

Journées techniques Ouvrages d'Art 2013

Dijon
Mercredi 5 et Jeudi 6 juin

D. Davi – CETE Méditerranée

PCI 57 : « Vulnérabilité des ouvrages de Génie Civil aux aléas sismiques et hydrauliques »
Mercredi 5 juin 2013



IFSTTAR

Comparaison des différentes méthodes de calcul de l'EC8-2 sur un cas théorique

Résultats partiels de l'opération de recherche IFSTTAR RPR2S110003 (ex 11R113) :
Prévoir et limiter les effets des séismes (2011-2014)

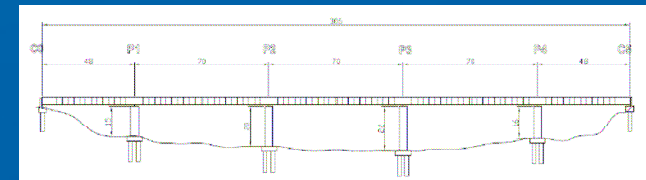
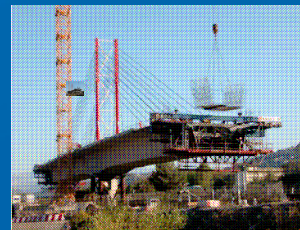
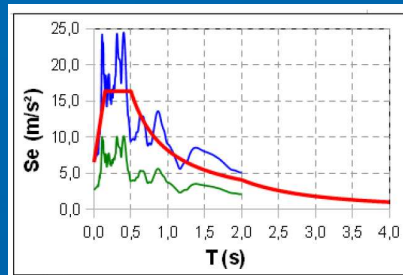
Axe C : « Vulnérabilité des ouvrages et des structures »

norme européenne
norme française

NF EN 1998-2
10 novembre 2004

Eurocode 8
Calcul des structures
pour leur résistance aux séismes
Partie 2 : Ponts

Analyse
Le présent document établit les principes de planification, les critères de conception et les règles de conception pour les ponts soumis à des séismes.
Le présent document est une application de l'Eurocode 8-1, qui traite des ponts en général, et de l'Eurocode 8-2, qui traite des ponts en particulier.
Le présent document est une application de l'Eurocode 8-1, qui traite des ponts en général, et de l'Eurocode 8-2, qui traite des ponts en particulier.
Description
Norme internationale technique, applicable aux ponts soumis à des séismes.
Identification
Ce rapport est document technique à destination des ingénieurs et des techniciens.
Date de diffusion : 10 novembre 2004
© 2004 CEN



D. Davi – CETE Méditerranée

PCI 57 : « Vulnérabilité des ouvrages de Génie Civil aux aléas sismiques et hydrauliques »

Mercredi 5 juin 2013



IFSTTAR

Comparaison des différentes méthodes de calcul de l'EC8-2 sur un cas théorique

Plan de l'exposé

- Présentation générale de l'ouvrage et principaux résultats du prédimensionnement
- Méthodes d'analyse testées
- Principaux résultats et analyse des sources de divergence des différentes méthodes
- Conséquences de l'évolution de la réglementation
- Approfondissements théoriques
- Valorisations de l'étude et suites à donner

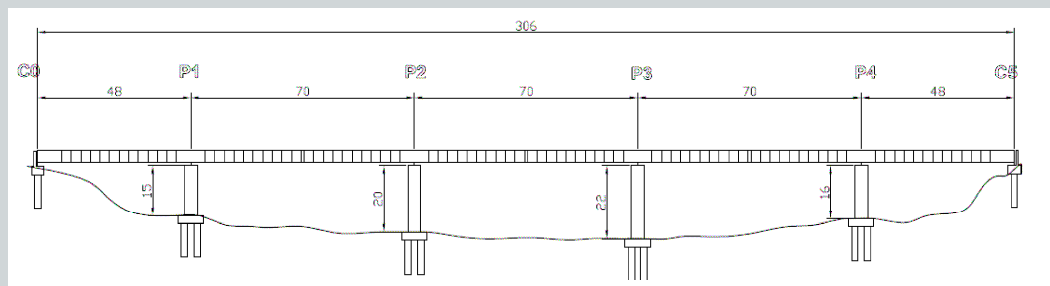
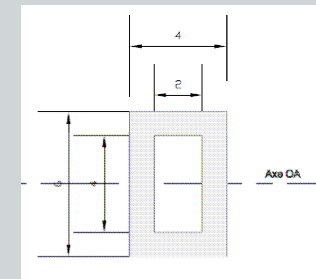
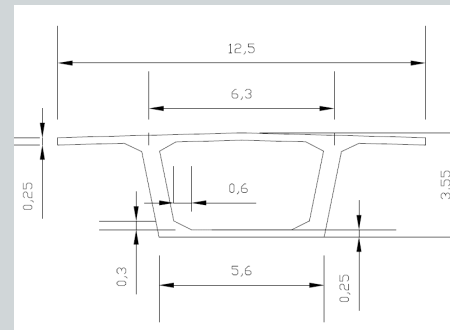


