

Journées techniques
organisées avec l'appui du Sétra
et sous l'égide de la CoTITA

PRISE EN COMPTE DU RISQUE SISMIQUE

Mardi 27 mars 2012
Lundi 2 et mardi 3 avril 2012

CETE Méditerranée, Aix-en-Provence



Journées techniques
organisées avec l'appui du Sétra
et sous l'égide de la CoTITA

PRISE EN COMPTE DU RISQUE SISMIQUE

Conception parasismique des ponts (2/2)

- Dispositions constructives parasismiques
- Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

Denis DAVI
CETE Méditerranée



Conception parasismique des ponts (2/2)

Plan de l'exposé

- Dispositions constructives parasismiques
 - De l'importance des dispositions constructives
 - Définition des zones critiques
 - Prescriptions réglementaires
 - Exemples de schémas de détails pour différentes parties d'ouvrages
- Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

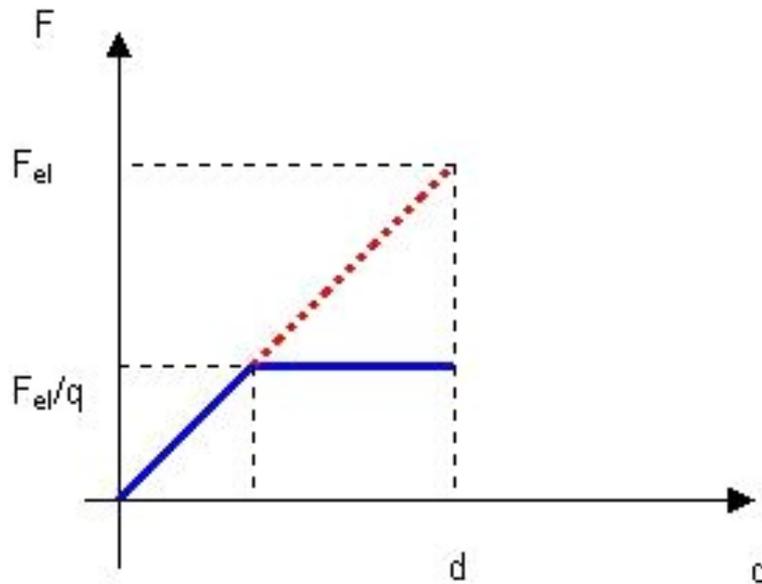


Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- De l'importance des dispositions constructives...

Coefficient de comportement et notion de ductilité



Sollicitation = Déformation

- Réduction et écrêtage des efforts et des coûts

- Dissipation d'énergie par hystérésis

Capacité de déformation plastique à garantir = **DUCTILITE**



Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- De l'importance des dispositions constructives...

Coefficient de comportement et notion de ductilité

Type d'éléments	Coeff. de comportement q
Piles en béton armé :	
Piles verticales fléchies	3,5 $\lambda (\alpha_s)$
Structures inclinées fléchies	2,1 $\lambda (\alpha_s)$
Piles en acier :	
Piles verticales fléchies	3,5
Structures inclinées fléchies	2,0
Piles contreventées	2,5
Piles à contreventement excentré	3,5
Culées rigidement fixées au tablier	
Cas général	1,5
Encastrées dans le tablier	1,0
Arches	2,0

Applicable uniquement à condition de mettre en œuvre des dispositions particulières ...

EC8-2 tableau 4.1

$\lambda (\alpha_s)$: coefficient réducteur pour les piles courtes

Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- De l'importance des dispositions constructives...

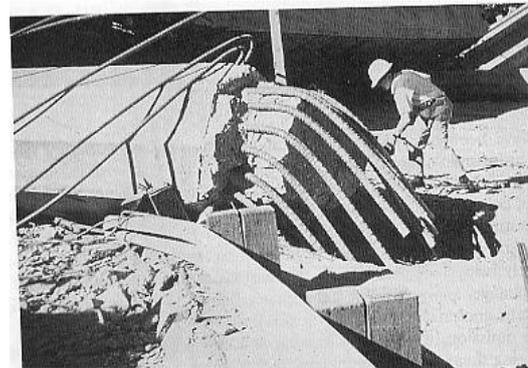
Coefficient de comportement et notion de ductilité

Des dispositions particulières destinées à :

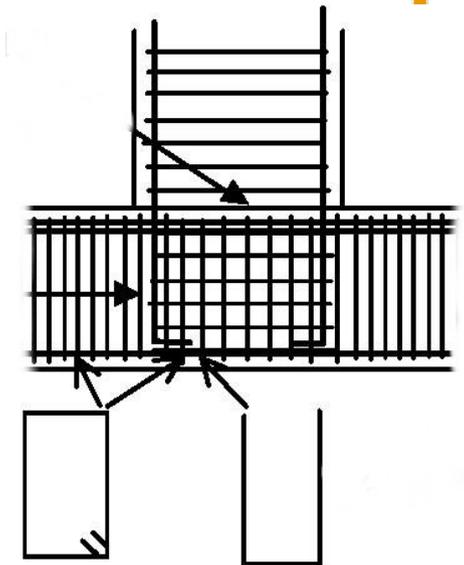
- supprimer tout risque de rupture fragile



Recouvrements interdits
dans les zones plastiques



Dispositions d'ancrage des
armatures longitudinales



EC8-2 fig. 5.3

Conception parasismique des ponts (2/2)

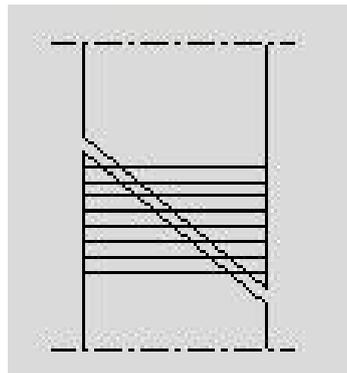
Dispositions constructives parasismiques

- De l'importance des dispositions constructives...

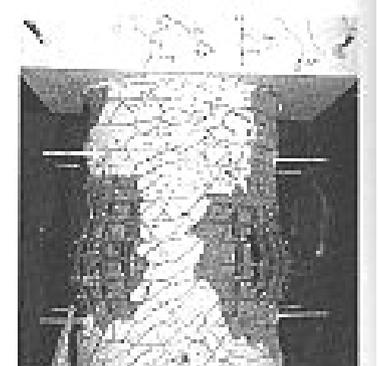
Coefficient de comportement et notion de ductilité

Des dispositions particulières destinées à :

- supprimer tout risque de rupture fragile



Densité importante d'armatures d'efforts tranchants



Dispositions anti-flambement

Conception parasismique des ponts (2/2)

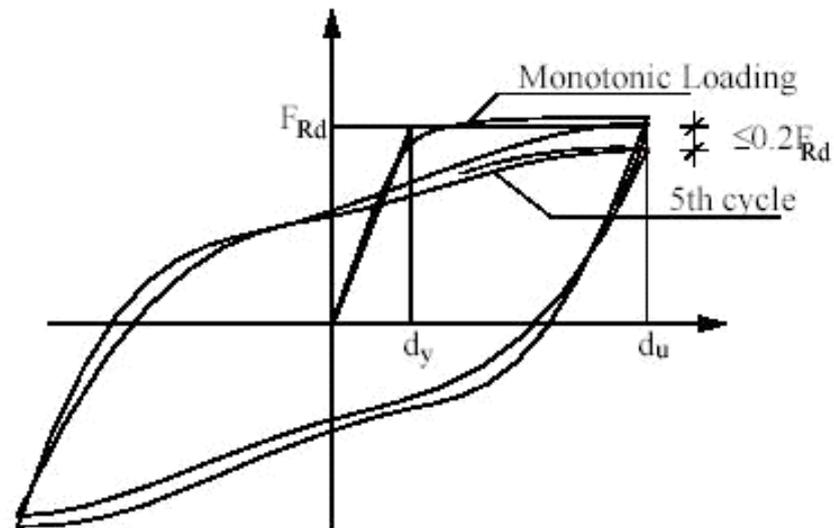
Dispositions constructives parasismiques

- De l'importance des dispositions constructives...

Coefficient de comportement et notion de ductilité

Des dispositions particulières destinées à :

- conférer une ductilité d'ensemble



Ductilité structurelle au cours de cycles de chargement alternés

EC8-2 fig. 2.2

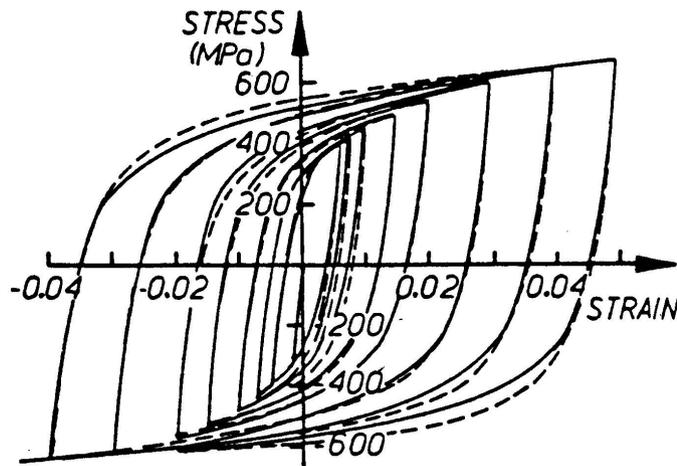
Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- De l'importance des dispositions constructives...

Coefficient de comportement et notion de ductilité

Ductilité de l'acier



Essais cycliques sur l'acier des armatures

⇒ Acier de **classe C** ($\epsilon_{su} = 75 \text{ ‰}$)
dans les zones potentielles de
rotules plastiques

(de classe B ailleurs)

EC8-2 § 5.2.1



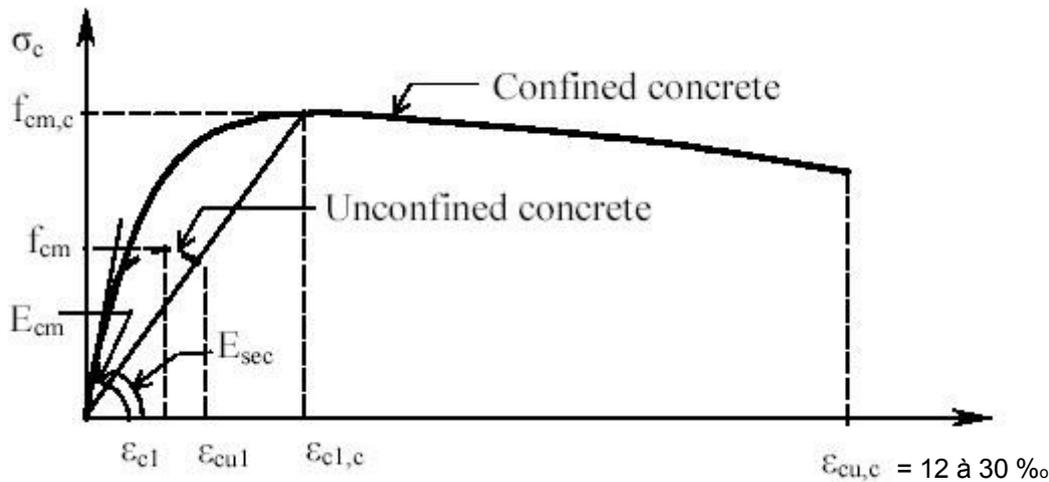
Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- De l'importance des dispositions constructives...

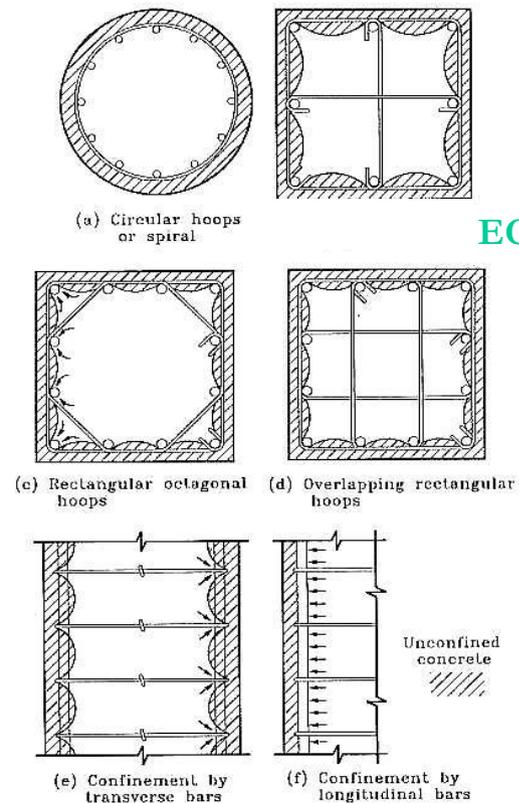
Coefficient de comportement et notion de ductilité

Ductilité du béton confiné



Relation $\sigma - \epsilon$ pour le béton confiné

EC 8-2 Annexe E



EC8-2 fig. 6.1

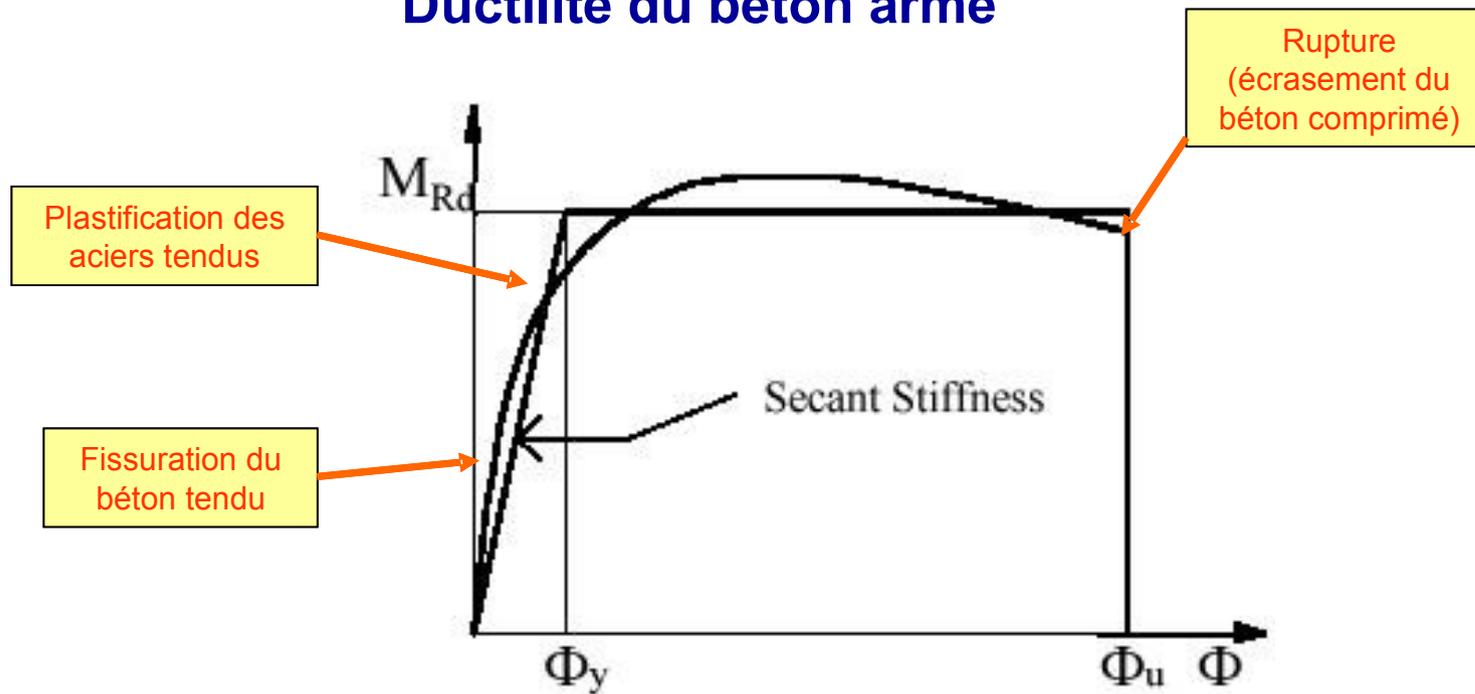
Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- De l'importance des dispositions constructives...

Coefficient de comportement et notion de ductilité

Ductilité du béton armé

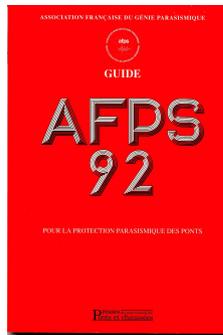


Loi moment – courbure

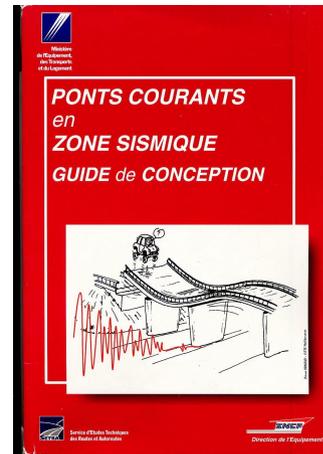
Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

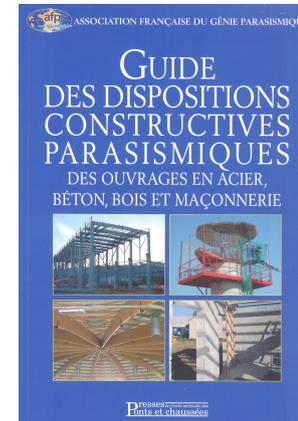
- De l'importance des dispositions constructives...
 - L'application de dispositions constructives adéquates a été identifiée comme un des facteurs essentiels du bon comportement sismique des structures



Le « guide AFPS 92 pour la protection parasismique des ponts »



Le guide de conception Sétra / SNCF « Pontes courants en zone sismique »



Le guide AFPS des dispositions constructives parasismiques

- Hypothèse de base à tous les concepts et méthodes d'analyses permettant d'appréhender le comportement sismique des structures (rotules plastiques, ductilité, plasticité, dissipation d'énergie, coefficient de comportement, push-over, amortissement structurel...)

Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- De l'importance des dispositions constructives...

Règles de base pour un bon comportement sismique des structures

Par ordre d'importance :

1. Une conception saine et « régulière »

(Régularité des hauteurs de pile, symétrie, absence de biais ou de courbure, redondance des éléments résistants...)

