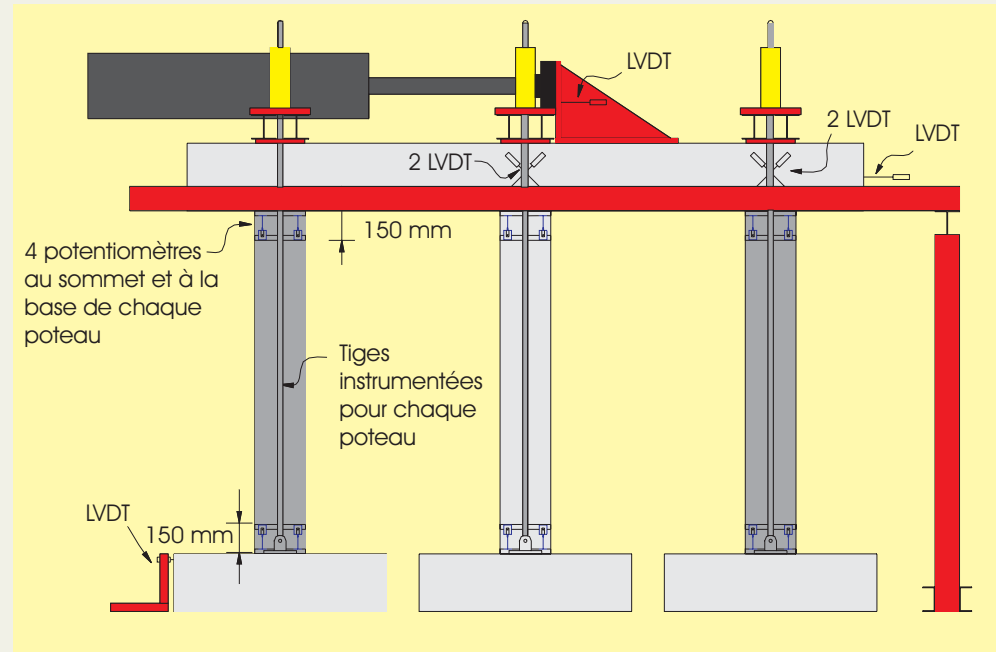
Échelle 1:3

# Montage et instrumentation



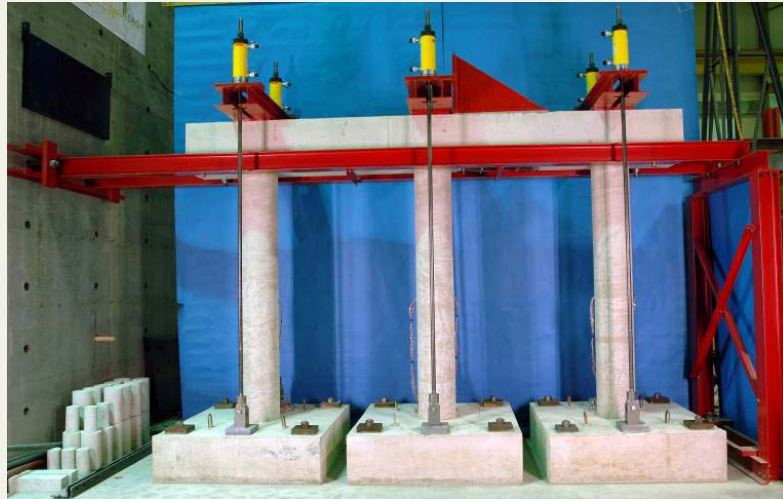
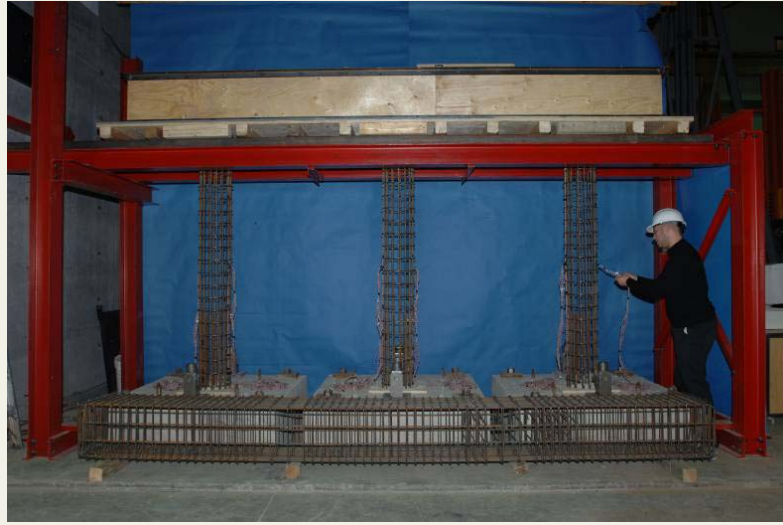
23/03/05