Comparaison des différentes méthodes de calcul de l'EC8-2 sur un cas théorique

- Présentation générale de l'ouvrage

Ouvrage fictif, inspiré d'un ouvrage réel, régulier au sens de l'EC8-2

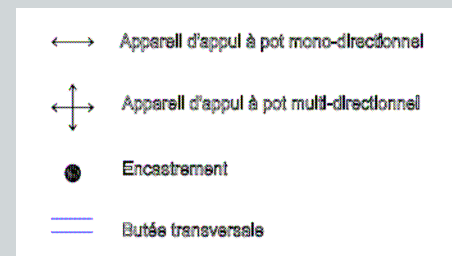
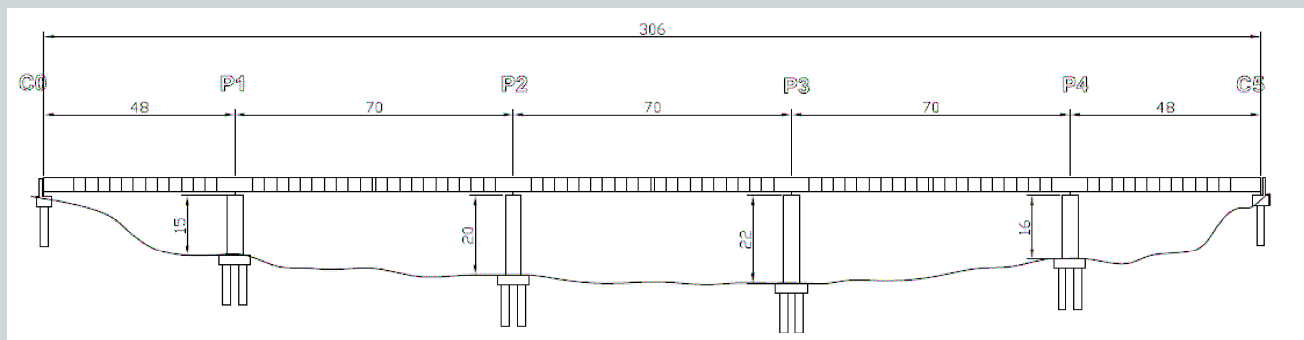
- **Tablier (C45) :**
 - 2 voies de 3,50 m + 2 BAU
 - Biais nul
 - $M_{\text{tab}} = 8300 \text{ t}$
- **Piles rectangulaires creuses (C35)**
 - $M_{\text{piles}} = 600 \text{ à } 880 \text{ t}$
 - Fondées sur barrettes



Comparaison des différentes méthodes de calcul de l'EC8-2 sur un cas théorique

- Présentation générale de l'ouvrage

Schéma statique



Comparaison des différentes méthodes de calcul de l'EC8-2 sur un cas théorique

- Principaux résultats du prédimensionnement
(selon méthode spectrale multimodale en force et coefficient de comportement)

Contexte	Conception	Règlement	Ferrailage piles	d_{long}
Z4, cat.III, sol B, $\tau=1$	Élastique / ductilité limitée	EC8-2	HA25, e200	12,0 cm
		PS92	2HA32, e200	9,6 cm
Z5, cat.IV, sol B, $\tau=1,3$	Ductile	EC8-2	HA32, e200	29,2 cm
		PS92	2HA40, e200	17,7 cm
	Amortisseurs	EC8-2	HA32, e200	13,7 cm
		PS92	Non couvert	

- ➔ Efficacité économique de la ductilité et des amortisseurs dans l'EC8-2
- ➔ EC8-2 réduit les aciers et augmente les déplacements
(hypothèse inertie fissurée en ductile et $q=1,5$ en ductilité limitée)



Comparaison des différentes méthodes de calcul de l'EC8-2 sur un cas théorique

- Méthodes d'analyse testées

1- Méthode spectrale multimodale en force (coefficient de comportement) :

Réitération sur q à partir de la ductilité appelée effective = $q \cdot M_{Ed} / M_{Rd}$

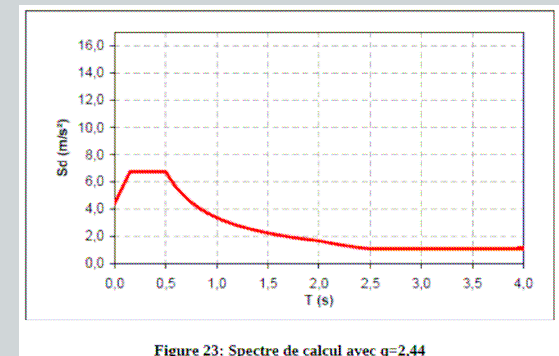


Figure 23: Spectre de calcul avec $q=2,44$

2- Méthode spectrale multimodale en déplacement :

Positionnement des déplacements calculés sur les lois de comportement F-d des piles

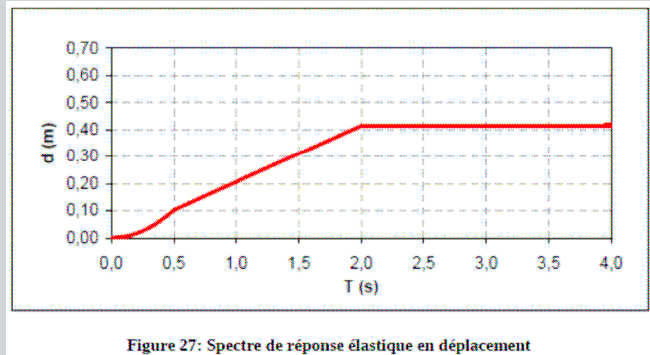
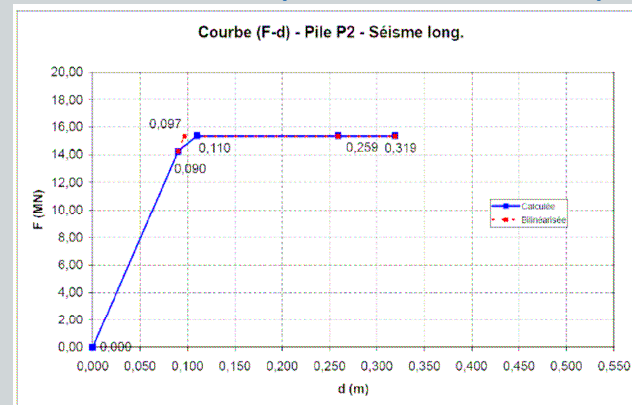