- Permet une bonne maîtrise du comportement dynamique global
- Garantit une meilleure fiabilité des modèles et hypothèses de calcul

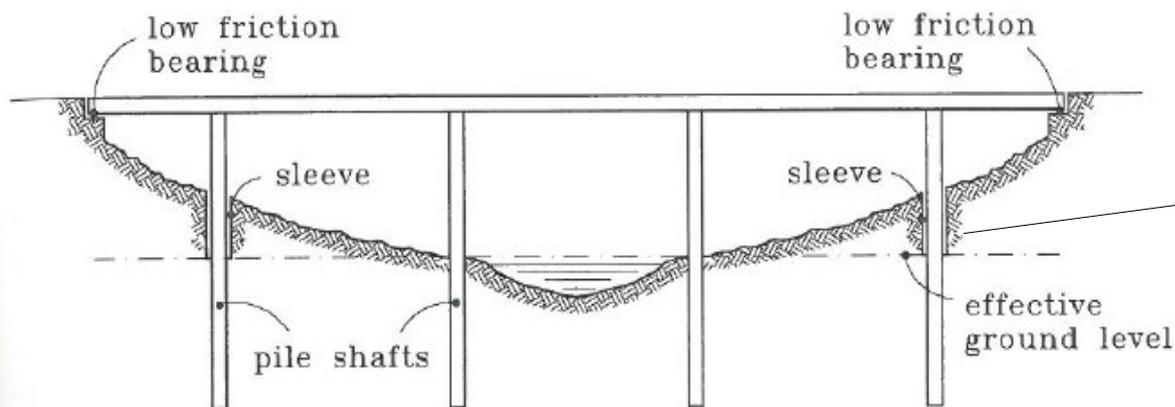


FIG. 3.2 Sleeving of short piers to regularize pier stiffness.



Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

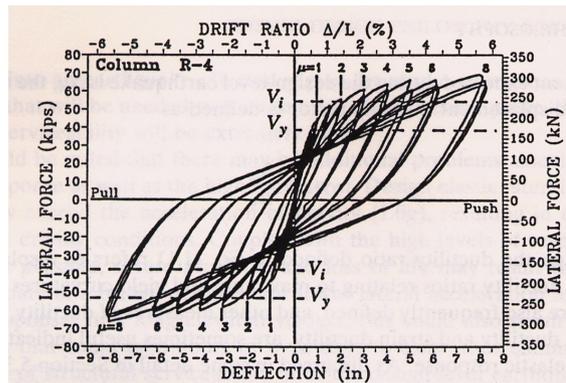
- De l'importance des dispositions constructives...

Règles de base pour un bon comportement sismique des structures

Par ordre d'importance :

2. Des dispositions constructives adéquates

- Garantit un bon comportement local des éléments de structure
- Favorise une ductilité globale
- Assure une certaine marge de sécurité en cas de dépassement du séisme de référence réglementaire



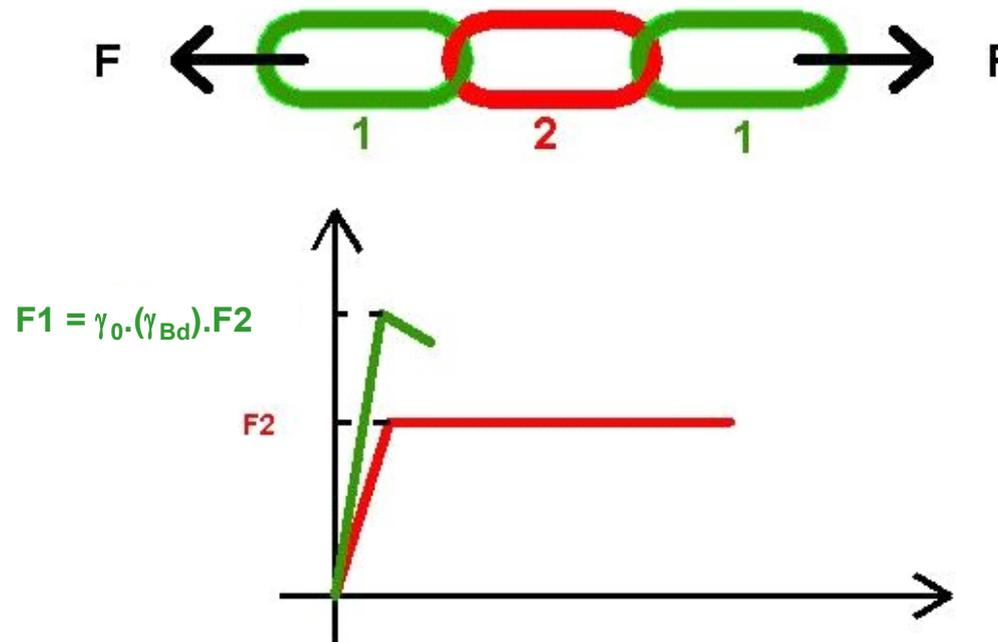
3. Validité des hypothèses de calculs, représentativité des modèles, qualité des analyses et pertinence du dimensionnement

Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Définition des zones critiques

Dimensionnement en capacité et localisation des rotules plastiques



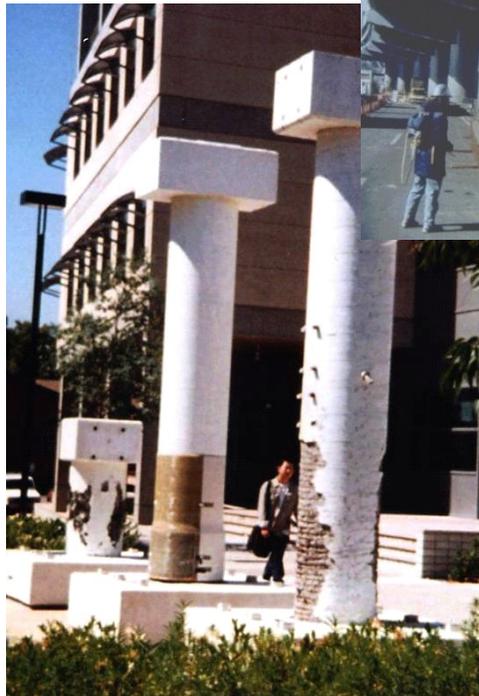
Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Définition des zones critiques

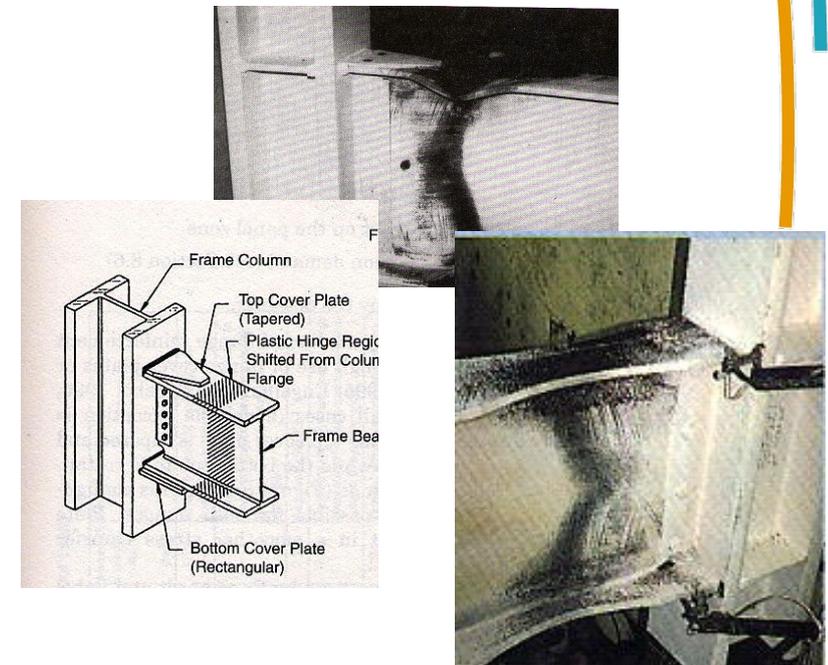
Dimensionnement en capacité et localisation des rotules plastiques

EC8-2 §2.3 et §5



Cas des piles de ponts

EC8-2 §2.3.2



Cas des éléments métalliques

EC8-2 §5.7

Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Définition des zones critiques

EC8-2 §6

Régions dans lesquelles des rotules plastiques sont susceptibles de se former :

- Zones de concentration d'efforts sismiques (moments fléchissants)
- Régions d'extrémités de poutres et de poteaux
- Zones de sections réduites
- interfaces des couches de sol ayant des modules de cisaillement sensiblement différents (cas des fondations profondes)

➔ Etendue des zones dans lesquelles des dispositions constructives particulières (confinement, dispositions anti-flambement...) doivent être adoptées.

Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

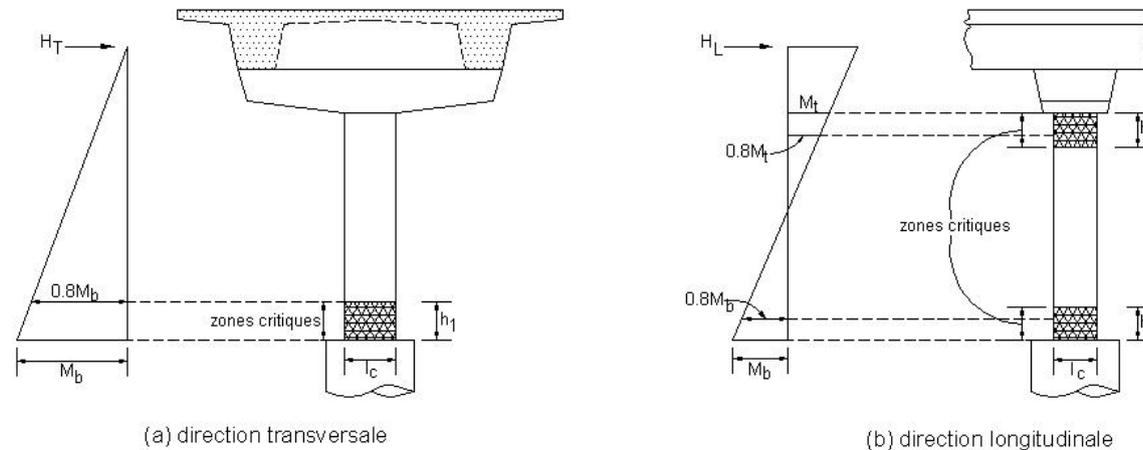
- Définition des zones critiques

Étendue des zones critiques (*dites zones de rotules plastiques potentielles*) pour les structures ductiles

- cas où $n_k = N_{Ed} / A_c \cdot f_{ck} \leq 0,3$

EC8-2 §6.2.1.5

$L_h = \max \{ \text{épaisseur de la section de pile dans le plan de flexion } (\perp \text{ axe de rotation})$
 $\{ \text{distance entre point de } M_{\max} \text{ et point de } 0,8 M_{\max}$



Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Définition des zones critiques

Étendue des zones critiques (*dites zones de rotules plastiques potentielles*)
pour les structures ductiles

- cas où $0,3 < n_k = N_{Ed} / A_c \cdot f_{ck} \leq 0,6$

EC8-2 §6.2.1.5

L_h majorée de 50% par rapport au cas précédent

Au-delà de la zone critique L_h , la quantité d'armatures transversales peut être réduite progressivement. Néanmoins, elle doit rester supérieure à 50% de la quantité requise dans la zone critique dans la zone directement adjacente à cette zone, sur une longueur supplémentaire de L_h (cf. EC8-2, § 6.2.1.5(4))

Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Définition des zones critiques

Étendue des zones critiques pour les structures à ductilité limitée

EC8-2 §6.5.1

Toutes les sections pour lesquelles :

$$M_{Rd} / M_{Ed} < 1,30$$

avec : M_{Rd} : moment résistant minimal

M_{Ed} : moment sollicitant maximal

Sous-entend une dispense complète de dispositions constructives spécifiques (hors EC2) en cas de surdimensionnement de 30%...

Non recommandé !

Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Définition des zones critiques

Étendue des zones critiques pour les fondations profondes

EC8-2 §6.4.2

En cas de difficulté rédhibitoire à dimensionner en élasticité les fondations profondes (impossibilité de ferrailage, plastification des sols inévitable...), sont à considérer systématiquement comme zones critiques les régions suivantes :

- têtes de pieux sur une profondeur de 3 diamètres à partir de l'encastrement dans la semelle
- longueur de 2 diamètres de part et d'autre des zones de moment maximum
- longueur de 2 diamètres de part et d'autre des zones d'interface de couches de sol ayant des déformabilité au cisaillement sensiblement différentes

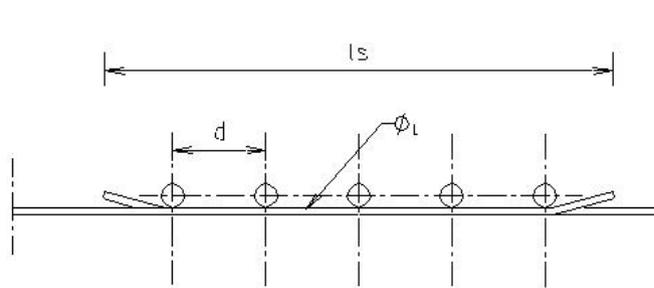
Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Prescriptions réglementaires

Dispositions relatives aux armatures longitudinales

Continuité - recouvrement



Longueur de recouvrement des armatures

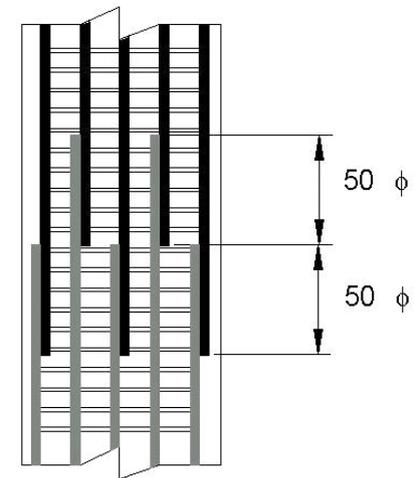
Φ_L : armatures principales.

l_s : longueur de recouvrement.

$$l_s = 1,30 \cdot 40 \Phi_L = 50 \Phi_L$$

d : écartement armatures de couture.

$$d < 12 \Phi_L$$



Généralement couvert par les prescriptions de l'EC2

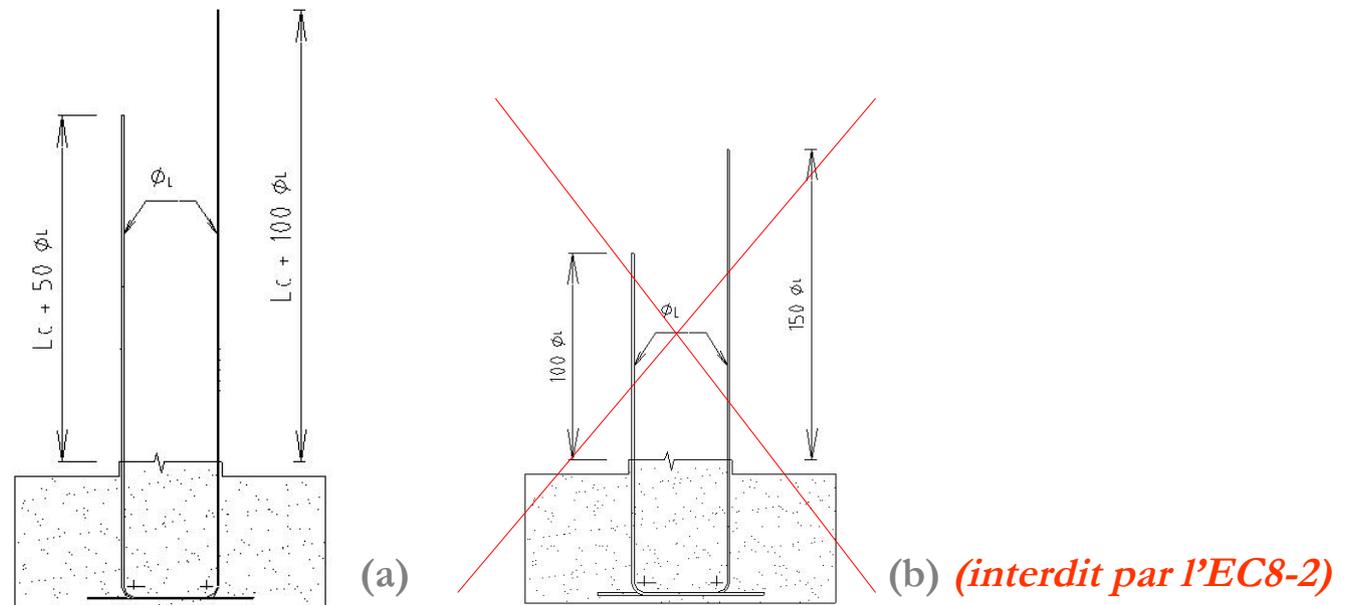
Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Prescriptions réglementaires

Dispositions relatives aux armatures longitudinales

Continuité - recouvrement



Ancrage des piles dans les semelles de fondation

- Recouvrement hors zone critique
- Recouvrement en zone critique

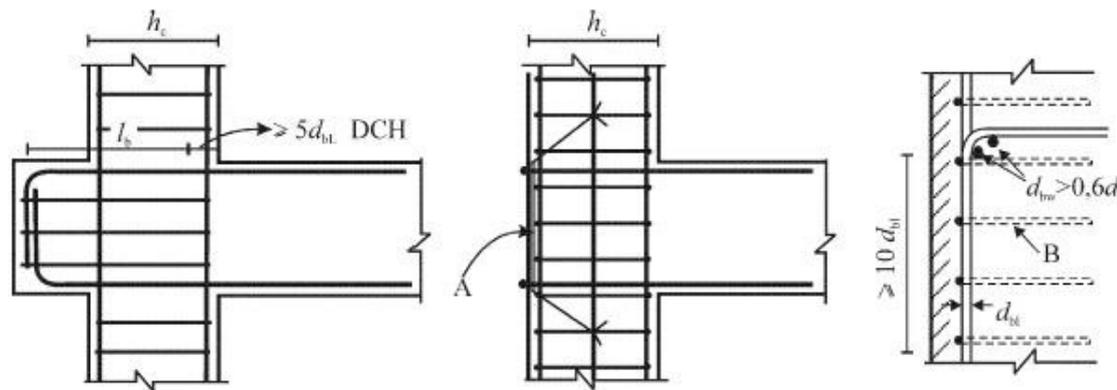
Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Prescriptions réglementaires