Piles de pont - 3 bases





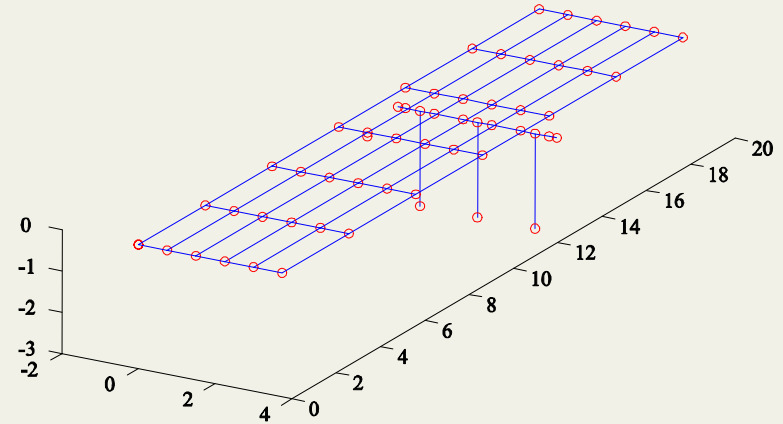
# Construction



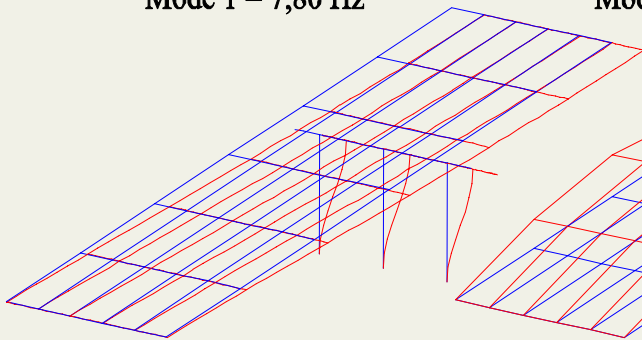


# Sous-structure virtuelle

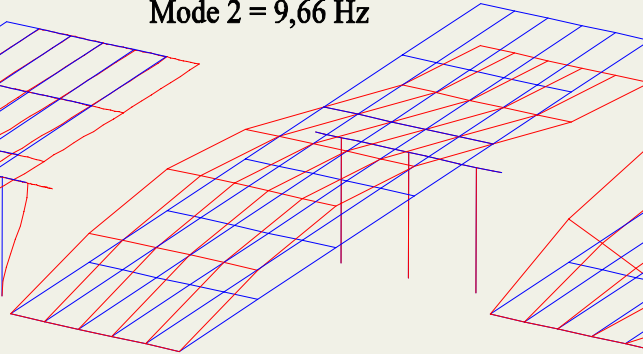
- Matlab
- Comportement linéaire
- Échelle 1:3
- Calibration à l'aide des essais sous vibrations ambiantes