Figure 27: Spectre de réponse élastique en déplacement

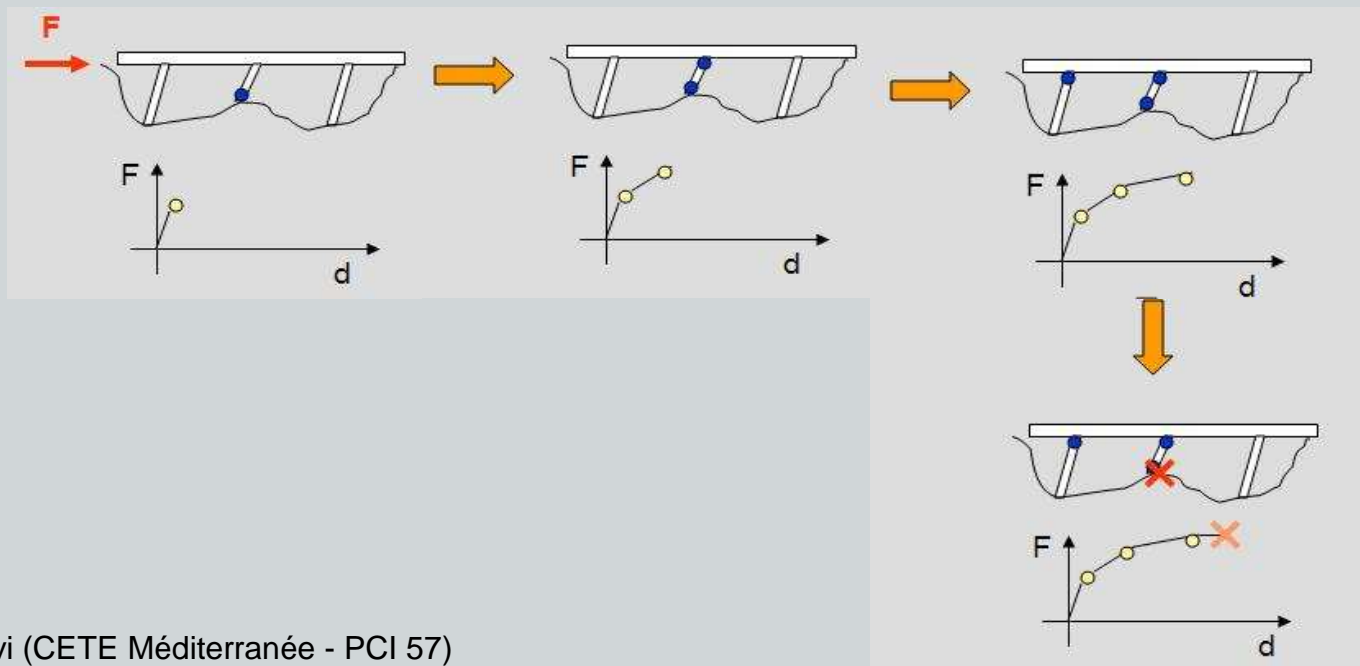


Comparaison des différentes méthodes de calcul de l'EC8-2 sur un cas théorique

- Méthodes d'analyse testées

3- Méthode Push-over « simplifiée » (selon EC8-2 annexe H) :

- Redistributions des efforts après plastifications successives des rotules plastiques
- Analyse selon le 1^{er} mode propre de vibration
- Déplacement sollicitant évalué à partir de la raideur initiale fissurée (hyp. iso-déplacement)



Comparaison des différentes méthodes de calcul de l'EC8-2 sur un cas théorique

- Méthodes d'analyse testées

4- Méthode Push-over « sophistiquée » (selon littérature scientifique) :

- Analyse selon mode équivalent SRSS
- Prise en compte de l'évolution du mode avec le niveau d'endommagement
- Déplacement sollicitant évalué à partir du « point de fonctionnement »
(raideur sécante équivalente et amortissement équivalent évalués de manière itérative)

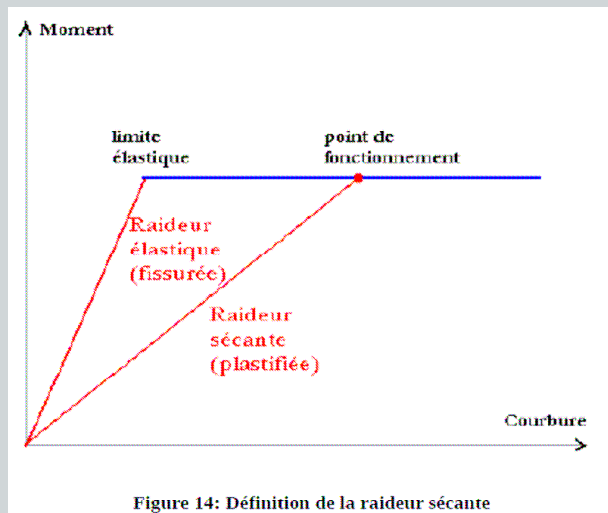


Figure 14: Définition de la raideur sécante

$$\xi_{eq} = 0.05 + \frac{1}{\pi} \left(1 - \frac{1-0.03}{\sqrt{\mu_d}} - 0.03\sqrt{\mu_d} \right) \geq 0.05$$