Dispositions relatives aux armatures longitudinales

Ancrage des armatures d'extrémité



Légende :

A : plaque d'ancrage

B : armatures de confinement autour des armatures du poteau

(EC8-1, fig. 5.1.3)

Dispositions complémentaires pour l'ancrage des armatures d'extrémité applicables par exemple aux piles-portiques

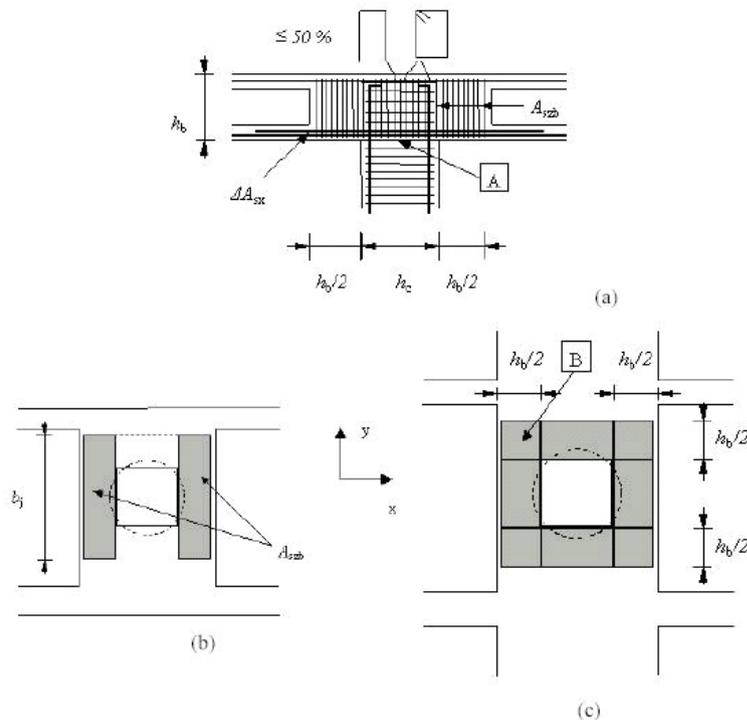
Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Prescriptions réglementaires

Dispositions relatives aux armatures longitudinales

Ancrage des armatures d'extrémité



Dispositions particulières relatives au confinement des zones nodales

a) section verticale dans le plan xz

b) vue en plan / rotule plastique selon la direction x

c) vue en plan / rotule plastique selon les directions x et y

Légende

A - Interface "poutre"-poteau

B - Les étriers disposés dans les zones communes sont pris en compte dans les deux directions

(EC8-2, fig. 5.3)

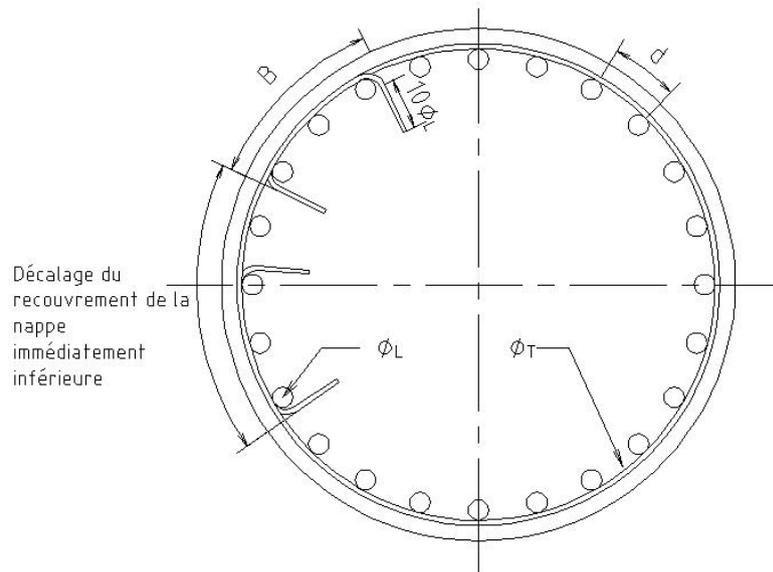
Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Prescriptions réglementaires

Dispositions relatives aux armatures transversales

Recommandations générales



- spires interdites dans les zones critiques
- 1er cours disposé à 50 mm maxi du parement
- possibilité de crochets avec retours respectifs 135° et 90° alternés pour les section à taux de compression $< 30\%$

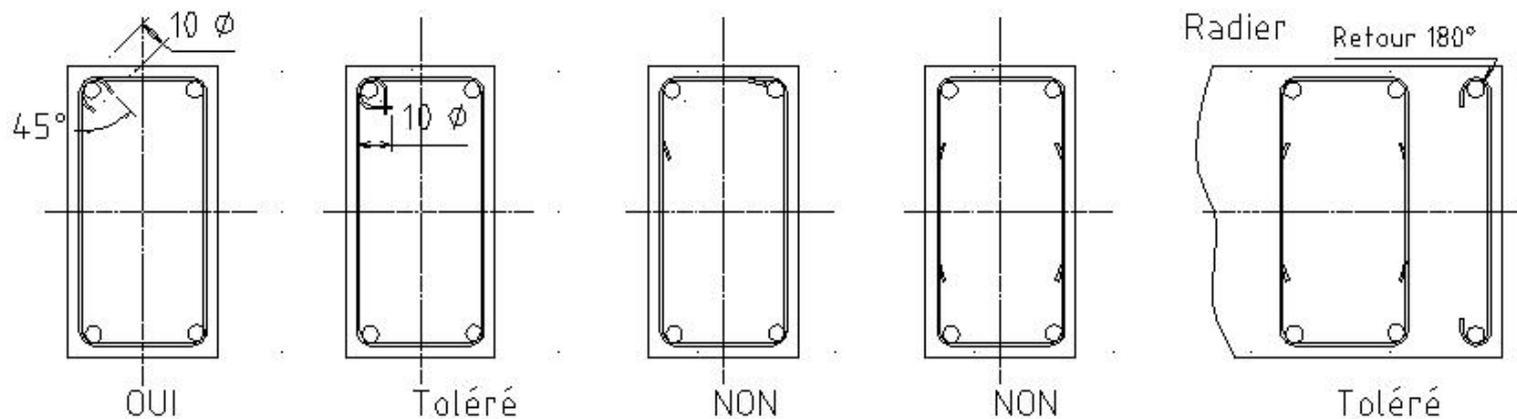
Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Prescriptions réglementaires

Dispositions relatives aux armatures transversales

Recouvrement des armatures en parement



Conception parasismique des ponts (2/2)

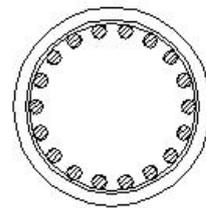
Dispositions constructives parasismiques

- Prescriptions réglementaires

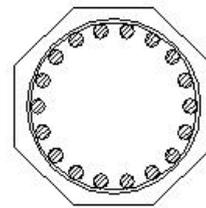
Dispositions relatives aux armatures transversales

Confinement des sections de béton armé (fûts de piles et pieux)

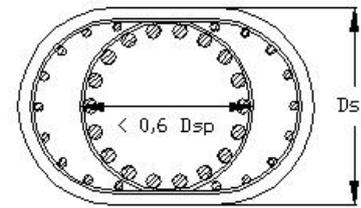
- cas des sections pleines



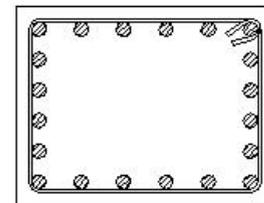
Disposition A (OUI)



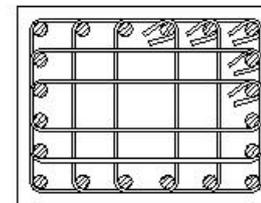
Disposition B (OUI)



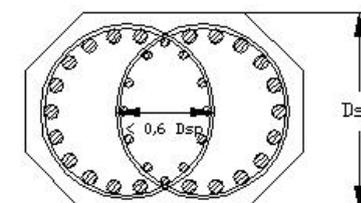
Disposition C (OUI)



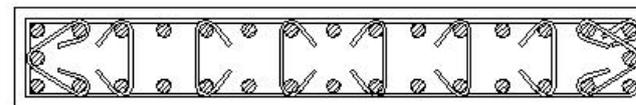
Disposition D (NON)



Disposition E (difficile à mettre en oeuvre)



Disposition F (OUI)



Disposition G (OUI)

Conception parasismique des ponts (2/2)

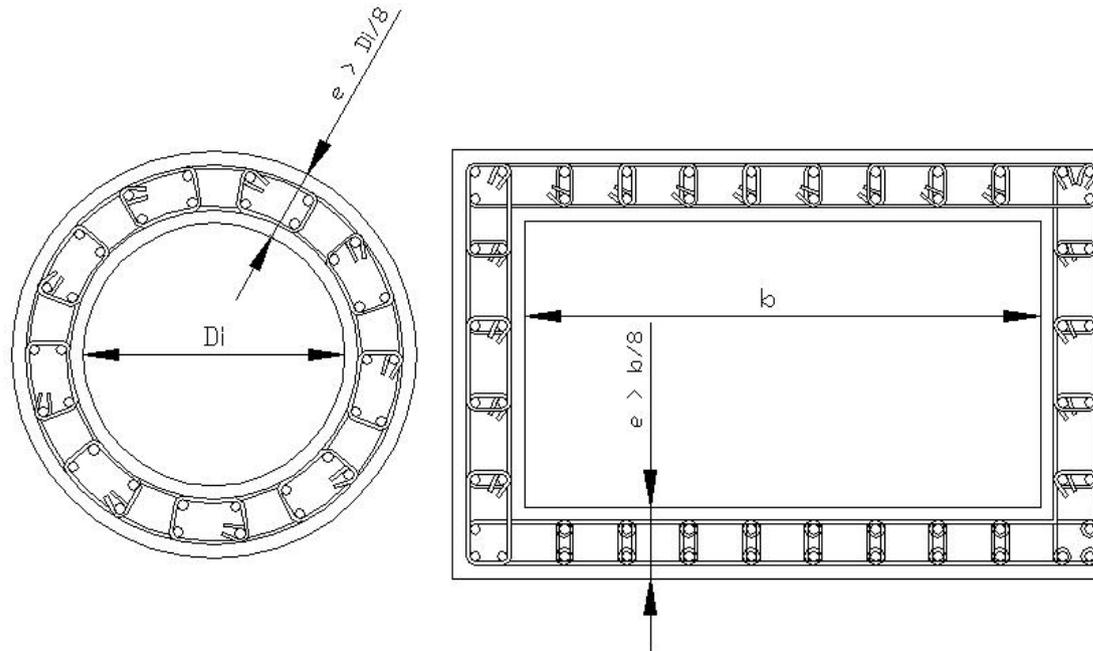
Dispositions constructives parasismiques

- Prescriptions réglementaires

Dispositions relatives aux armatures transversales

Confinement des sections de béton armé (fûts de piles et pieux)

- cas des sections creuses



Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Prescriptions réglementaires

Dispositions relatives aux armatures transversales

Confinement des sections de béton armé (fûts de piles et pieux)

- Quantité d'armatures de confinement minimales

$$\omega_{wd} = \rho_w \cdot f_{yd} / f_{cd} \quad (\text{EC8-2, Eq. 6.3})$$

avec ρ_w : ration volumique

$= A_{sw} / s_L \cdot b$	si sections rectangulaires
$= 4 A_{sp} / D_{sp} \cdot s_L$	si sections circulaires

Cadres : $\omega_{wd,r} > \max (\omega_{w,req}, 2/3 \omega_{w,min})$ (EC8-2, Eq. 6.6)

Cerces : $\omega_{wd,c} > \max (1,4 \omega_{w,req}, \omega_{w,min})$ (EC8-2, Eq. 6.8)

$$\omega_{w,req} = A_c / A_{cc} \lambda \eta_k + 0,13 f_{yd} / f_{cd} (\rho_L - 0,01) \quad (\text{EC8-2, Eq. 6.7})$$

Comportement sismique	λ	$\omega_{w,min}$
Ductile	0,37	0,18
A ductilité limitée	0,28	0,12

(EC8-2, Tab. 6.1)

Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Prescriptions réglementaires

Dispositions relatives aux armatures transversales

Confinement des sections de béton armé (fûts de piles et pieux)

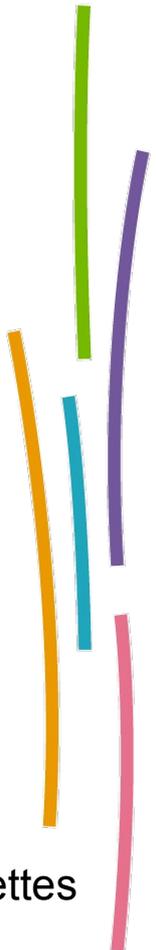
- Quantité d'armatures de confinement minimales

- Espacement longitudinal des cadres et cerces dans les zones critiques :

$$s_L = \min \begin{cases} 6 \times d_{bl} \\ 1/5 \text{ de la dimension minimale du noyau de béton confiné, mesuré à l'axe des frettes} \end{cases}$$

- Espacement transversal entre les côtés des frettes :

$$s_T = \min \begin{cases} 200 \text{ mm} \\ 1/3 \text{ de la dimension minimale du noyau de béton confiné, mesuré à l'axe des frettes} \end{cases}$$



Conception parasismique des ponts (2/2)

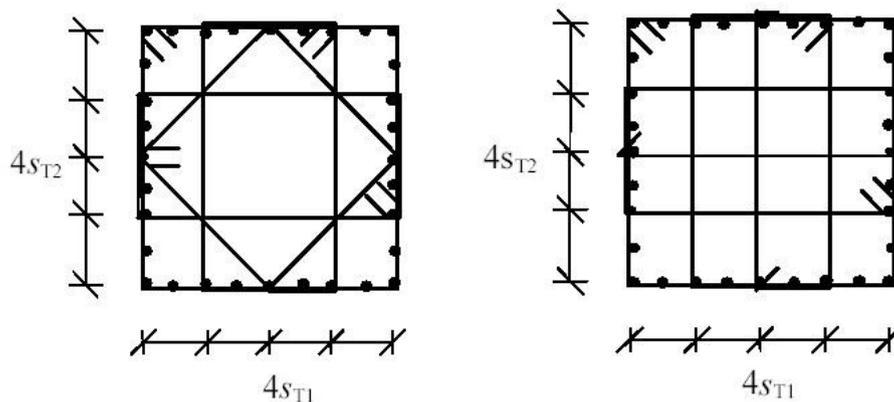
Dispositions constructives parasismiques

- Prescriptions réglementaires

Dispositions relatives aux armatures transversales

Confinement des sections de béton armé (fûts de piles et pieux)

- Quantité d'armatures de confinement minimales



$$s_{t1}, s_{t2} \leq \min \left\{ \begin{array}{l} b_{\min} / 3 \\ 200 \text{ mm} \end{array} \right.$$

(EC8-2, fig. 6.1a)

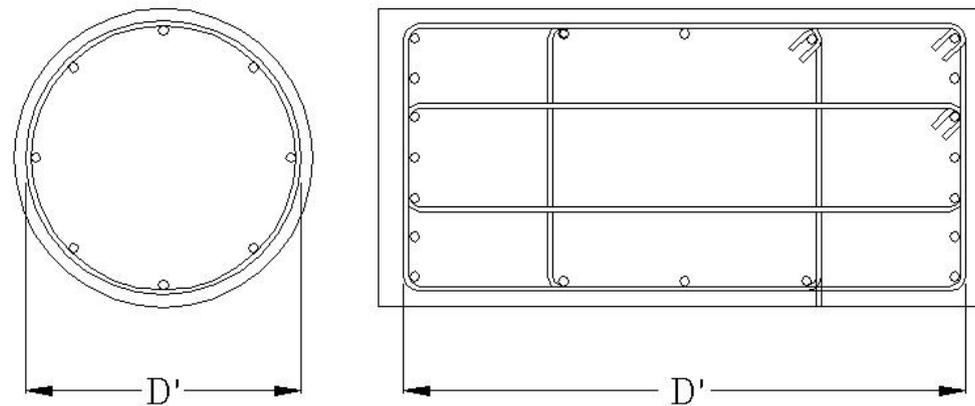
Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Prescriptions réglementaires

Dispositions relatives aux armatures transversales

Tenue des armatures longitudinales



Maintien des armatures longitudinales

a) cas d'un fût circulaire de diamètre $D' \leq 1,50\text{m}$

b) cas d'une section rectangulaire hors zone critique

Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Prescriptions réglementaires

Dispositions relatives aux armatures transversales

Tenue des armatures longitudinales

$$\Rightarrow s \leq \delta d_{bl} \quad \text{avec} \quad 5 \leq \delta = 2,5 f_{tk} / f_{yk} + 2,25 \leq 6$$

(EC8-2, Eq. 6.9)

$$\Rightarrow A_T \geq \frac{\sum A_L f_{ys}}{1,6 f_{yt}} \times S_T$$

(EC8-2, Eq. 6.10)



Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Tableaux récapitulatifs



Noir : EC8-2 Bleu : recommandations inspirées notamment des anciennes règles PS92			Armatures longitudinales				Armatures transversales			
Partie d'ouvrage	Comportement visé	Zones concernées	Section totale	Diamètre Classe de ductilité	Espacement	Recouvrement	Section totale	Diamètre Classe de ductilité	Espacement	Dispositions constructives
Piles	Ductile	Zones rotules plastiques potentielles (ZRPP)					$V_{Rd} > \gamma_{Bd1} \cdot V_C$ avec V_C résultant du dimensionnement en capacité : $V_C = f$ ($\gamma_0 \cdot M_0$)	$\Phi \geq 10\text{mm}$ Classe C		Retour 10 Φ Crochet 135° Ancrage sur 2 armatures principales Recouvrement alterné des armatures transversales 1 ^{er} cours d'armatures transversales disposé à 50mm maxi du parement
		si $\eta_k \leq 0,3$ $L_{h1} = \max$ (- épaisseur section - distance $M_{max} - 0,8M_{max}$)	$M_{Rd} > M_{Ed}$ $0,5\% A_c, \text{ couronne} \leq$ $A_s \leq 3\% A_c$ (6% si recouvrement)	$\Phi \geq 10\text{mm}$ Classe C	$\leq 200\text{mm}$ (conséquen ce du critère sur s_T)	Interdits	<u>Flambement :</u> $A_T \geq \frac{\sum A_i \cdot f_{yk} \times s_T}{1,6 \cdot f_y}$		$s_L \leq \delta \cdot d_{bl}$ $5 \leq \delta = 2,5(f_{tk}/f_{yk}) + 2, 25 \leq \delta \leq 6$ $s_T \leq 200\text{mm}$	Épingle périphérique tenue par épingles intermédiaires ou Armature angle + 1 barre sur 2 (en alternance) tenue par un brin
		si $\eta_k \geq 0,3$ $L_{h2} = 1,5L_{h1}$					<u>Confinement :</u> - Cadres rectangulaires : $a_{min} \geq \max\left(\frac{A_c}{A_w} 0,37\eta_k + 0,13 \frac{f_{yk}}{f_{td}} (\rho_l - 0,01) \frac{2}{3} 0,18\right)$ - Cadres circulaires (cerces) $a_{min} \geq \max\left(1,4 \left[\frac{A_c}{A_w} 0,37\eta_k + 0,13 \frac{f_{yk}}{f_{td}} (\rho_l - 0,01)\right] 0,18\right)$		$s_L \leq \min(6 d_{bl}; \frac{1}{5} b_{min})$ $s_T \leq \min(200\text{mm}; \frac{1}{3} b_{min})$	Spirales interdites
Zones adjacentes L_{h1} ou L_{h2}	$M_{Rd} > M_C$ avec M_C résultant du dimensionnement en capacité : $M_C =$ $f(\gamma_0 \cdot M_0)$	$\Phi \geq 10\text{mm}$ Classe B	$\leq 200\text{mm}$	Max (EC2, 50 d_w) Alternés	$V_{Rd} > \gamma_{Bd1} \cdot V_C$ avec V_C résultant du dimensionnement en capacité : $V_C = f$ ($\gamma_0 \cdot M_0$) 50% confinement ZRPP 50% flambement ZRPP	$\Phi \geq 10\text{mm}$ Classe B	Réduction progressive des quantités avec espacement maximum de $2s_L$ (ZRPP)	Identiques ZRPP		

Piles	Zones adjacentes L_{h1} ou L_{h2}	$M_{Rd} > M_C$ avec M_C résultant du dimensionnement en capacité : $M_C = f(\gamma_0.M_0)$	$\Phi \geq 10\text{mm}$ Classe B	$\leq 200\text{mm}$	Max (EC2, 50 d_w) Alternés	$V_{Rd} > \gamma_{Bd1}.V_C$ avec V_C résultant du dimensionnement en capacité : $V_C = f(\gamma_0.M_0)$ 50% confinement ZRPP 50% flambement ZRPP	$\Phi \geq 10\text{mm}$ Classe B	Réduction progressive des quantités avec espacement maximum de $2s_L$ (ZRPP)	Identiques ZRPP	
	Zones courantes	$M_{Rd} > M_C$ avec M_C résultant du dimensionnement en capacité : $M_C = f(\gamma_0.M_0)$	$\Phi \geq 10\text{mm}$ Classe B	Cf. EC2	Cf. EC2	$V_{Rd} > \gamma_{Bd1}.V_C$ avec V_C résultant du dimensionnement en capacité : $V_C = f(\gamma_0.M_0)$	$\Phi \geq 10\text{mm}$ Classe B	Cf. EC2	Cf. EC2	
	Ductilité limitée	Zones critiques telles que $M_{Rd} < 1,3 M_{Ed}$	$M_{Rd} > M_{Ed}$ $0,5\% A_c$, couronne $\leq A_s \leq 3\% A_c$ (6% si recouvrement)	$\Phi \geq 10\text{mm}$ Classe B	$\leq 200\text{mm}$ (conséquence du critère sur s_T)	Max (EC2, 50 d_w) Alternés	$V_{Rd} > q \gamma_{Bd1}.V_{Ed}^*$ Flambement : $A_T \geq \frac{\sum A_{li} f_{yl}}{1,6 f_{yk}} \times s_T$	$\Phi \geq 10\text{mm}$ Classe B	$s_L \leq \delta d_{bl}$ $5 \leq \delta = 2,5(f_{tk}/f_{yk}) + 2,25 \leq 6$ $s_T \leq 200\text{mm}$	Cf. EC2 + conditions spécifiques flambement et confinement
		Zones courantes	$M_{Rd} > 1,3M_{Ed}$	$\Phi \geq 10\text{mm}$ Classe B	Cf. EC2	Cf. EC2	$V_{Rd} > q \gamma_{Bd1}.V_{Ed}^*$	$\Phi \geq 10\text{mm}$ Classe B	Cf. EC2	Cf. EC2
Tablier	Élastique	Aucune disposition constructive parasismique spécifique Confiner et ferrailer les zones d'action d'efforts locaux (butées parasismiques, ancrages des amortisseurs...) à partir des efforts majorés selon le principe du dimensionnement en capacité + même critères que pour les semelles de fondation dans le cas de piles encastées dans le tablier								

Noir : EC8-2
 Bleu : recommandations inspirées
 notamment des anciennes règles PS92

Armatures longitudinales

Armatures transversales

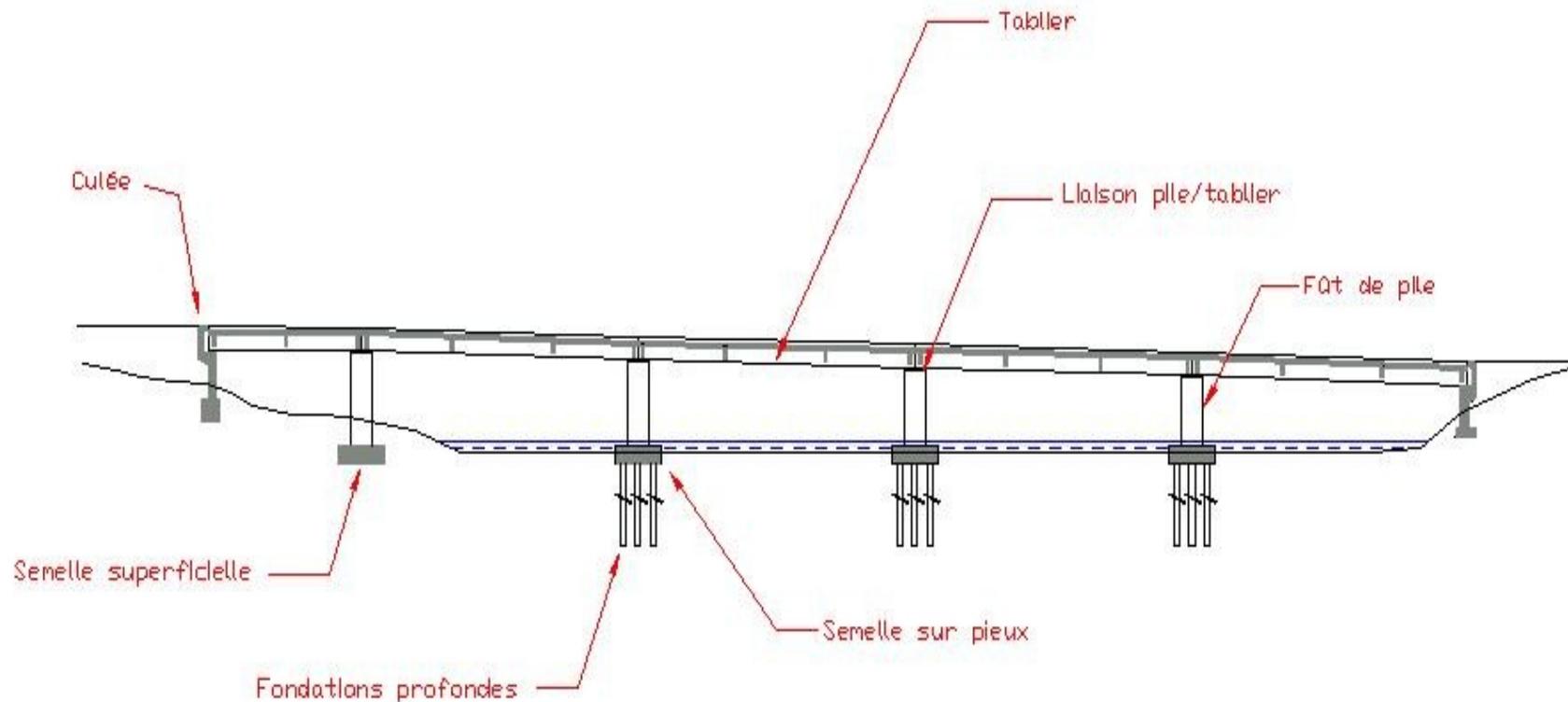
Partie d'ouvrage	Comportement visé	Zone concernées	Armatures longitudinales				Armatures transversales			
			Section totale	Diamètre Classe de ductilité	Espacement	Recouvrement	Section totale	Diamètre Classe de ductilité	Espacement	Dispositions constructives
Fondations profondes : Pieux - Barrettes	Élastique (sauf cas exceptionnel)	Cas où les plastifications dans les pieux (ou barrettes) sont évitées par l'utilisation du dimensionnement en capacité : Toutes les zones	$M_{Rd} > M_C$ avec M_C résultant du dimensionnement en capacité : $M_C = f(\gamma_0.M_0)$	$\Phi \geq 12mm$ Classe B	Cf. EC2	Cf. EC2	$V_{Rd} > \gamma_{Bd1}.V_C$ avec V_C résultant du dimensionnement en capacité : $V_C = f(\gamma_0.M_0)$	$\Phi \geq 10mm$ Classe B	Cf. EC2	Cf. EC2
		Autres cas (déconseillés) : Zones le long du pieu (ou barrette) à considérer comme rotules plastiques potentielles : - sous encastrement dans semelle $L_h = 3\Phi_{\text{pieu}}$ (ou $3B_{\text{min,barrette}}$) - de part et d'autre de moment maxi ou interface de sols différents $L_h = 2\Phi_{\text{pieu}}$ (ou $2B_{\text{min,barrette}}$)	Identiques ZRPP piles Puis réduction progressive des quantités d'armatures transversales dans les zones adjacentes, sur une longueur supplémentaire L_h , avec espacement maximum de $2s_L$ (avec s_L défini pour les ZRPP) Aucune disposition constructive particulière, autre que EC2, ailleurs (zones courantes)							
	Cas d'une conception en ductilité limitée de l'ouvrage	Zones critiques telles que : $M_{Rd} < 1,3 M_{Ed}$	Identiques zones critiques piles $M_{Rd} > q.M_{Ed}^*$ et $V_{Rd} > q.\gamma_{Bd1}.V_{Ed}^*$							
		Zones courantes	$M_{Rd} > \max(q.M_{Ed}^* ; 1,3 M_{Ed})$	$\Phi \geq 12mm$ Classe B	Cf. EC2	Cf. EC2	$V_{Rd} > q.\gamma_{Bd1}.V_{Ed}^*$	$\Phi \geq 10mm$ Classe B	Cf. EC2	Cf. EC2

Semelles de fondation - Chevêtres	Élastique	Zones courantes	<p>Aucune disposition constructive particulière autre que EC2.</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ si conception ductile des piles : $M_{Rd} > M_C$ et $V_{Rd} > \gamma_{Bd1} V_C$ avec M_C et V_C résultant du dimensionnement en capacité : $M_C, V_C = f(\gamma_0.M_0)$ ○ si conception en ductilité limitée des piles : $M_{Rd} > qM_{Ed}$ et $V_{Rd} > q.\gamma_{Bd1} V_{Ed}$ 						
		<p>Zones adjacentes au ZRPP, sur une distance horizontale égale à la moitié de la hauteur de la semelle ou du chevêtre autour des nœuds d'encastrement avec la pile (ou les pieux ou barrettes dans le cas déconseillé d'une plastification de ces derniers)</p>	<p>si conception ductile de l'ouvrage $M_{Rd} > M_C$ avec M_C résultant du dimensionnement en capacité : $M_C = f(\gamma_0.M_0)$</p>	<p>$\Phi \geq 10mm$ Classe B</p>	<p>Cf. EC2</p>	<p>Max (EC2, 50 d_w) Alternés</p>	<p>Effort tranchant zone nodale : $V_{Rd} > \gamma_{Bd1} V_C$ avec V_C résultant du dimensionnement en capacité : $V_C = f(\gamma_0.M_0)$</p>	<p>$\Phi \geq 10mm$ Classe B</p>	<p>Cf. EC2</p>
<p>si conception en ductilité limitée de l'ouvrage $M_{Rd} > qM_{Ed}^*$</p>	<p>$V_{Rd} > q.\gamma_{Bd1} V_{Ed}^*$</p>	<p>50% confinement ZRPP 50% flambement ZRPP</p>	<p>Identiques aux zones adjacentes des piles et fondations</p>						

Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Exemples de schémas de détail pour différentes parties d'ouvrage

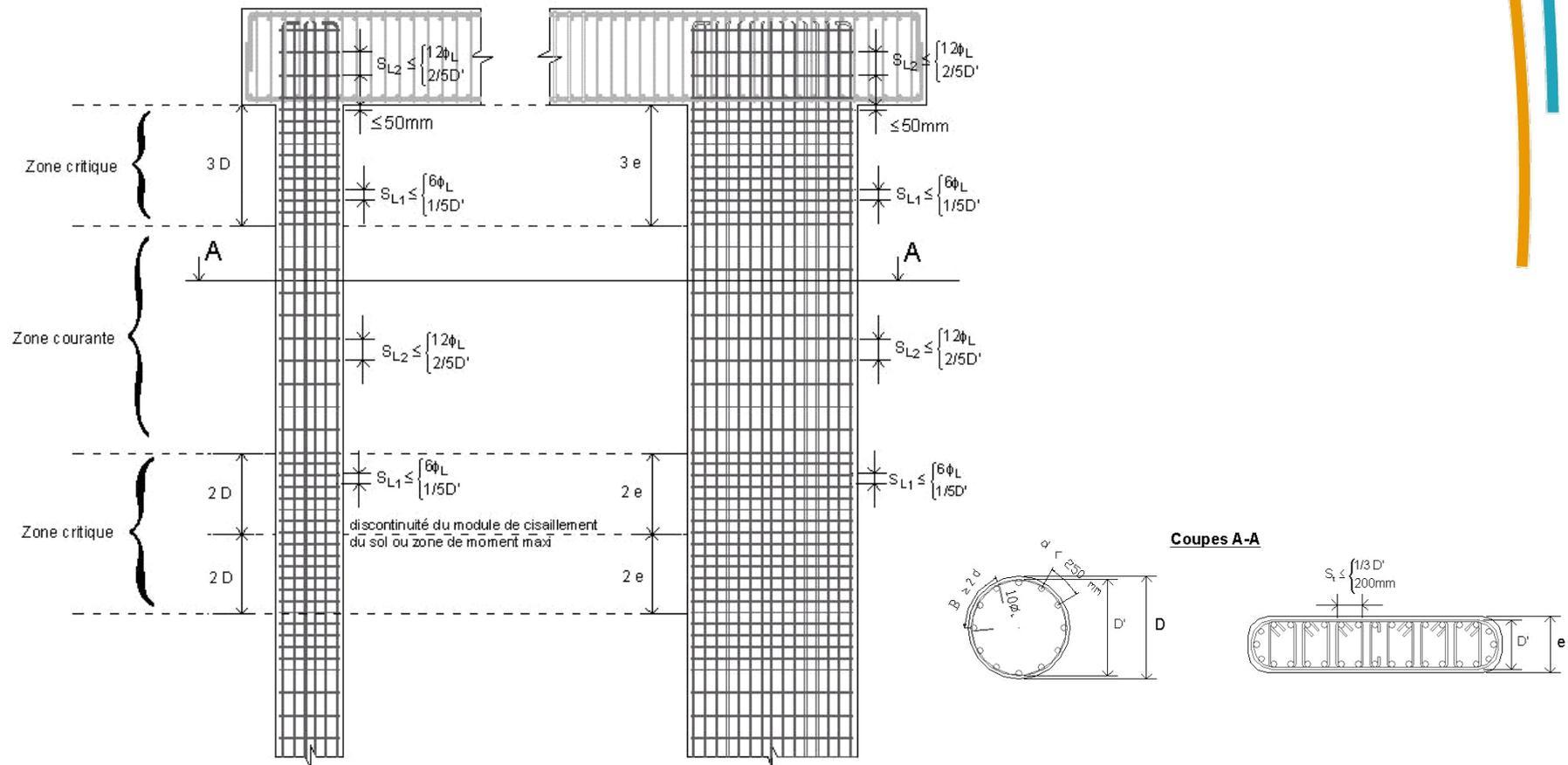


Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Exemples de schémas de détail pour différentes parties d'ouvrage