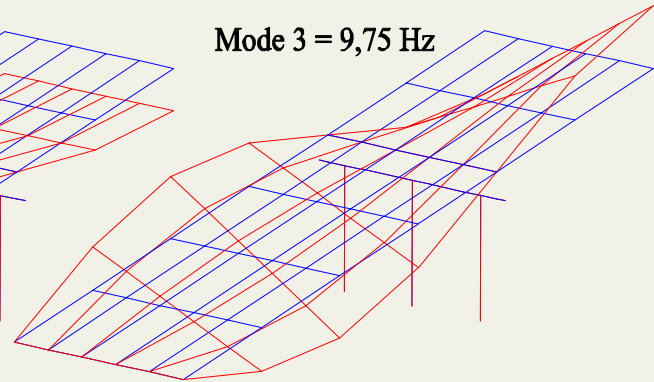
Mode 1 = 7,80 Hz



Mode 2 = 9,66 Hz



Mode 3 = 9,75 Hz



# Programme expérimental

Essai No.	Détails	Période de retour (years)	Activité sismique	PGA (g)
1	<b>CHBDC 2000</b> Avant réhabilitation	475	Modérée	0,18
2	<b>CHBDC 2000</b> Après réhabilitation	475	Modérée	0,18
3	<b>CNBC 2005</b>	2500	Modérée	0,37
4	<b>El Centro</b> (pondéré)	-	-	0,40
5	<b>CNBC 2005</b>	2500	Élevée	1,45

# Essais pseudo-dynamiques par sous-structures



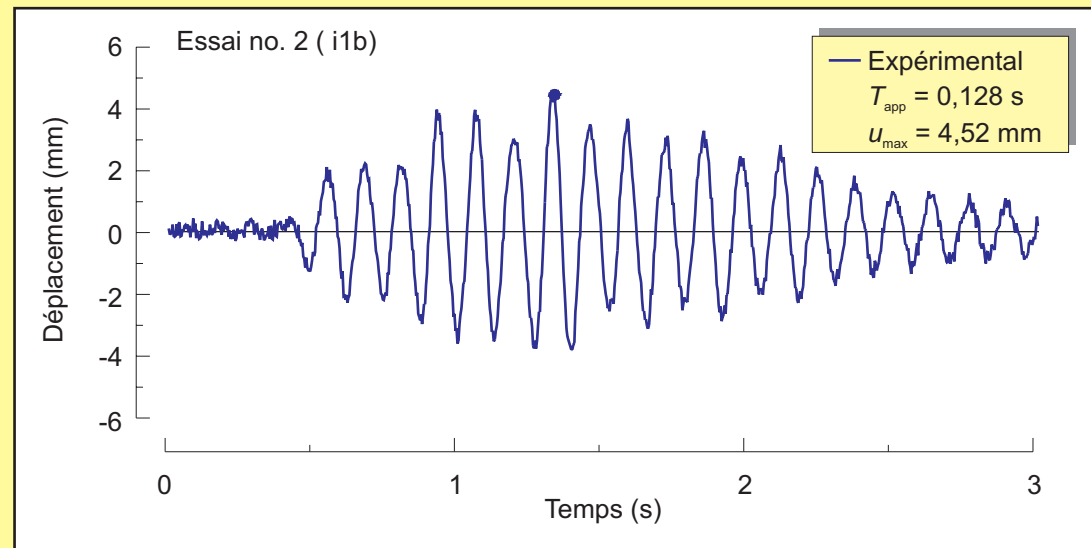
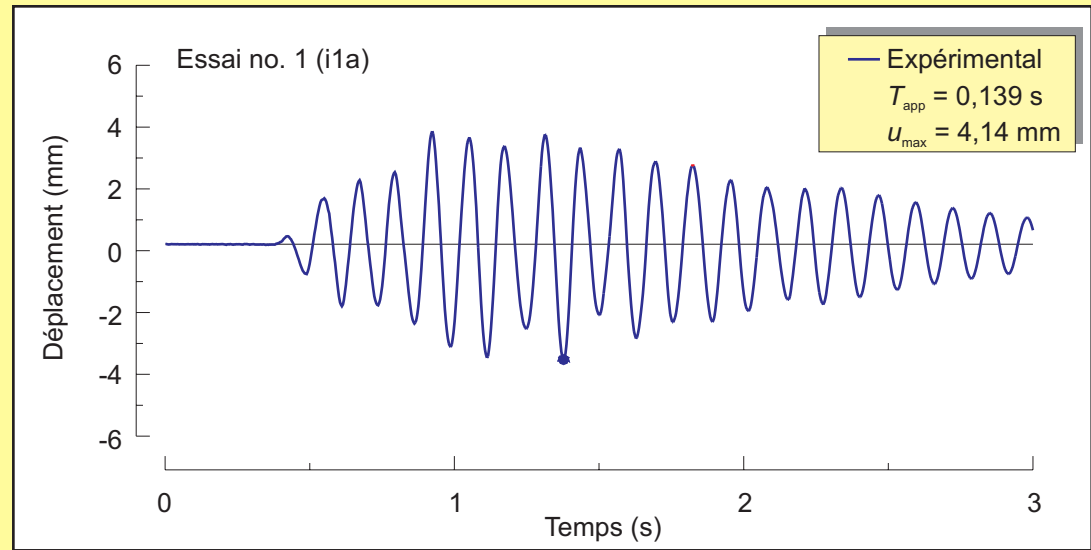
Sous-structure testée