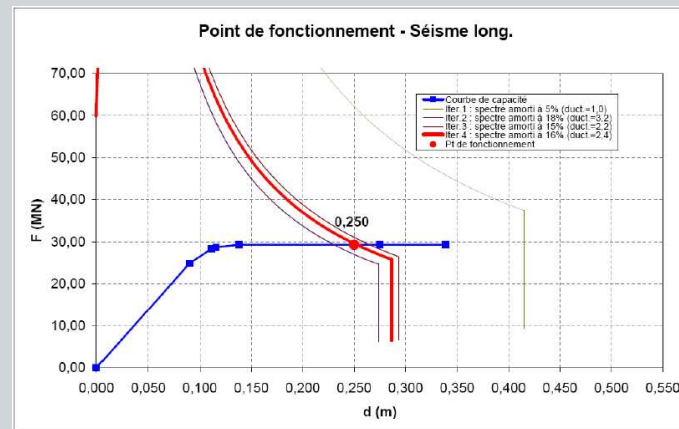


Figure 45: Détermination du point de fonctionnement (séisme longitudinal)



Comparaison des différentes méthodes de calcul de l'EC8-2 sur un cas théorique

- Méthodes d'analyse testées

5- Analyse dynamique temporelle non-linéaire :

- Sollicitation introduite sous forme d'accélérogramme (séisme Martinique 29 nov. 2007, M=7,4)
- Recours à un logiciel spécifique (SAP2000®)

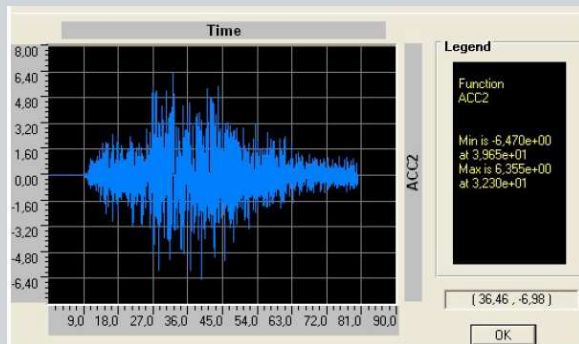


Figure 51: Accélérogramme de calcul

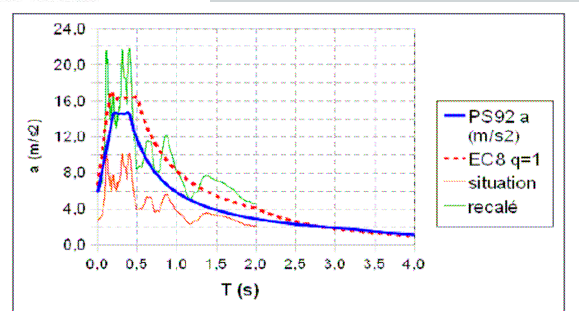
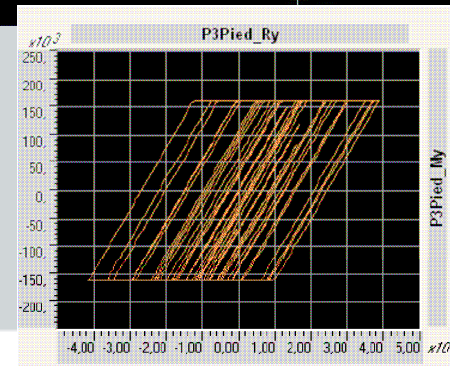
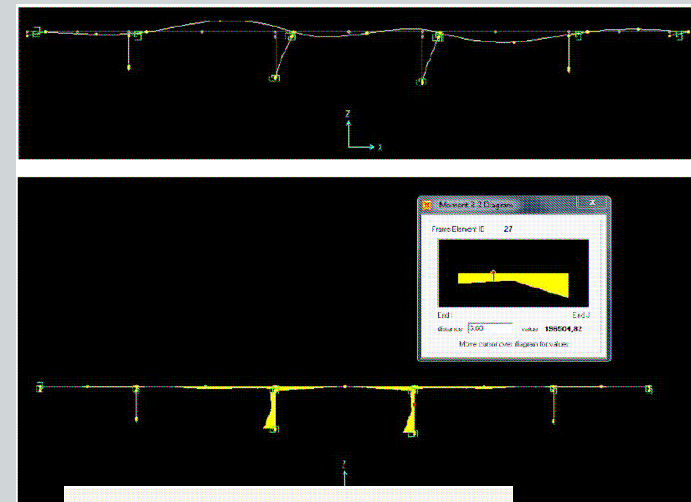
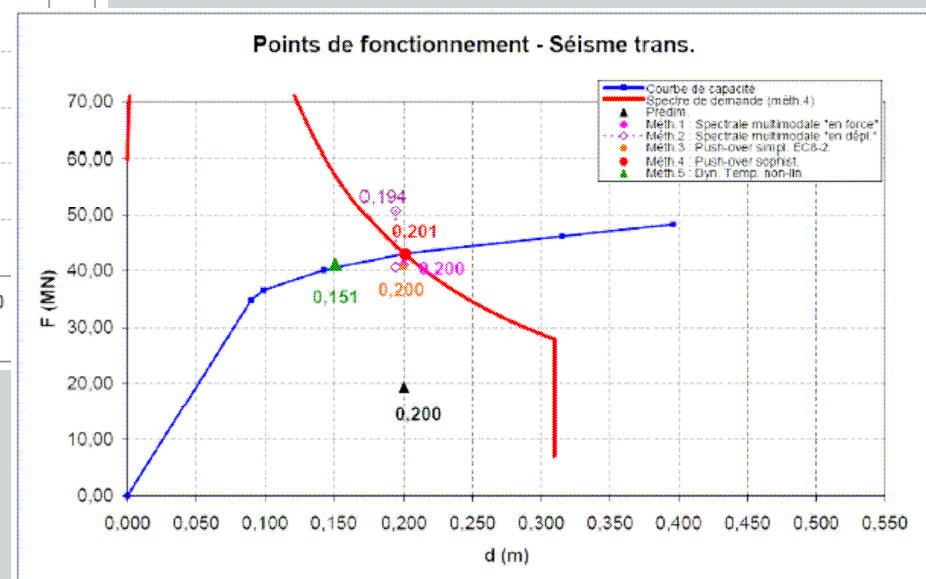
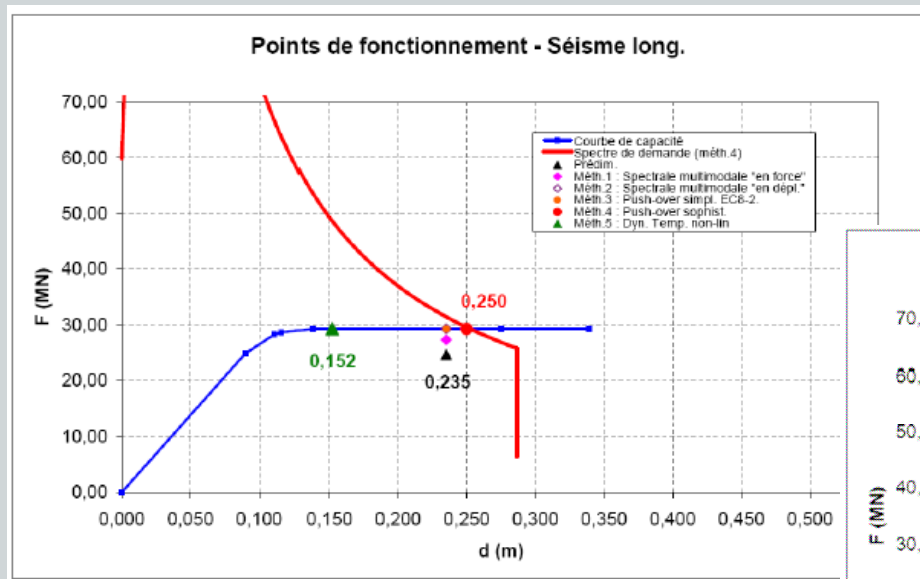