Fondations profondes – pieux et barrettes

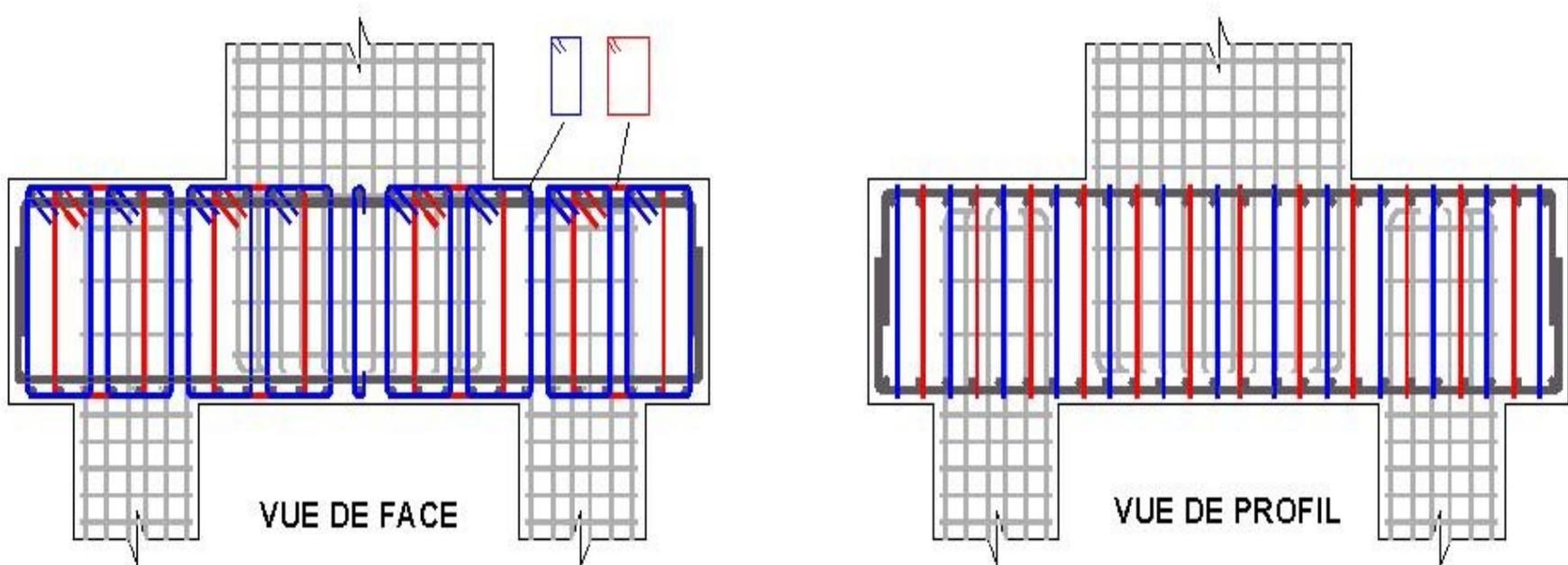


Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Exemples de schémas de détail pour différentes parties d'ouvrage

Semelles de fondations

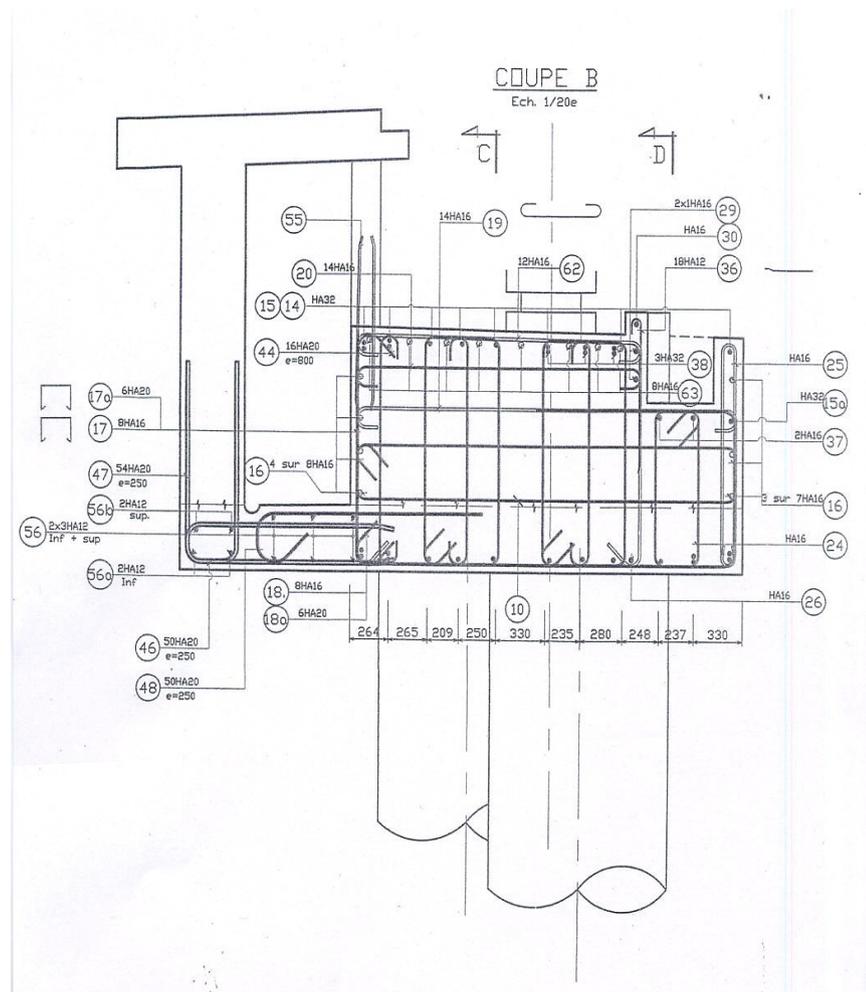


Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Exemples de schémas de détail pour différentes parties d'ouvrage

Culées

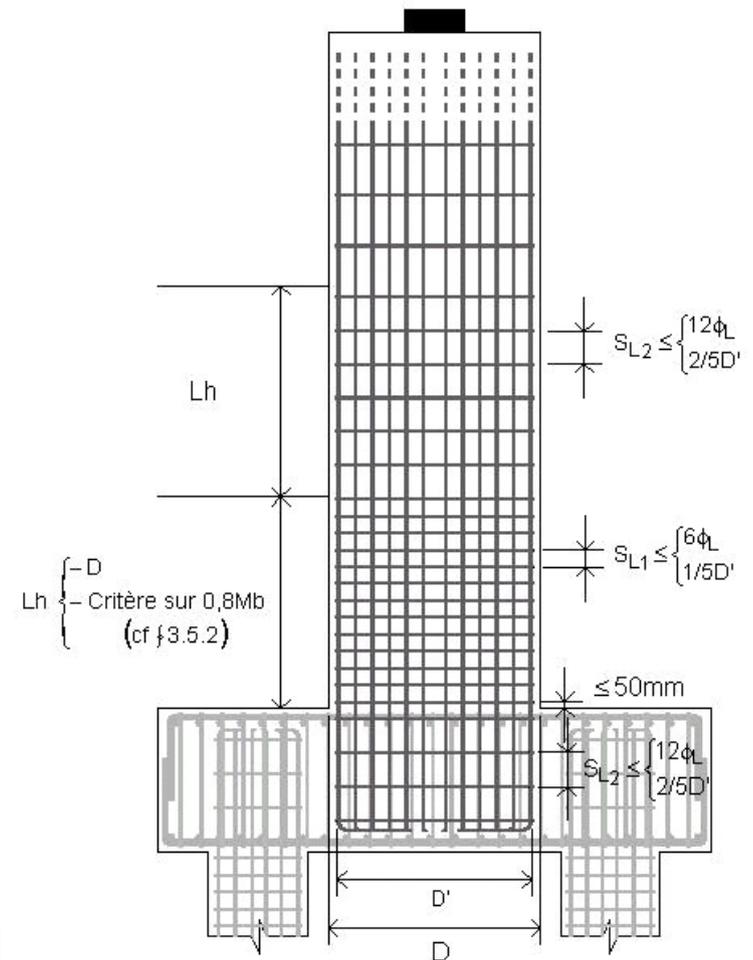
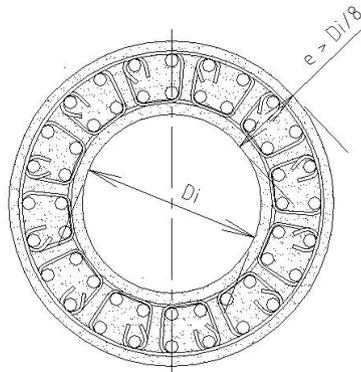
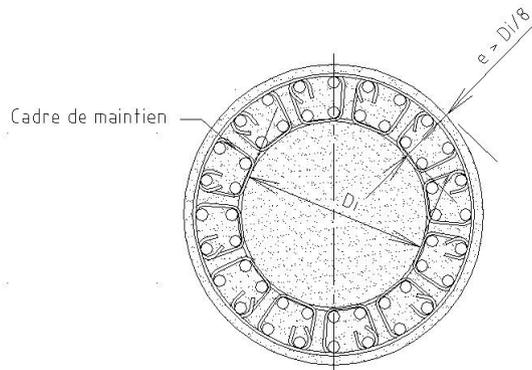
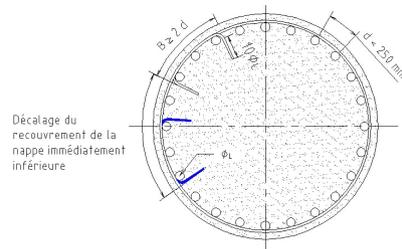


Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Exemples de schémas de détail pour différentes parties d'ouvrage

Fûts de piles

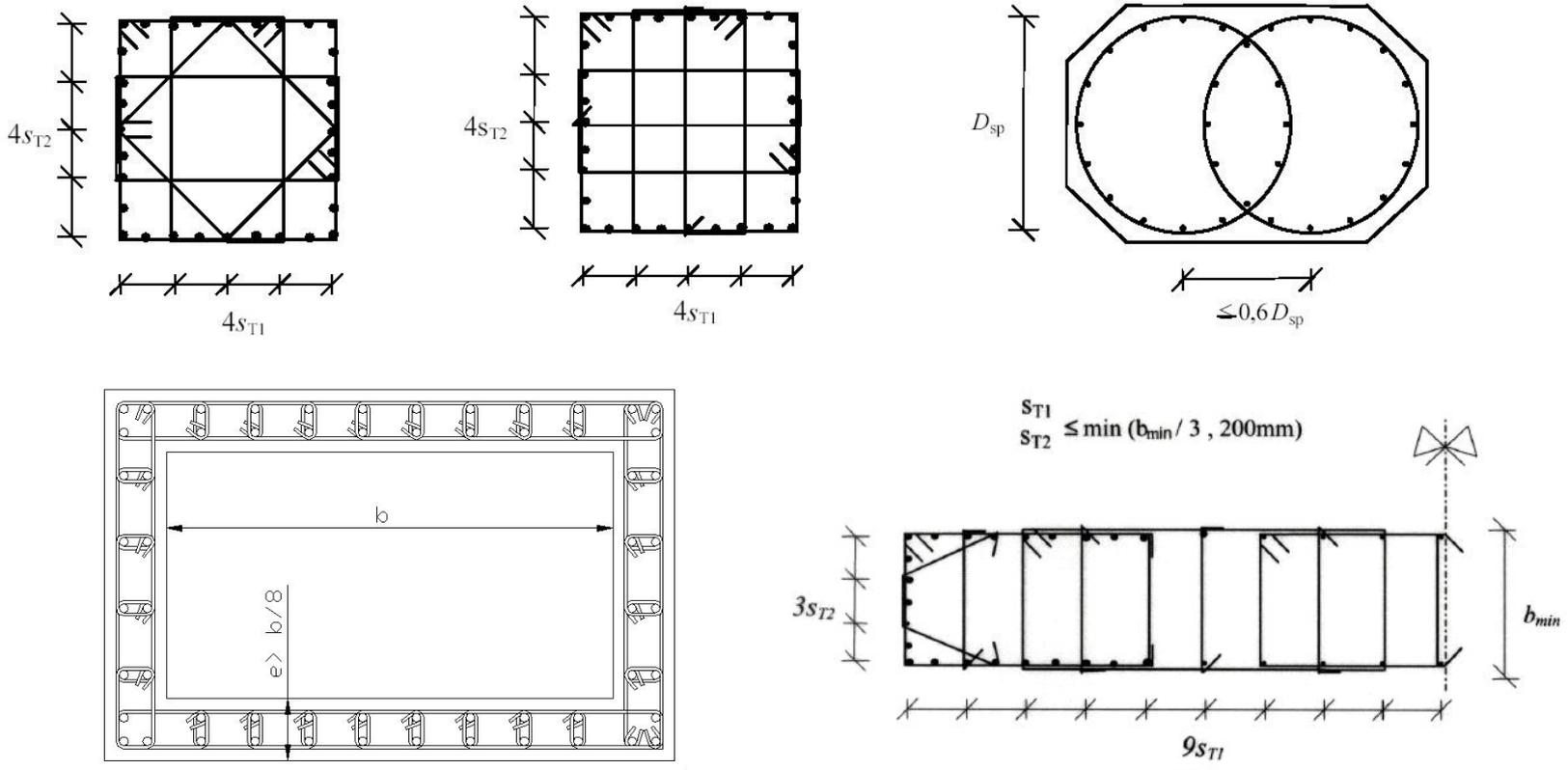


Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Exemples de schémas de détail pour différentes parties d'ouvrage

Fûts de piles

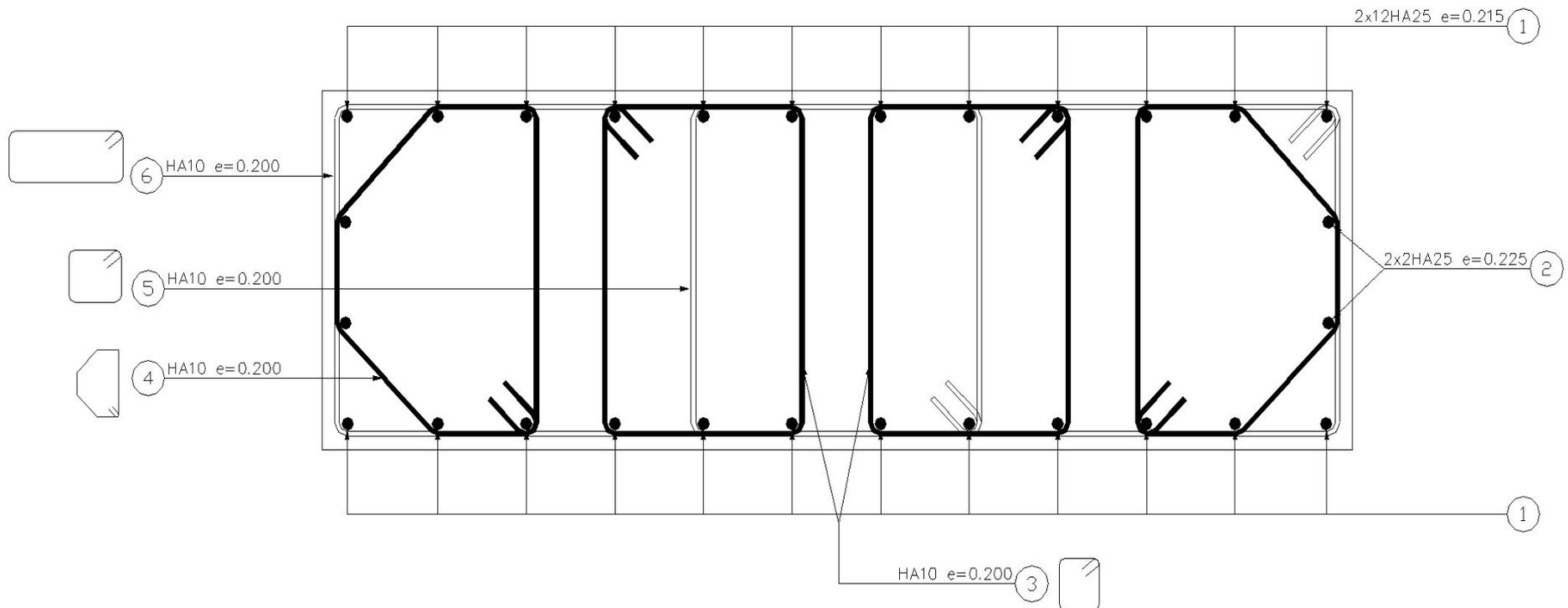


Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Exemples de schémas de détail pour différentes parties d'ouvrage

Fûts de piles

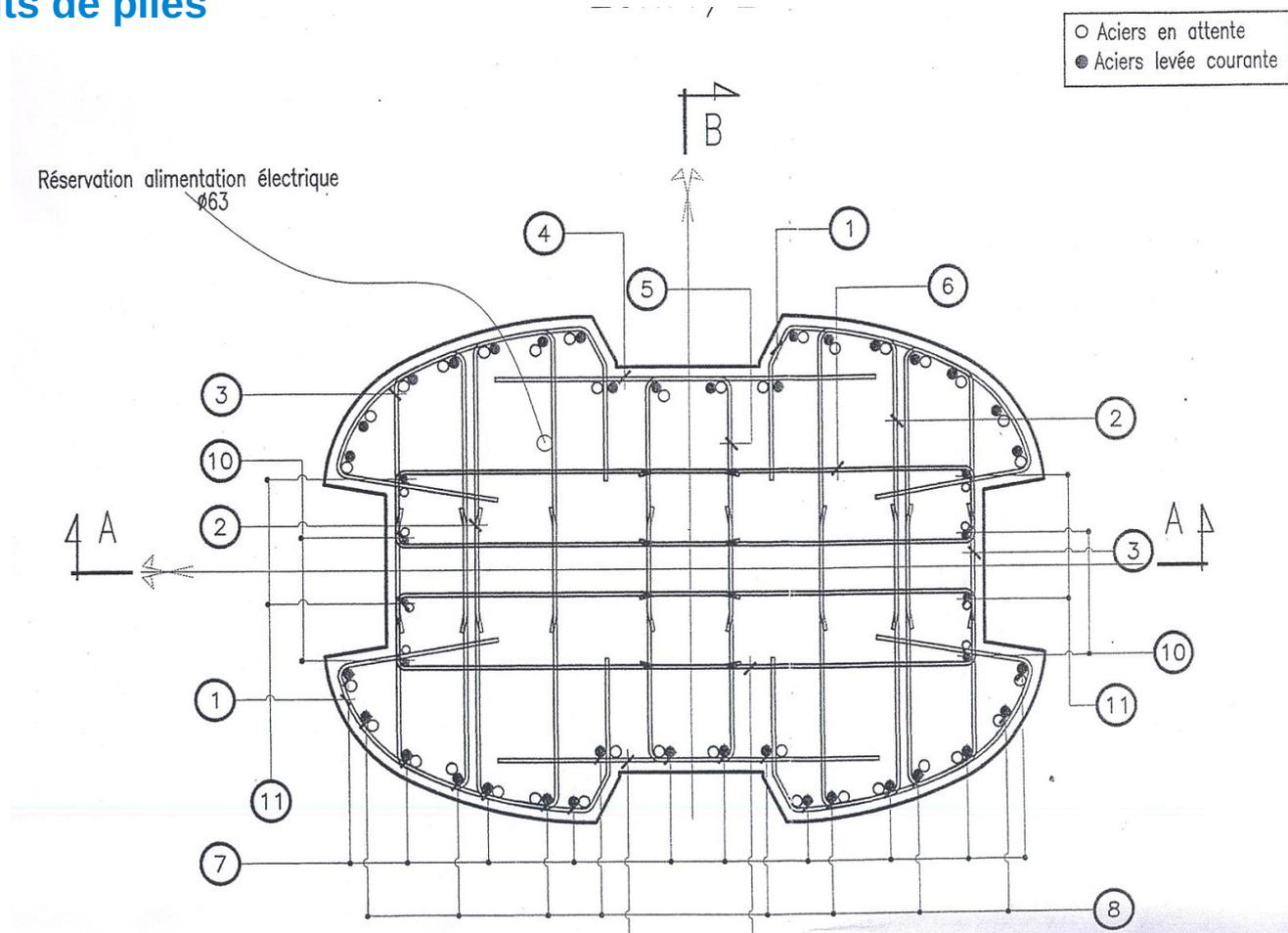


Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Exemples de schémas de détail pour différentes parties d'ouvrage