# Prédictions Ruaumoko

- Intégration temporelle du système non-linéaire
  - Accélération moyenne constante de Newmark
- Amortissement
  - Rayleigh modifié
  - 1,5% sur les deux premiers modes transversaux
- Comportement non-linéaire concentré dans les zones de rotules plastiques
  - Relations moment-courbure générées avec le logiciel WMNPhi
  - Détérioration de la rigidité avec le modèle de Takeda

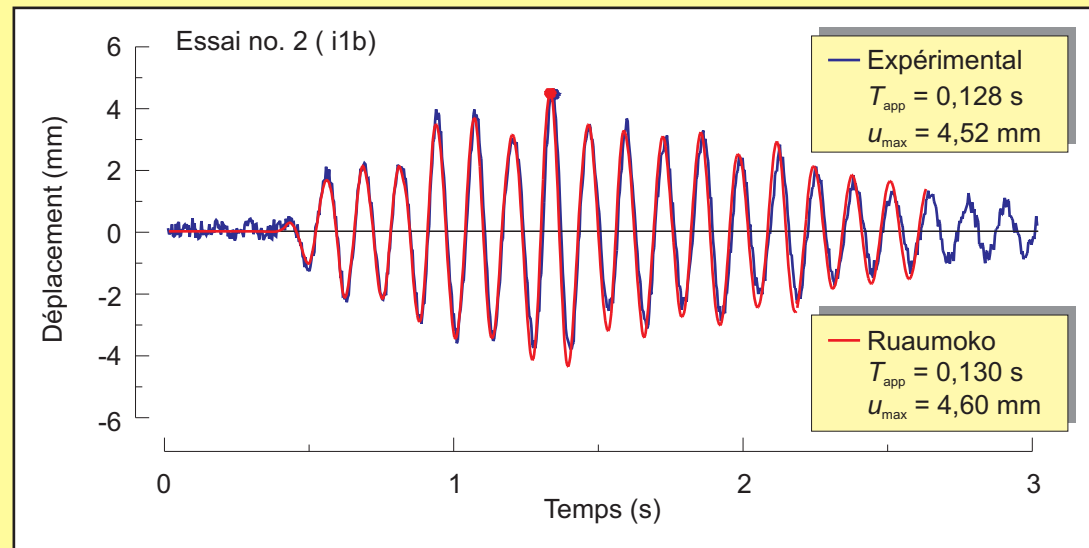
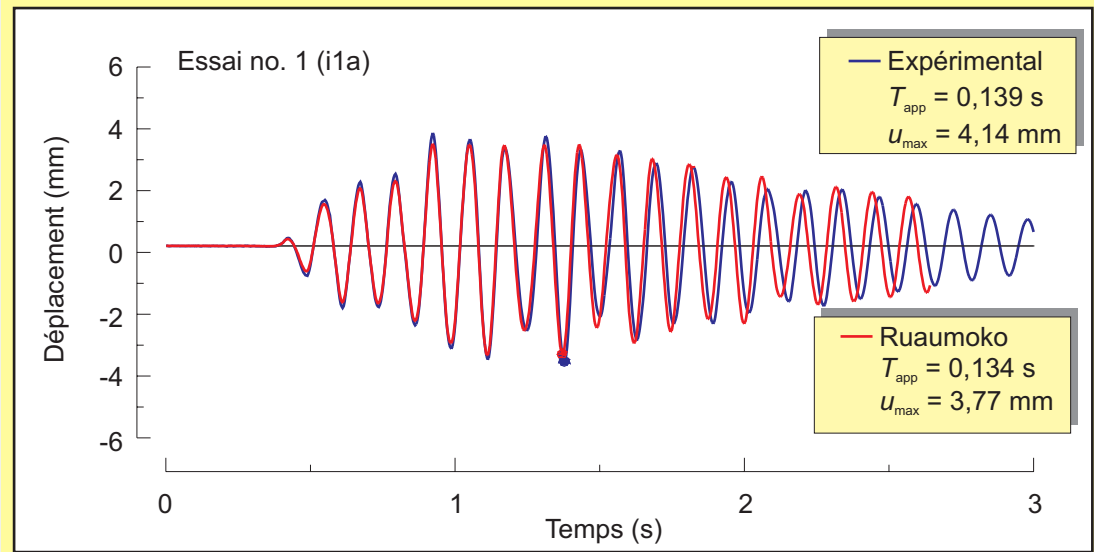
# 1<sup>er</sup> niveau d'intensité