Figure 28: Superposition des spectres : réglementaires PS92, situation d'origine, et de calcul



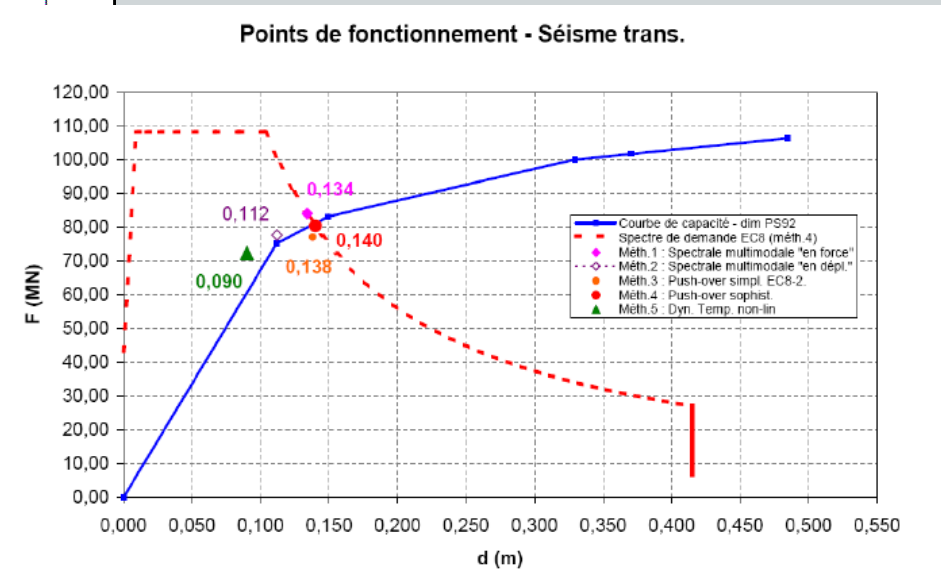
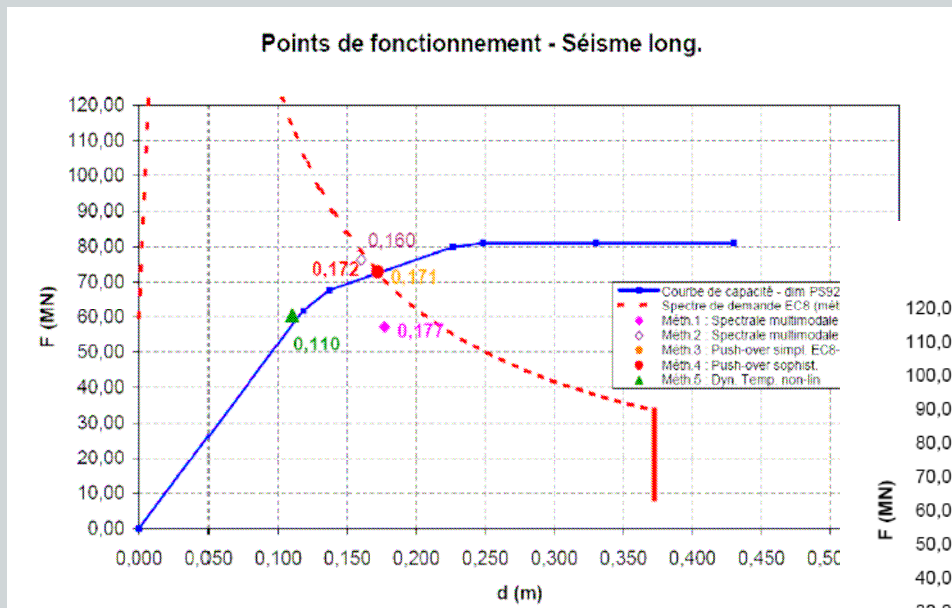
Comparaison des différentes méthodes de calcul de l'EC8-2 sur un cas théorique