Fûts de piles

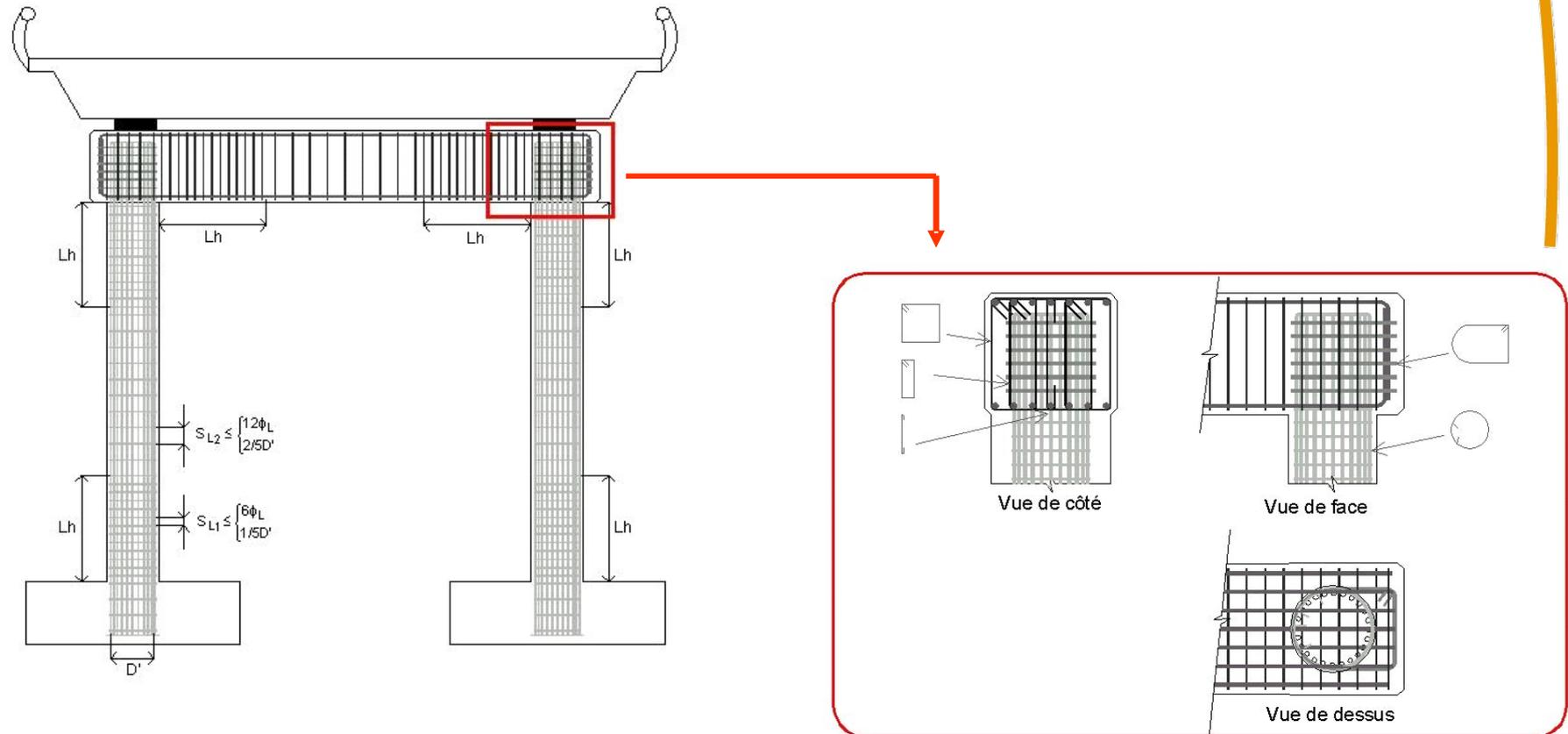


Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Exemples de schémas de détail pour différentes parties d'ouvrage

Fûts de piles – cas des piles portiques

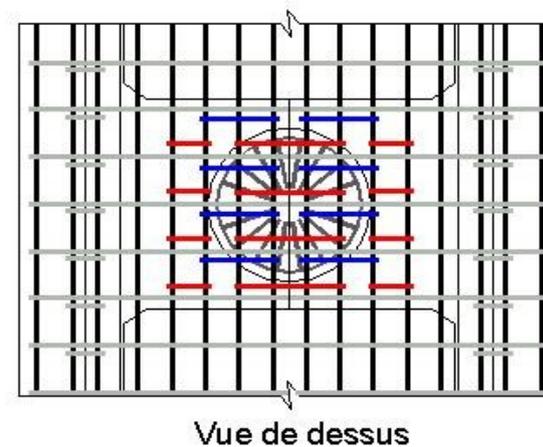
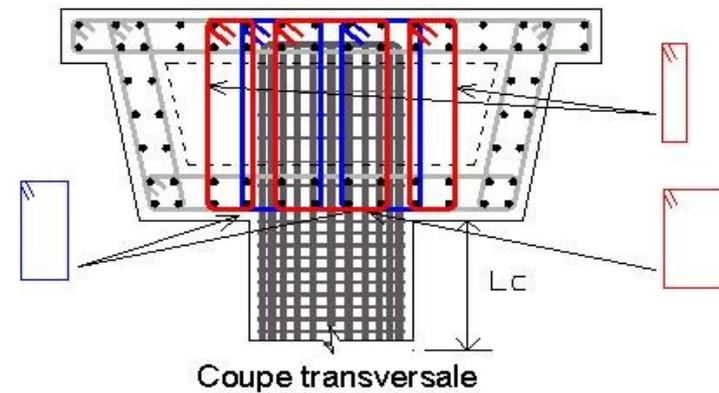
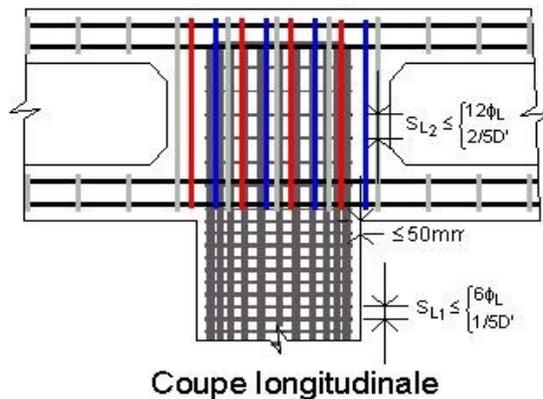


Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Exemples de schémas de détail pour différentes parties d'ouvrage

Liaisons appuis/tablier – cas des piles encastrées

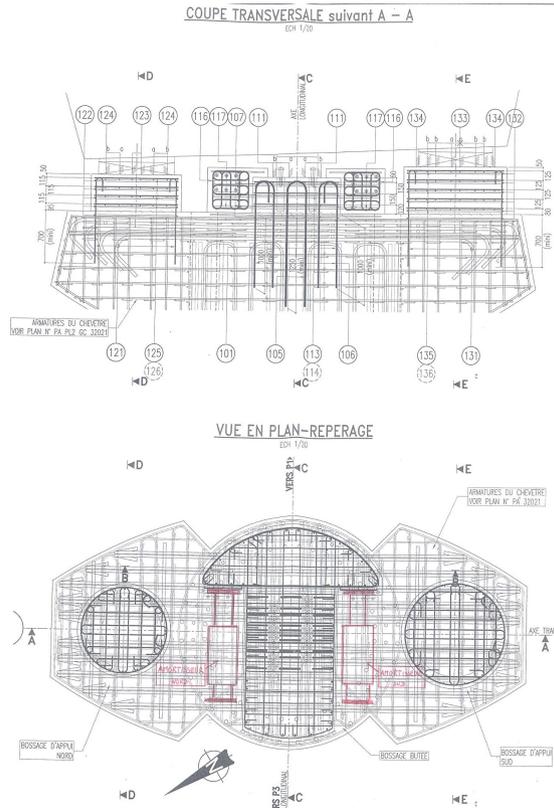


Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Exemples de schémas de détail pour différentes parties d'ouvrage

Liaisons appuis/tablier – chevêtres

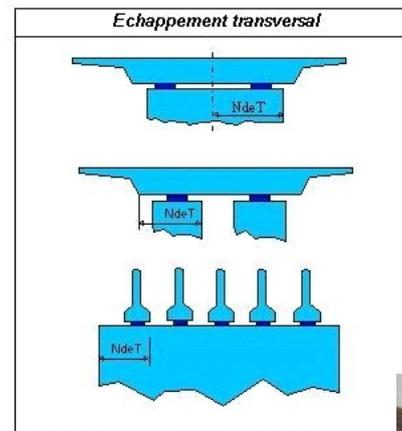
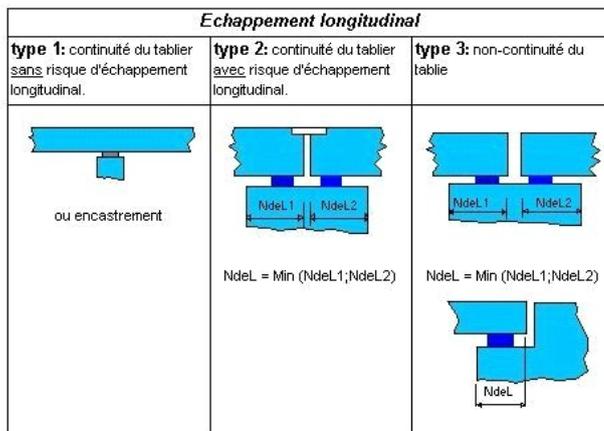


Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Exemples de schémas de détail pour différentes parties d'ouvrage

Liaisons appuis/tablier – chevêtres



Repos d'appui minimal :

$$l_{ov} = l_m + d_{eg} + d_{es} \quad (\text{EC8-2, Eq. 6.12})$$

l_m : longueur mini de transmission d'effort (400 mm)

d_{eg} : déplacement du sol

d_{es} : dépalcement dû à la déformation structurelle

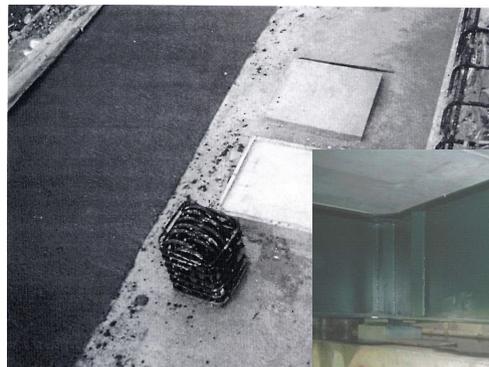
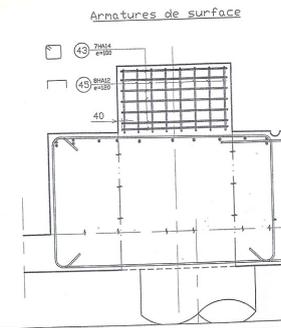
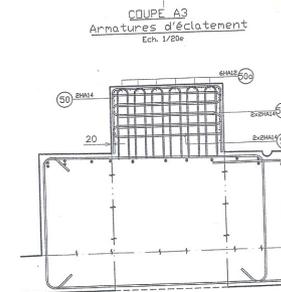
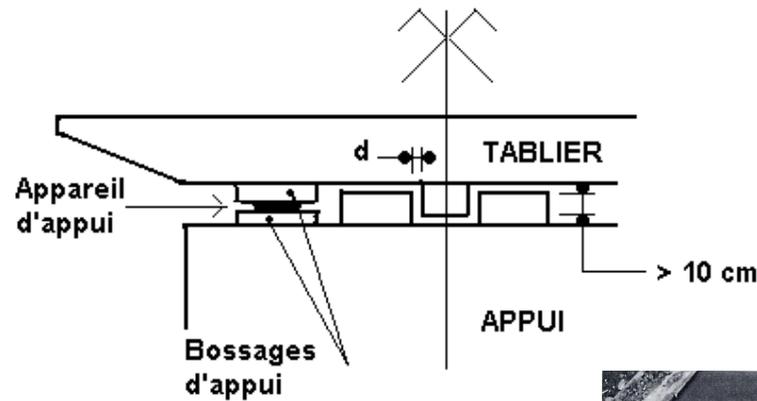


Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Exemples de schémas de détail pour différentes parties d'ouvrage

Liaisons appuis/tablier – butées parasismiques

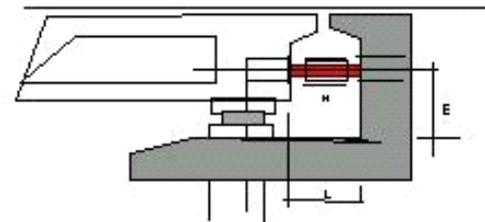
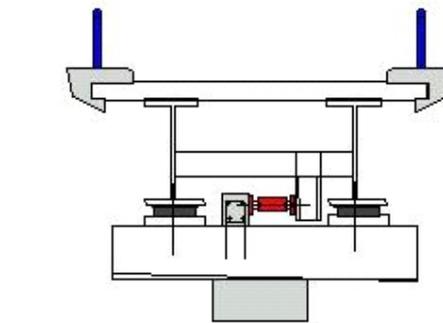
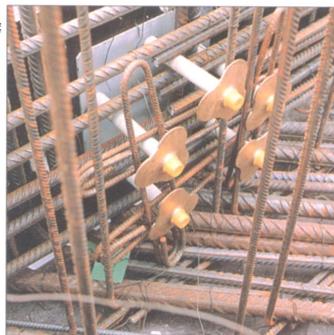
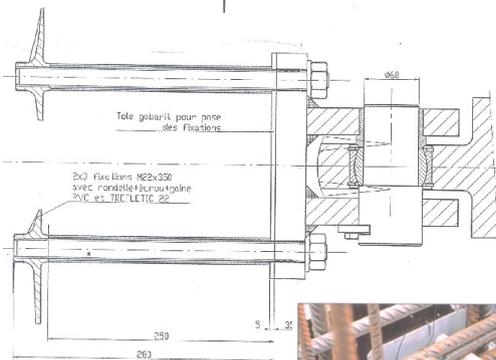
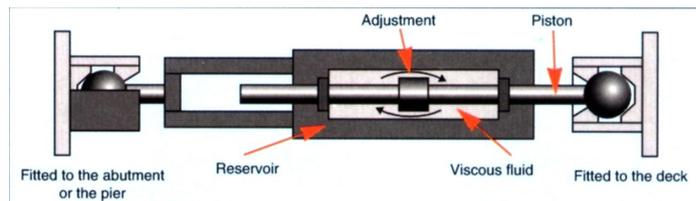


Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Exemples de schémas de détail pour différentes parties d'ouvrage

Liaisons appuis/tablier – amortisseurs



Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

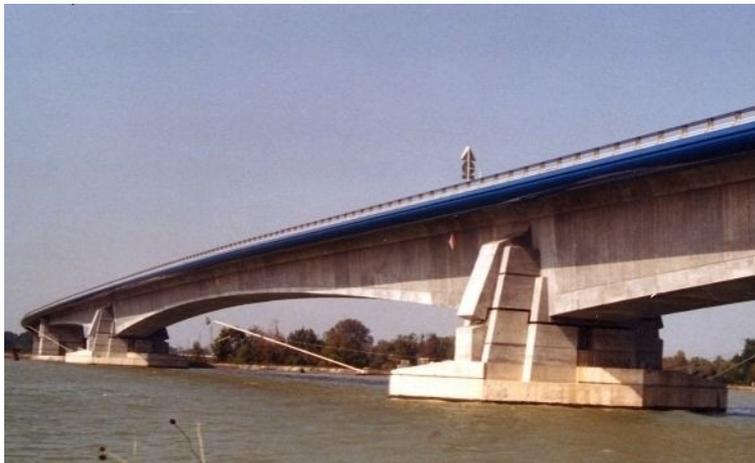
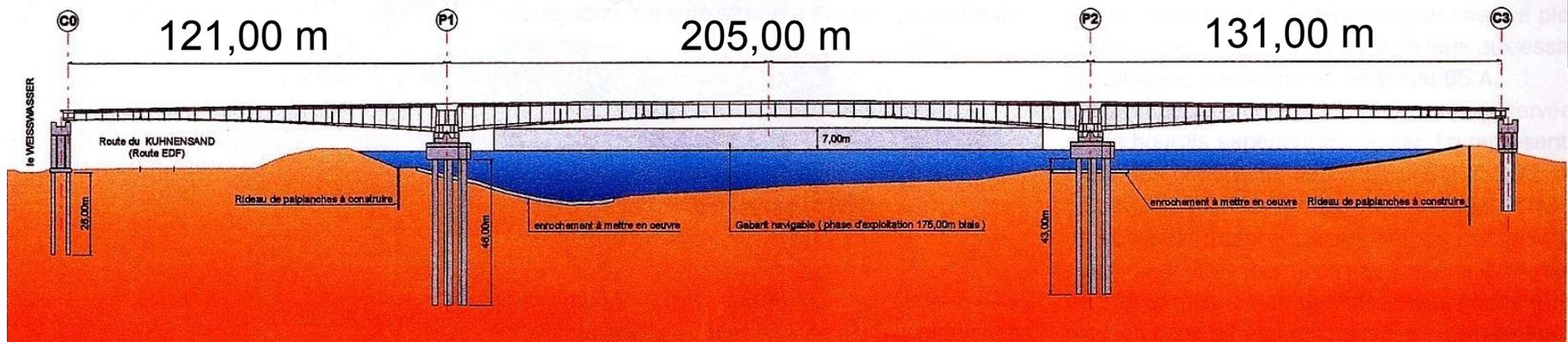
- Le pont sur le Rhin (Strasbourg)
 - Le viaduc de Saint-André (Maurienne, Savoie)
 - Le viaduc d'Aiton (Maurienne, Savoie)
 - Le pont sur le Var à Saint-Isidore (06)
 - Le pont sur le Var à Puget-Théniers (06)
 - Le pont de Rion-Antirion (Grèce)
- PS92
- EC8-2



Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont sur le Rhin (Strasbourg)



Pont en béton précontraint

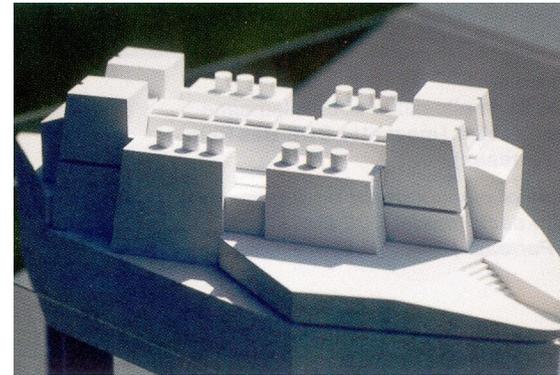
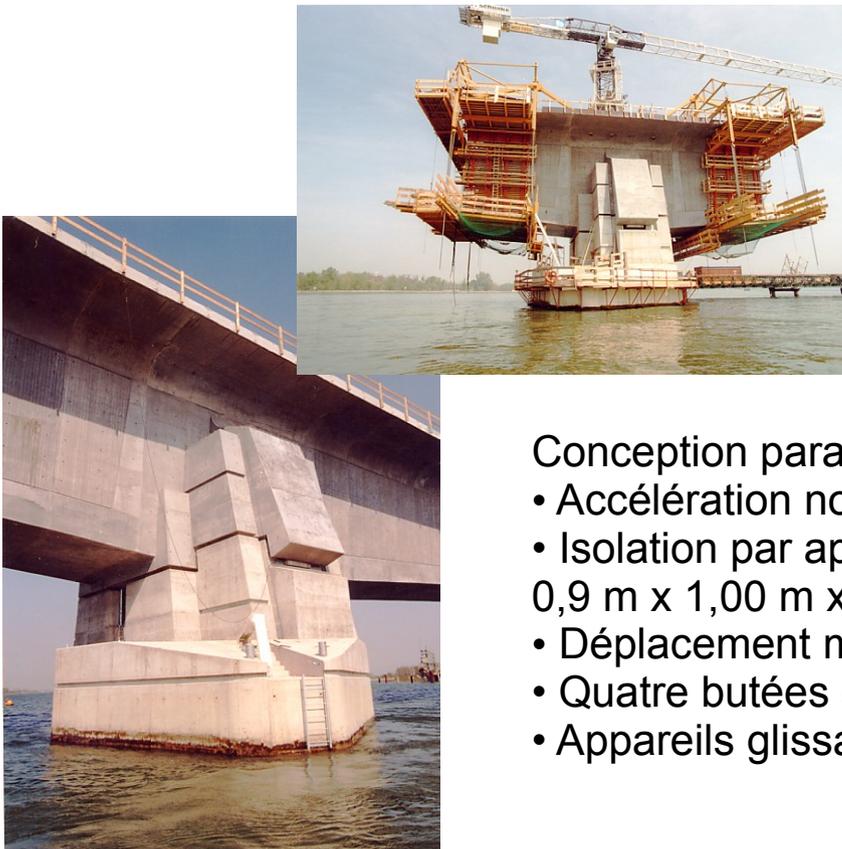
- Longueur : 457 m
- Travée centrale : 205 m
- Masse du tablier : 15000 t
- Piles courtes, massives et rigides fondées sur pieux de 46 m de longueur
- Les piles doivent résister à un choc de bateau (20 MN en équivalent statique)

Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

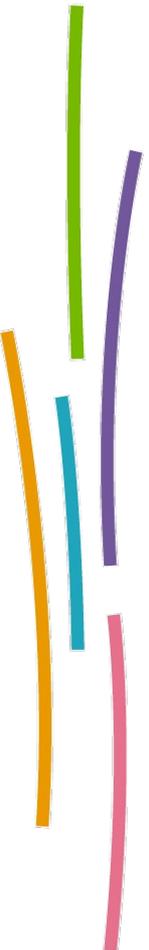
- Le pont sur le Rhin (Strasbourg)

Exemple d'isolation sans amortisseurs



Conception parasismique : élastique

- Accélération nominale : $2,5 \text{ m/s}^2$
- Isolation par appareils d'appui en caoutchouc fretté : 12 appareils $0,9 \text{ m} \times 1,00 \text{ m} \times 176 \text{ mm}$ sur chaque pile
- Déplacement maximum : 200 mm
- Quatre butées de sécurité sur piles
- Appareils glissants sur culées, butées de blocage transversales.



Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le viaduc de Saint-André (Maurienne, Savoie)

Exemple d'un pont continu de grande longueur doté d'amortisseurs



Pont en béton précontraint à voussoirs préfabriqués

- Longueur : 900 m
- Travée courante : 95 m
- Masse du tablier : 35000 t
- Hauteur des piles : 3 à 10 m

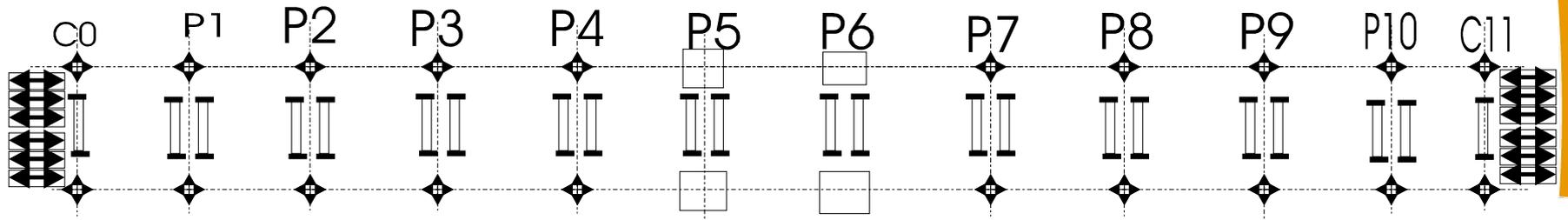


Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le viaduc de Saint-André (Maurienne, Savoie)

Exemple d'un pont continu de grande longueur doté d'amortisseurs



- Accélération nominale : $1,5 \text{ m/s}^2$
- Appareils d'appui caoutchouc fretté sur les 2 piles centrales
- Appareils glissants sur les autres appuis
- Amortisseurs visqueux longitudinaux sur culées
Capacité de déplacement de 600 mm
- Déplacement longitudinal maximal 200 mm
- Ressorts-amortisseurs précontraints transversaux sur tous les appuis

Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

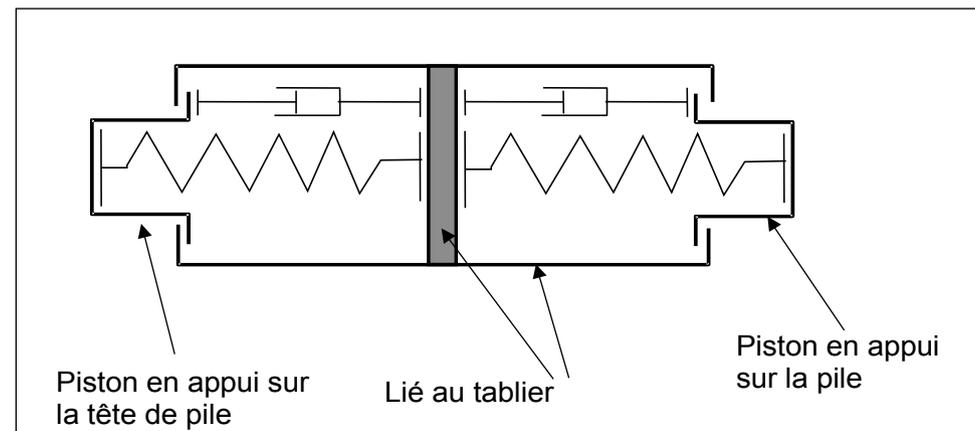
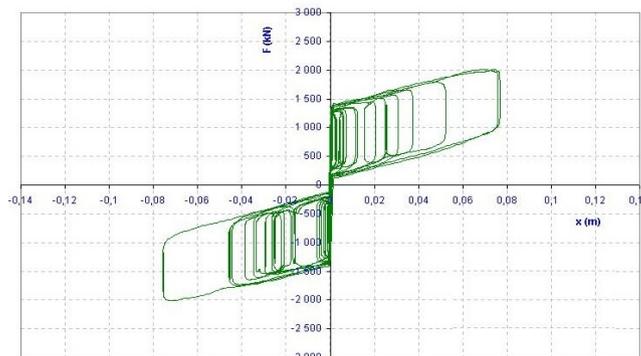
- Le viaduc de Saint-André (Maurienne, Savoie)

Exemple d'un pont continu de grande longueur doté d'amortisseurs



Ressorts amortisseurs précontraints

- Jouent le rôle de fusibles
- Évitent tout déplacement sous conditions de service
- Capacité de recentrage



Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le viaduc d'Aiton (Maurienne, Savoie)

Exemple d'un pont mixte de taille moyenne



Tablier bipoutre mixte

- longueur : 300 m
- Masse du tablier : 4000 t

Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le viaduc d'Aiton (Maurienne, Savoie)

Exemple d'un pont mixte de taille moyenne



Isolation et amortisseurs

- Accélération nominale : 2 m/s^2
- Isolation par appareils d'appui en caoutchouc fretté : appareils $0,8 \text{ m} \times 0,8 \text{ m}$ sur chaque pile
- Appareils glissants sur culées, butées de blocage transversales
- Amortisseurs visqueux longitudinaux sur culées et transversaux sur piles

Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont sur le Var à Saint-Isidore (06)
(Proximité de Nice – M. Ouvr : DDE 06)



Pont en béton précontraint coulé en place,
courbe en plan

- Longueur : 438 m
- Travée maximale : 75 m
- Masse du tablier : 17000 t
- Hauteur de piles : entre 10 et 16 m
- Accélération nominale : $3,5 \text{ m/s}^2$
(classe D)



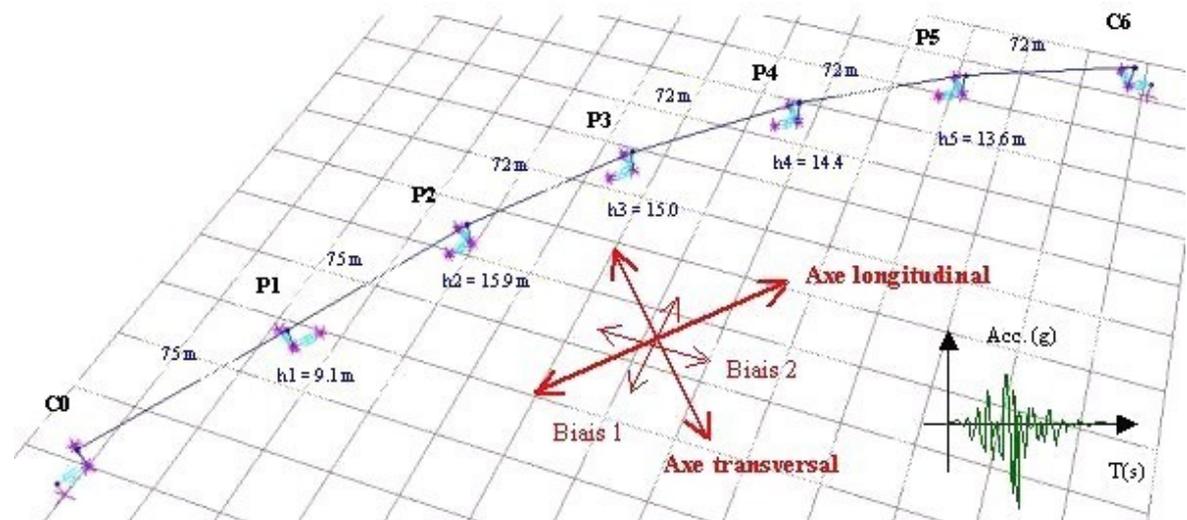
Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont sur le Var à Saint-Isidore (06)

Modèle de calcul

- une analyse dynamique temporelle non-linéaire
- un modèle simple mais prenant en compte :
 - la souplesse du tablier
 - la courbure en plan
 - l'orientation et la répartition des appareils d'appui
 - la répartition des masses



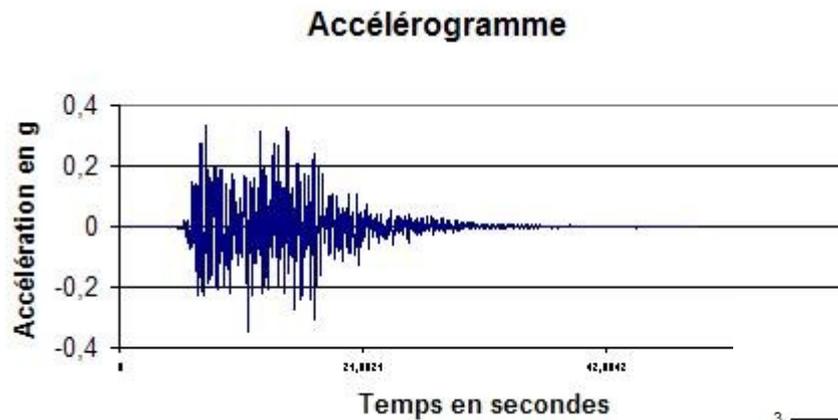
Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

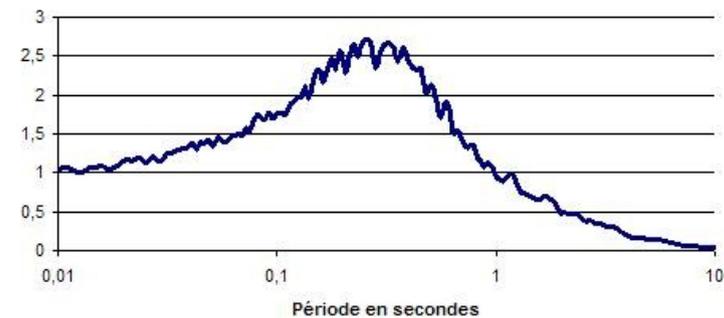
- Le pont sur le Var à Saint-Isidore (06)

Modèle de calcul

- une analyse dynamique temporelle non-linéaire



**Spectre de réponse élastique normalisé à 5 %
d'amortissement**

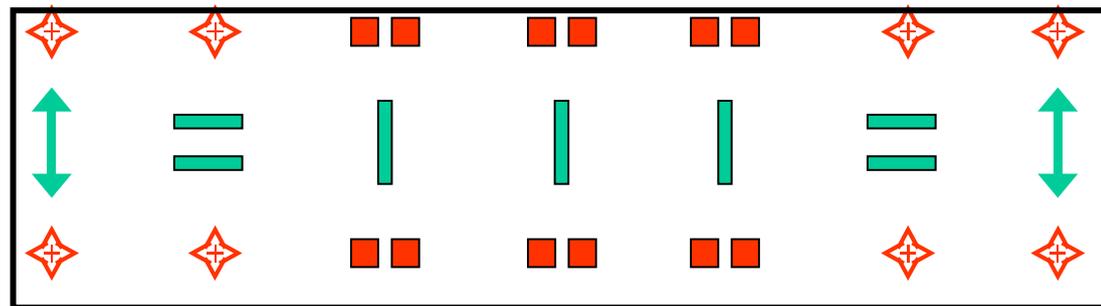
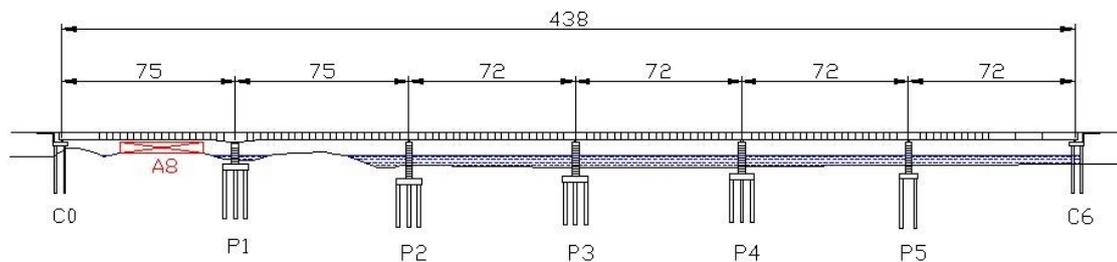


Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont sur le Var à Saint-Isidore (06)

Une conception itérative



-  Appui à pot multidirectionnel
-  Appui néoprène 750 x 1000 x 6 (16+4)
-  Amortisseur pur
-  Ressort amortisseur précontraint