- Avant et après réhabilitation
- CHBDC (S6-2000)
- Région d'activité sismique modérée
- 475 ans
- PGA = 0,18 g
- Endommagement mineur



# 1<sup>er</sup> niveau d'intensité

- Avant et après réhabilitation
- CHBDC (S6-2000)
- Région d'activité sismique modérée
- 475 ans
- PGA = 0,18 g
- Endommagement mineur

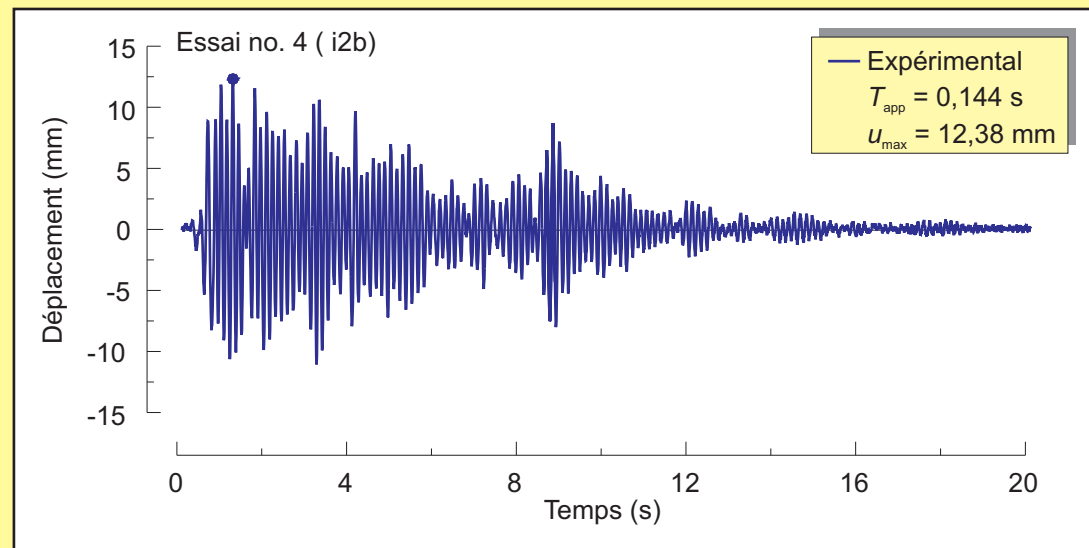
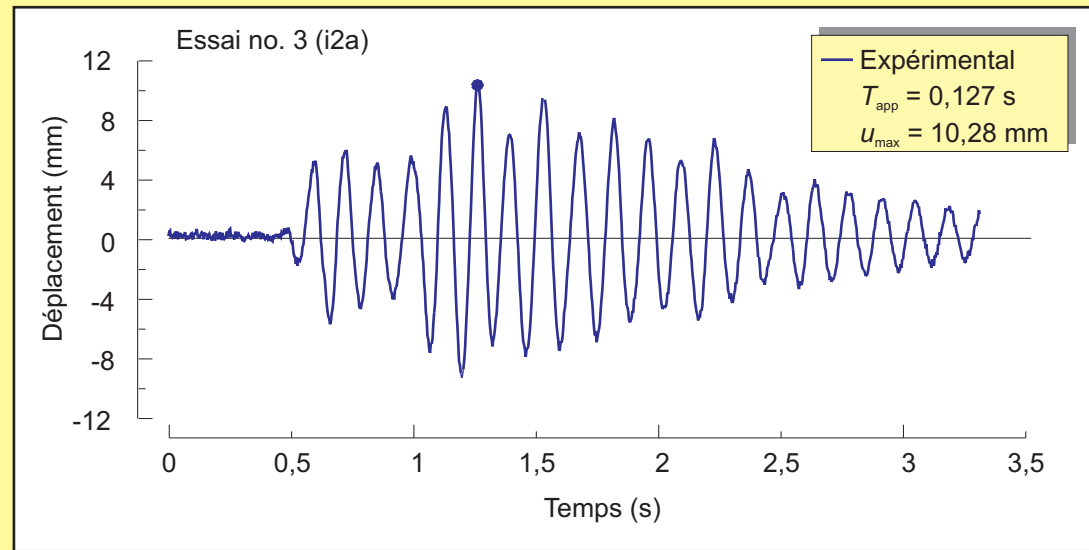