- Principaux résultats
 - Conception ductile, dimensionnement et sollicitations EC8



Comparaison des différentes méthodes de calcul de l'EC8-2 sur un cas théorique

- Principaux résultats
 - Conception ductile, dimensionnement et sollicitations PS92



Comparaison des différentes méthodes de calcul de l'EC8-2 sur un cas théorique

- Analyse des sources de divergence des méthodes

Approximations de calcul ou hypothèses simplificatrices	Effets (niveaux d'imprécision constatés)	Méth. 1 : Spectrale multimodale « en force »	Méth. 2 : Spectrale multimodale « en dépla. »	Méth. 3 : Push-over « simplifié » EC8-2	Méth. 4 : Push-over sophistiqué	Méth. 5 : Dynamique temporelle non-linéaire				
1. Évaluation forfaitaire courbure élastique ϕ_y selon formule empirique : $\phi_y=2,1 \cdot \epsilon_y/d$	<p>Dépla élast d_y : -10% à +36%</p> <p>Inertie fiss J_{eff} : -25% à -19%</p> <p>Périodes T : +10%</p> <p>Dépla sism d_{Ed} : +10% (tablier) à +20% (piles isolées)</p> <p>Duct. appelée μ_{Ed} : -27% à +23%</p> <p>Efforts sism F_{Ed}, M_{Ed} : -10% (tablier) à 0% (piles isolées)</p>	X								
2. Majoration forfaitaire de l'inertie fissurée pour tenir compte de la partie de pile non fissurée : $J_{eff}=1,2 \cdot M_{Rd}/E_c \cdot \phi_y$ (méth. 1) ou prise en compte de l'inertie brute en dehors des zones de rotules plastiques potentielles (méth. 5)	<p>Inertie fiss J_{eff} : +20%</p> <p>Périodes T : -10,5%</p> <p>Dépla sism d_{Ed} : -10,5% à -30% (tablier et rotules plastiques) ; -33% (piles isolées)</p> <p>Efforts sism F_{Ed}, M_{Ed} : 0% (piles isolées) à +12% (tablier)</p> <p>+ Incohérence entre $(F/d)_{modèle}$ et $(M_{Rd}/H)/d_y$</p>	X				X				
		Cumul 1 + 2								
						<p>Dépla élast d_y : -10% à +36%</p> <p>Inertie fiss J_{eff} : -10% à -3%</p> <p>Périodes T : +3%</p> <p>Dépla sism d_{Ed} : $\leq +4\%$</p> <p>Duct. appelée μ_{Ed} : -27% à +11%</p> <p>Efforts sism F_{Ed}, M_{Ed} : -4% (tablier) à 0% (piles isolées)</p> <p>+ Incohérence entre $(F/d)_{modèle}$ et $(M_{Rd}/H)/d_y$</p>	X			

Comparaison des différentes méthodes de calcul de l'EC8-2 sur un cas théorique

- Analyse des sources de divergence des méthodes

Approximations de calcul ou hypothèses simplificatrices	Effets (niveaux d'imprécision constatés)	Méth. 1 : Spectrale multimodale « en force »	Méth. 2 : Spectrale multimodale « en dépla. »	Méth. 3 : Push-over « simplifié » EC8-2	Méth. 4 : Push-over sophistiqué	Méth. 5 : Dynamique temporelle non-linéaire
3. Application d'une réduction uniforme des efforts élastiques (divisés par q)	Efforts sism F_{Ed}, M_{Ed} : -21% à +16%	X				
4. Déplacement global équivalent associé au dépl. au centre de masse	$d_{global\ équivalent} < 4\%$ environ dans la direction transversale	X		X		
5. Hypothèse d'iso-déplacement	Estimation erronée des déplacements plastiques si $q > 1$ et $T < 1,25 T_c$ -20% à -30% (ex : piles P1 ,P4 direction longitudinale) Minoration du déplacement longitudinal global du tablier de l'ordre de 6%		X	X		
6. Modes supérieurs non pris en compte (approche monomodale)	$\leq 1,5\%$ (longitudinal) $\leq 9\%$ (transversal)			X		
Approximations de calcul ou hypothèses simplificatrices	Effets (niveaux d'imprécision constatés)	Méth. 1 : Spectrale multimodale « en force »	Méth. 2 : Spectrale multimodale « en dépla. »	Méth. 3 : Push-over « simplifié » EC8-2	Méth. 4 : Push-over sophistiqué	Méth. 5 : Dynamique temporelle non-linéaire
7. Non prise en compte des redistributions d'efforts internes	Capacité déformations ultimes : -6% à -8% Efforts sism F_{Ed}, M_{Ed} : -3% à +3% Surévaluation du nbre de rotules plastifiées selon la direction transversale	X	X			(X) (effet des variations d'effort normal sur le moment plastique des rotules)
8. Non prise en compte de l'évolution des caractéristiques modales en fonction du niveau d'endommagement	$\leq 1,5\%$ (longitudinal) $\leq 9\%$ (transversal)	X	X	X		
9. Représentativité de l'échantillon de signaux choisi par rapport au spectre enveloppe réglementaire	Variable selon le nombre et la nature des accélérogrammes retenus ici, pour 1 seul accéléro : -20% environ sur les déplacements sollicitants					X

Comparaison des différentes méthodes de calcul de l'EC8-2 sur un cas théorique

- Analyse des sources de divergence des méthodes

Des écarts à relativiser...