# 2<sup>e</sup> niveau d'intensité

- CNBC 2005
- Région d'activité sismique modérée
- 2500 ans
- PGA = 0,37 g
- Dommages réparables

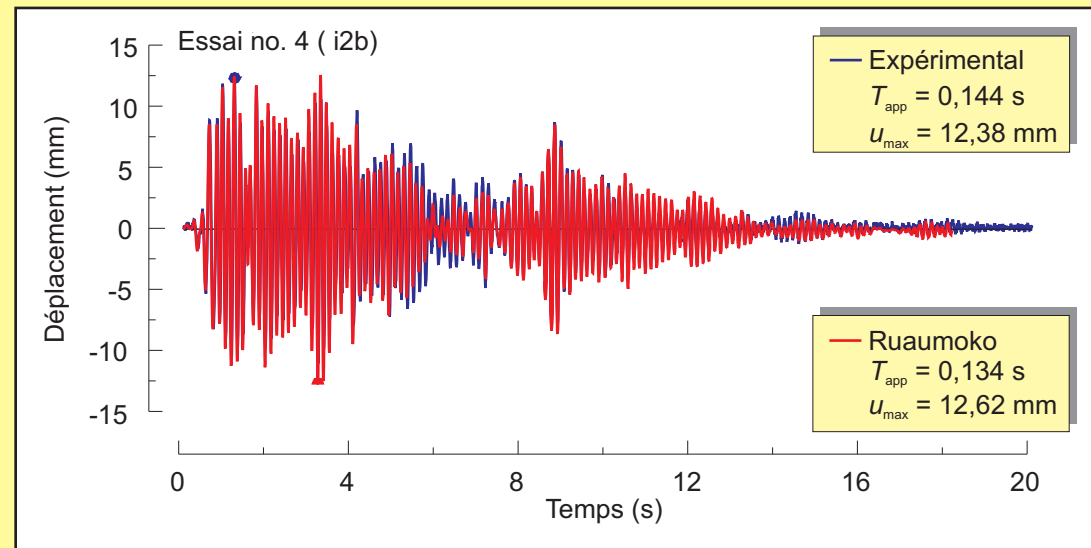
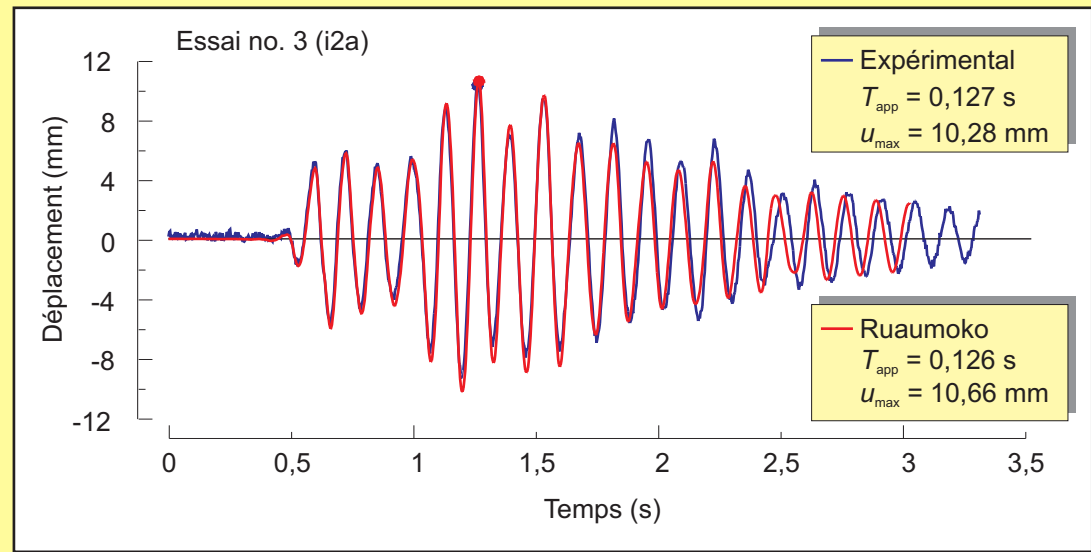
- El Centro
- PGA = 0,40 g
- Dommages réparables