- Hypothèses de modélisation basées sur des fondements théoriques sensiblement différents
- Incertitudes intrinsèques à la caractérisation de l'aléa de départ (occurrence, localisation, intensité...)

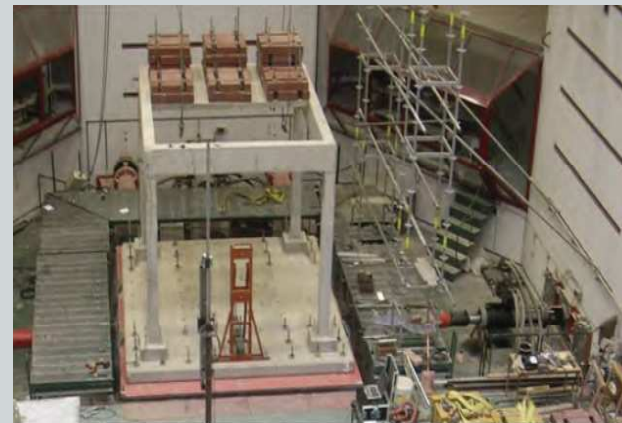
➡ Représentation nécessairement « conventionnelle » de l'aléa sismique : niveaux de risque acceptés associés à des valeurs de périodes de retour en fonction des enjeux portés par les constructions

- Incertitudes liées à la compréhension du comportement structurel (dynamique et non-linéaire) :

Ex : Blind Test Challenge (15th WCEE, Lisbonne 2012)

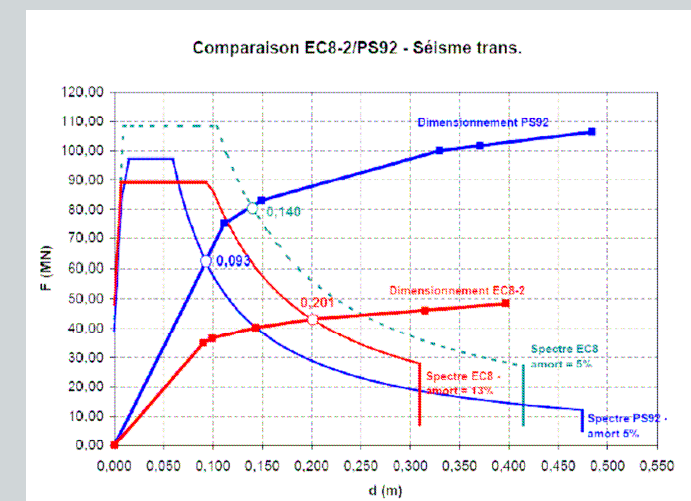
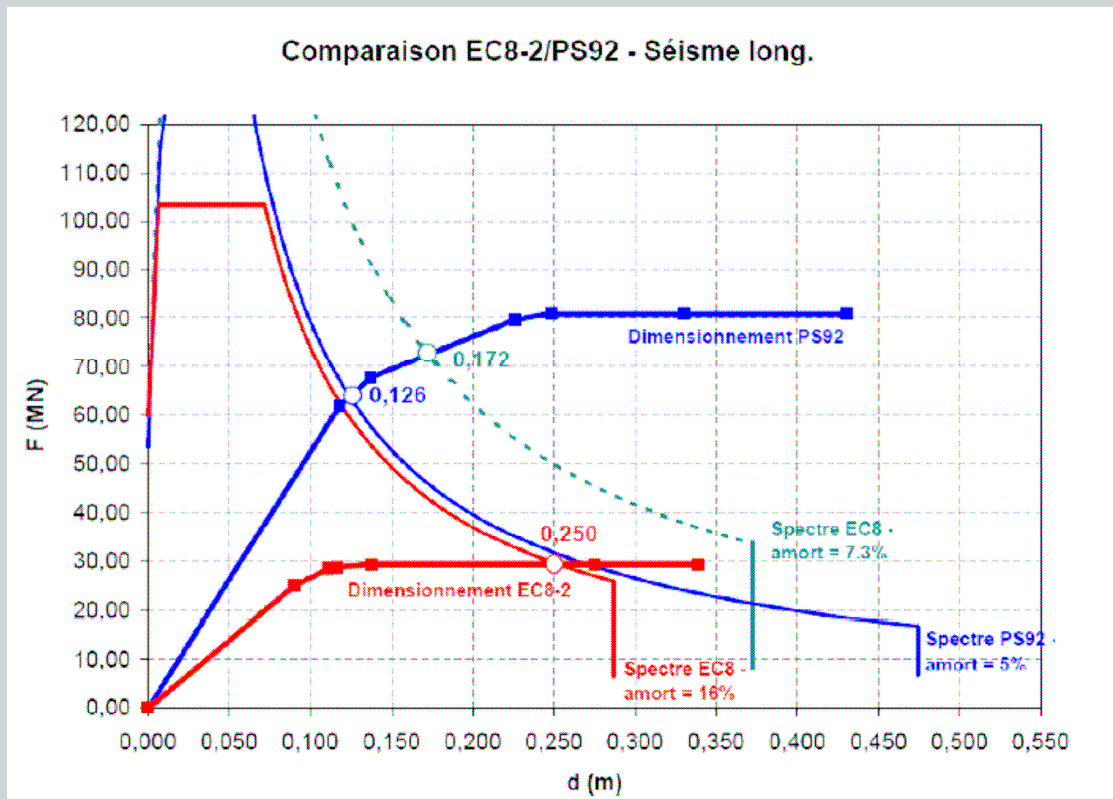
Équipe vainqueur :

- Structure élastique : erreur > 30% !
- Structure ductile : erreur > 50% !!