# 2<sup>e</sup> niveau d'intensité

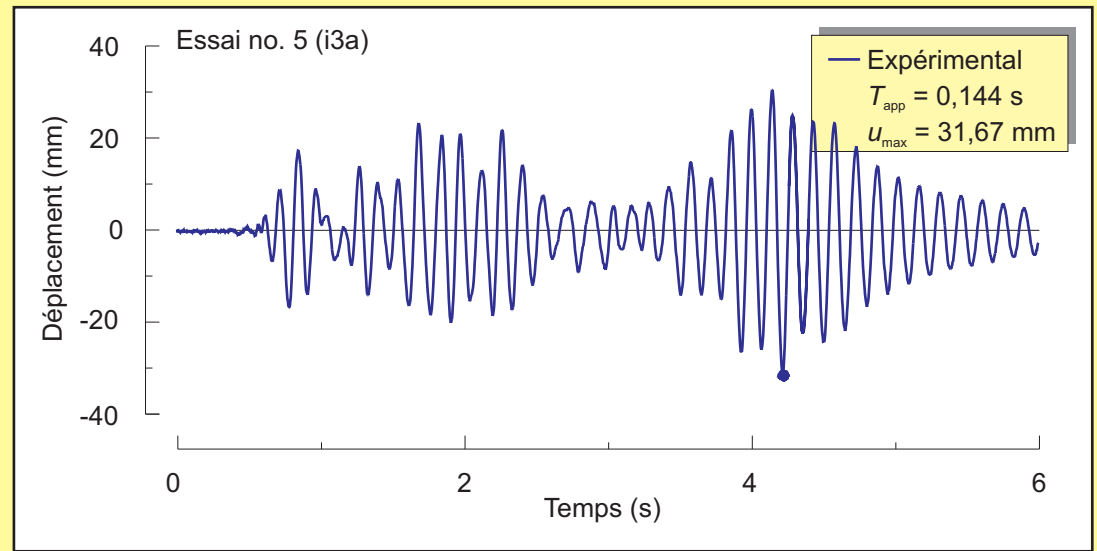
- CNBC 2005
- Région d'activité sismique modérée
- 2500 ans
- PGA = 0,37 g
- Dommages réparables