Comparaison des différentes méthodes de calcul de l'EC8-2 sur un cas théorique

- Conséquences de l'évolution de la réglementation



Comparaison des différentes méthodes de calcul de l'EC8-2 sur un cas théorique

- **Approfondissements théoriques**
 - Limites théoriques intrinsèques des différentes méthodes d'analyse
 - Explorations scientifiques relatives à la modélisation de certains paramètres de calcul :
 - Inertie fissurée
 - Lois moment-courbure cycliques
 - Amortissement hystérétique
 - Longueurs de rotules plastiques

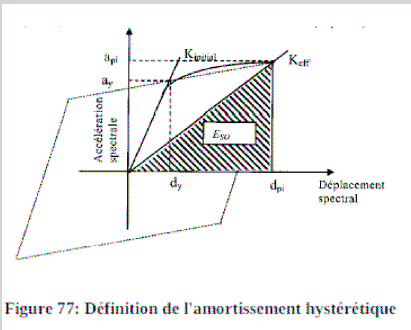


Figure 77: Définition de l'amortissement hystérétique

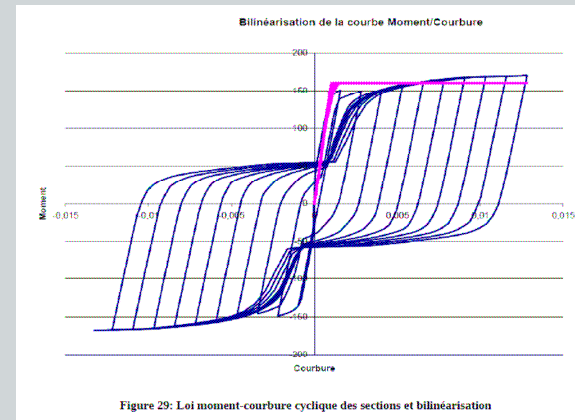
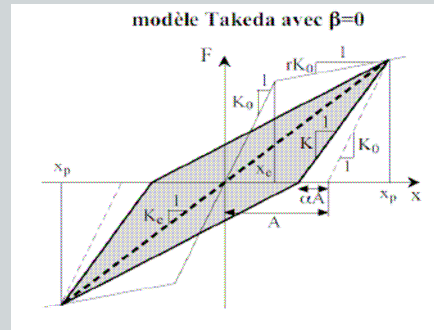
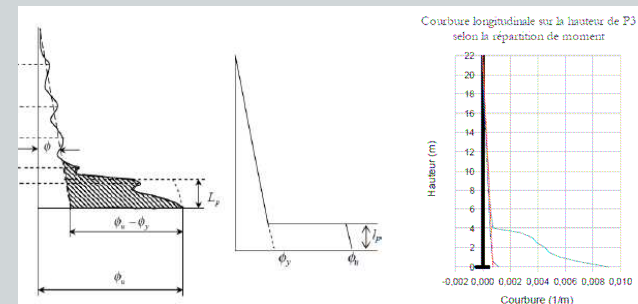
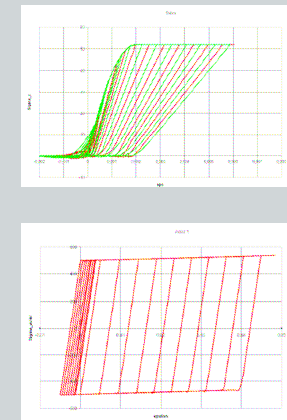


Figure 29: Loi moment-courbure cyclique des sections et bilinéarisation



Comparaison des différentes méthodes de calcul de l'EC8-2 sur un cas théorique

- Valorisations de l'étude

- 3 rapports d'études produits (*resp. 118 p, 109 p et 84 p*)
- Présentations conférences et journées techniques
 - Journée AFPS « REX EC8 » et Colloque national AFPS 2011
 - JOA Marseille 2011 (*phase 1 : Prédimensionnement des OA*) et JOA Dijon 2013 (*Phases 2 et 3*)
- Formations données
 - Encadrement 2 TFE + Master
 - PFC « Eurocode 8-2 » - *Exercice pratique*
 - JT Cotita « *Prise en compte du risque sismique sur les OA* »
- Guide Sétra « *Ponts en zone sismique - Conception et dimensionnement selon l'Eurocode 8* »
- Propositions de modification de la norme EC8-2 (*cadre groupe reflet national + rép. enquête AFNOR NF EN1998-2/NA*)
 - Amélioration de la cohérence dans la prise en compte de l'inertie fissurée (*valeur + étendue*)
 - Proposition d'une méthode push-over alternative



Mes commentaires sur l'enquête

PR NF EN 1998-2/NA Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 2 : Ponts - Annexe nationale à la NF EN 1998-2:2006 - Ponts



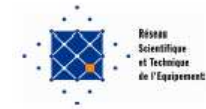
Comparaison des différentes méthodes de calcul de l'EC8-2 sur un cas théorique

- Perspectives / suites à donner

(dans le cadre de la même OR 2011-2014)

- Poursuite de l'étude sur le même exemple théorique
 - Analyse ouvrage supposé de conception élastique en Métropole
 - Analyse ouvrage conception avec amortisseurs situé aux Antilles
- Poursuite des comparaisons PS92 / EC8-2 sur des cas d'ouvrages réels
 - Ouvrages de différentes typologies (notamment OA courants) conçus et dimensionnés aux PS92
 - Différents contextes sismiques
- Apport des méthodes instrumentales pour l'analyse dynamique sismique des OA...





Comparaison des différentes méthodes de calcul de l'EC8-2 sur un cas théorique

Merci pour votre attention