- El Centro
- PGA = 0,40 g
- Dommages réparables



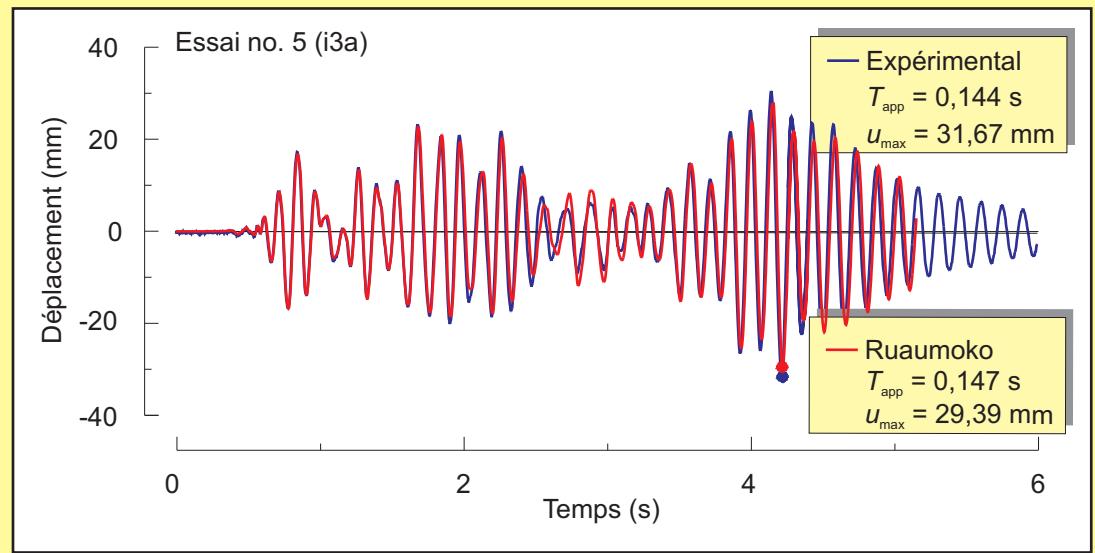
# 3<sup>e</sup> niveau d'intensité

- CNBC 2005
- Région d'activité sismique élevée
- 2500 ans
- PGA = 1,45 g
- Dommages importants



# 3<sup>e</sup> niveau d'intensité

- CNBC 2005
- Région d'activité sismique élevée
- 2500 ans
- PGA = 1,45 g
- Dommages importants



# Résultats

Essai No.	K (kN/mm)	$u_{\max}$ (mm)	$u_{\max} / u_{\max, \text{essai1}}$ (%)	$V_{\max}$ (kN)	$V_{\max} / V_{\max, \text{essai1}}$ (%)	$\mu_{\Delta}$
1 (0,18g)	18,0*	3,77	100	90,0	100	0,36
2 (0,18g)	18,0	4,52	120	85,4	95	0,43
3 (0,37g)	14,2	10,28	273	162,5	180	0,98
4 (0,40g)	13,2	12,38	328	174,8	194	1,18
5 (1,45g)	7,2	31,67	840	262,9	292	3,01

\*Rigidité avant l'essai: 26,0 kN/mm

# Déplacement relatif vs comportement, endommagement et performance

Essai No.	Déplacement relatif (%)	Comportement	Endommagement	Performance
1 (0,18g)	0,17	Élastique	Mineur	Utilisation immédiate
2 (0,18g)	0,21	Élastique	Mineur	Utilisation immédiate
3 (0,37g)	0,40	Limite élastique	Réparable	Opérationnel
4 (0,40g)	0,50	Limite élastique	Réparable	Opérationnel
5 (1,45g)	1,51	Inélastique	Important	Sauvegarde de vie humaine



# Conclusions

- Méthode de dimensionnement de réhabilitation basée sur des critères de déplacement
  - Mise en oeuvre
  - Validation
- Nouveau modèle de confinement (Eid et Paultre, 2006):
  - Effet de confinement par l'**acier transversal** et les **PRFC**
- Analyse non-linéaire
  - RUAUMOKO et WMNPhi
- Essais dynamiques : un outil utile pour la calibration des modèles
- Essais pseudo-dynamiques par sous-structuration
  - Mise en oeuvre

# Remerciements

- CRSNG
- FQRNT
- Ministère des transports du Québec
- ISIS Canada
- Ville de Québec
- CERIU
- Sika Canada
- Dr Benedikt Weber
- Dr Rami Eid
- Université de Sherbrooke, personnel technique