- Solution 1 : utilisation d'appareils d'appui en caoutchouc fretté

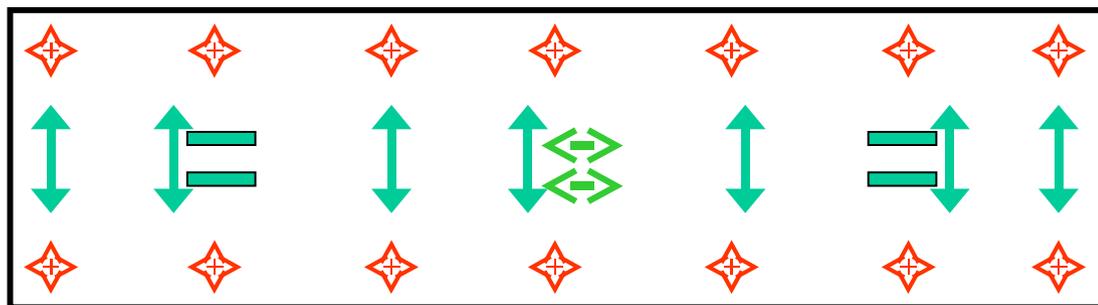
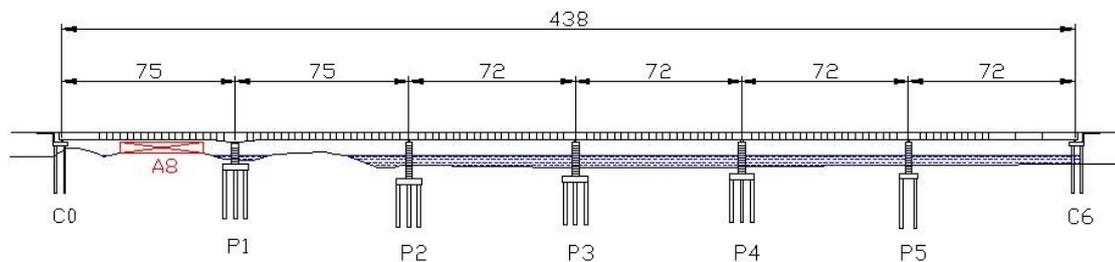
- Efforts transversaux importants (environ 4 MN)
- Pas d'écrêtage
- Encombrement et problèmes en service (encastrement, distribution du ΔT)

Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont sur le Var à Saint-Isidore (06)

Une conception itérative



-  Appareil glissant à pot
-  Amortisseur visqueux
-  Ressort-amortisseur précontraint
-  Ressort précontraint pur

- Solution 2 : système fusible pur sur P3 et équilibrage transversal

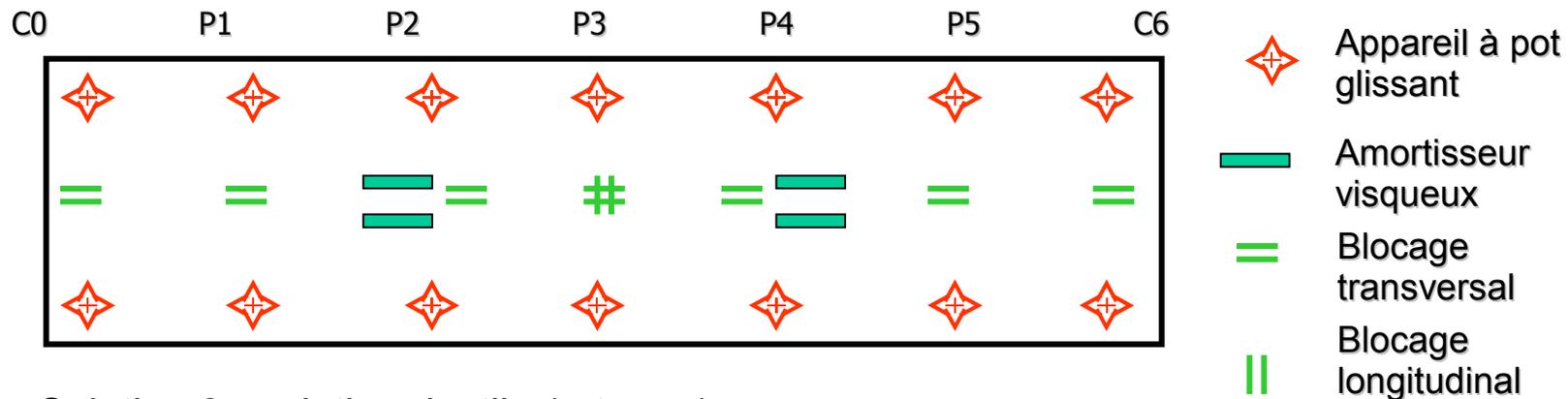
- Efforts raisonnables dans chacune des directions (entre 2 et 3 MN)
- Déplacement longitudinal acceptable (environ 13 cm)
- Problème d'encombrement (en particulier sur P1)

Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont sur le Var à Saint-Isidore (06)

Une conception itérative



• Solution 3 : solution ductile (retenue)

- Remplacement des ressorts précontraints par des butées de blocage
- Solution hybride : comportement ductile et amortisseurs visqueux
- Moins cher et plus facile à mettre en oeuvre compte tenu du manque de place en tête de piles
- Schéma mécanique quasi équivalent à la solution 2 (fonction fusible + amortissement)
- Principe de fonctionnement très différent : acceptation d'un certain niveau d'endommagement



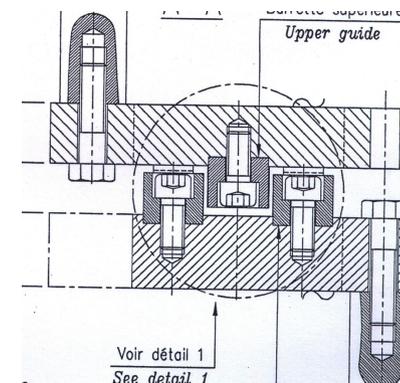
Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont sur le Var à Saint-Isidore (06)



Ferrailage d'un fût de pile



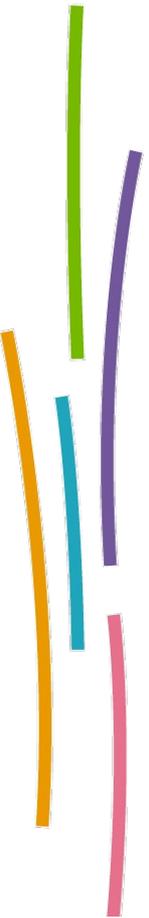
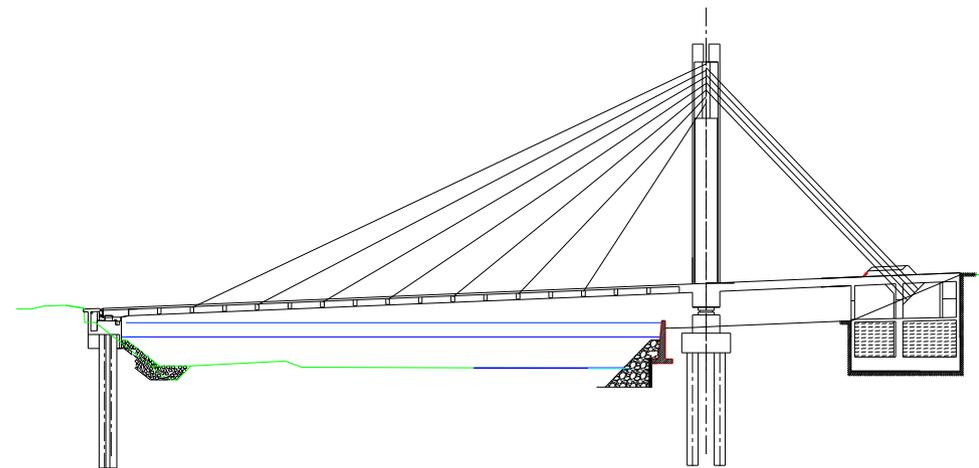
Blocage transversal sur culées

Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont sur le Var à Puget-Théniers (06)
(M. Ouvr : CG 06)

**Solution haubanée dissymétrique - tablier BFUP précontraint
2 travées avec pylônes verticaux**

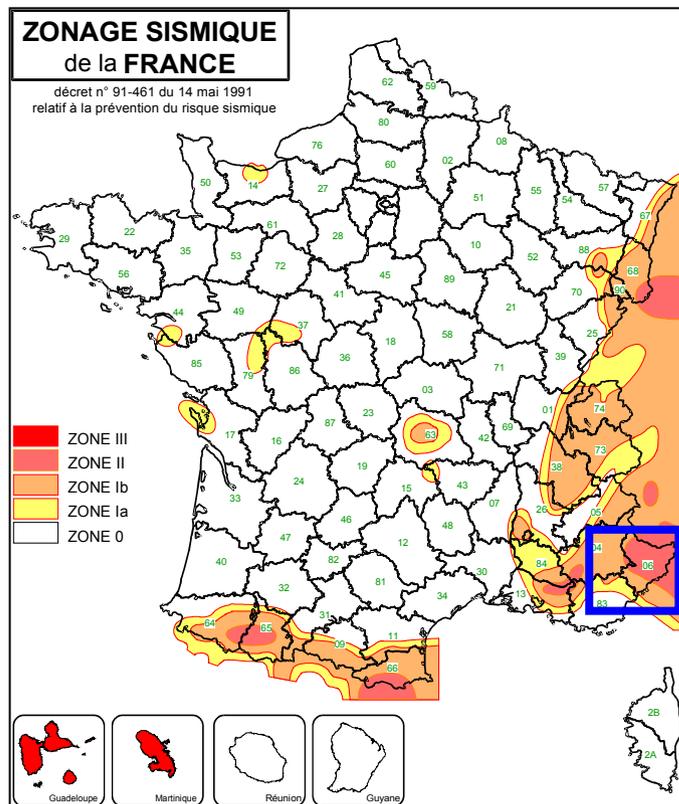


Conception parasismique des ponts (2/2)

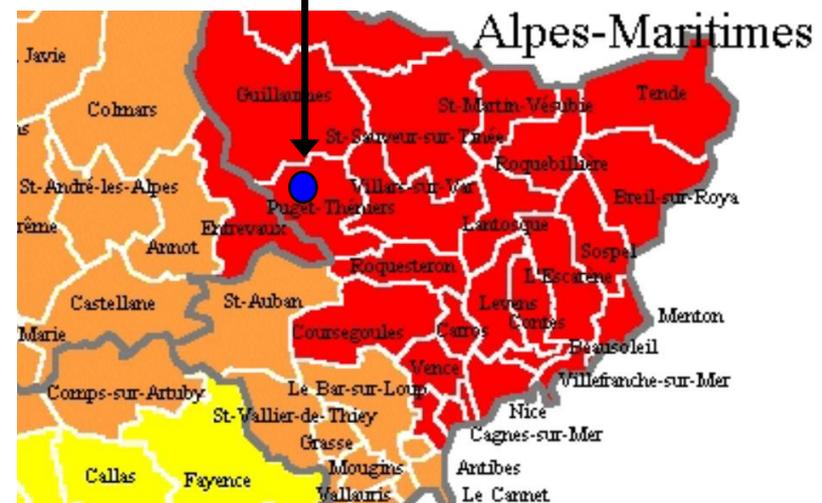
Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont sur le Var à Puget-Théniers (06)

Le contexte sismique



Zone II
Ouvrage de classe C → $a_N = 3 \text{ m/s}^2$



Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont sur le Var à Puget-Théniers (06)

Choix d'un comportement élastique ($q=1$)

justifié par :

- la légèreté de la structure (≈ 3000 tonnes)
- la relative complexité de l'ouvrage
- la nécessité de rester dans le domaine des petites déformations
- le choix des matériaux (B60 peu ductile)



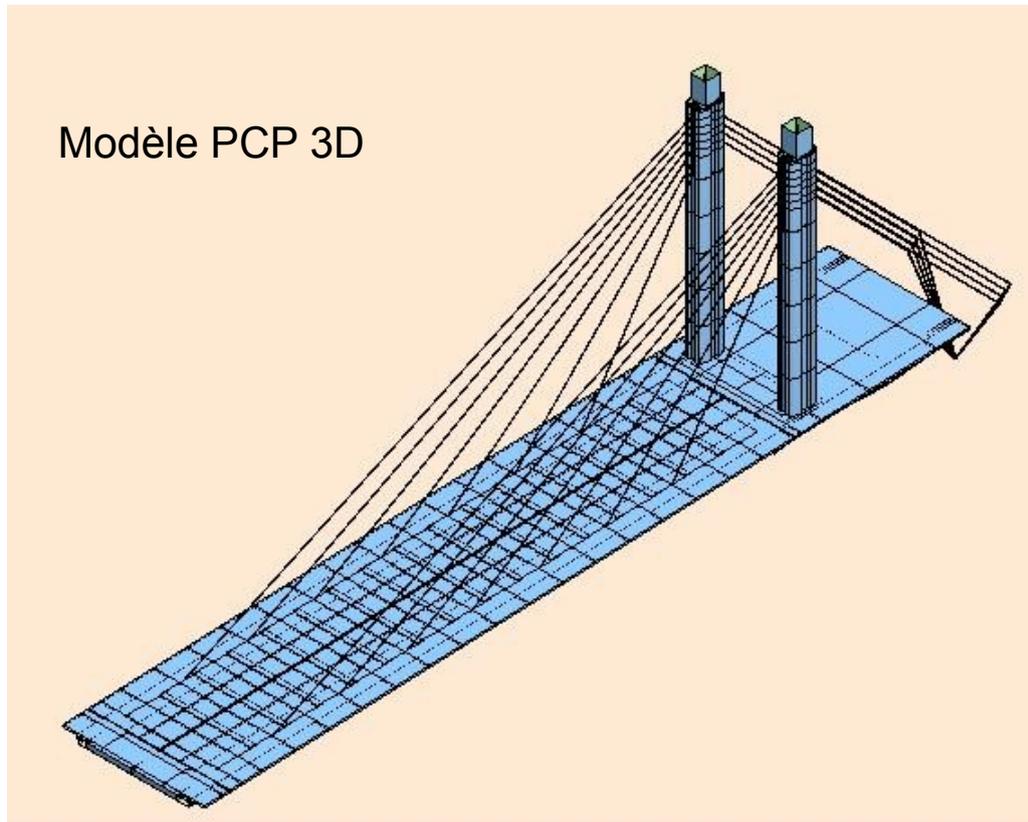
Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont sur le Var à Puget-Théniers (06)

Analyse spectrale multimodale

Modèle PCP 3D



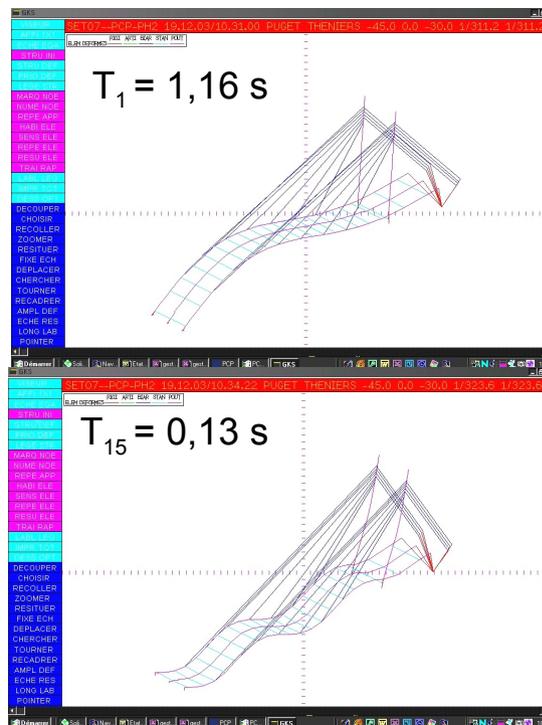
Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

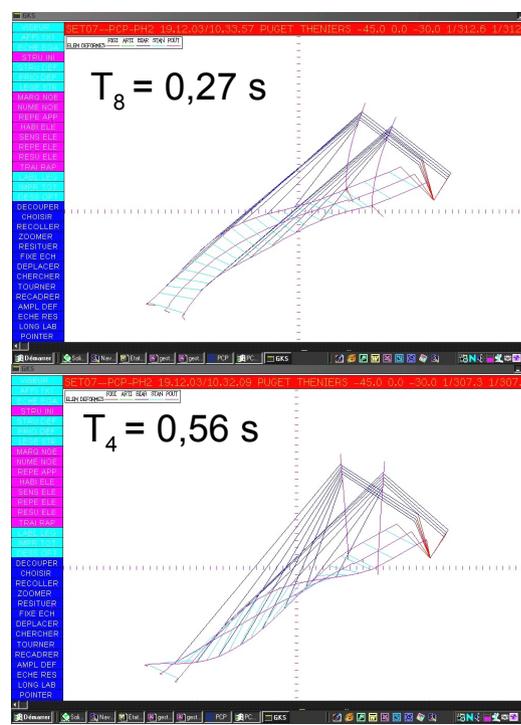
- Le pont sur le Var à Puget-Théniers (06)

Analyse spectrale multimodale

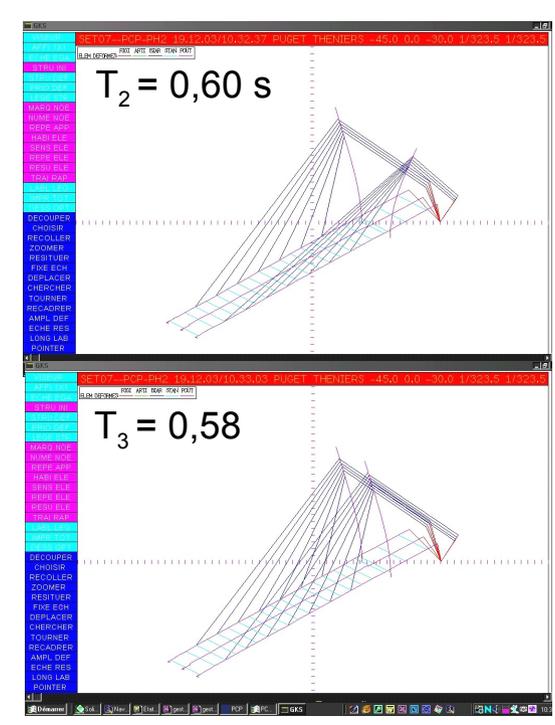
Les principaux modes de vibrations



Modes verticaux



Modes transversal et de torsion



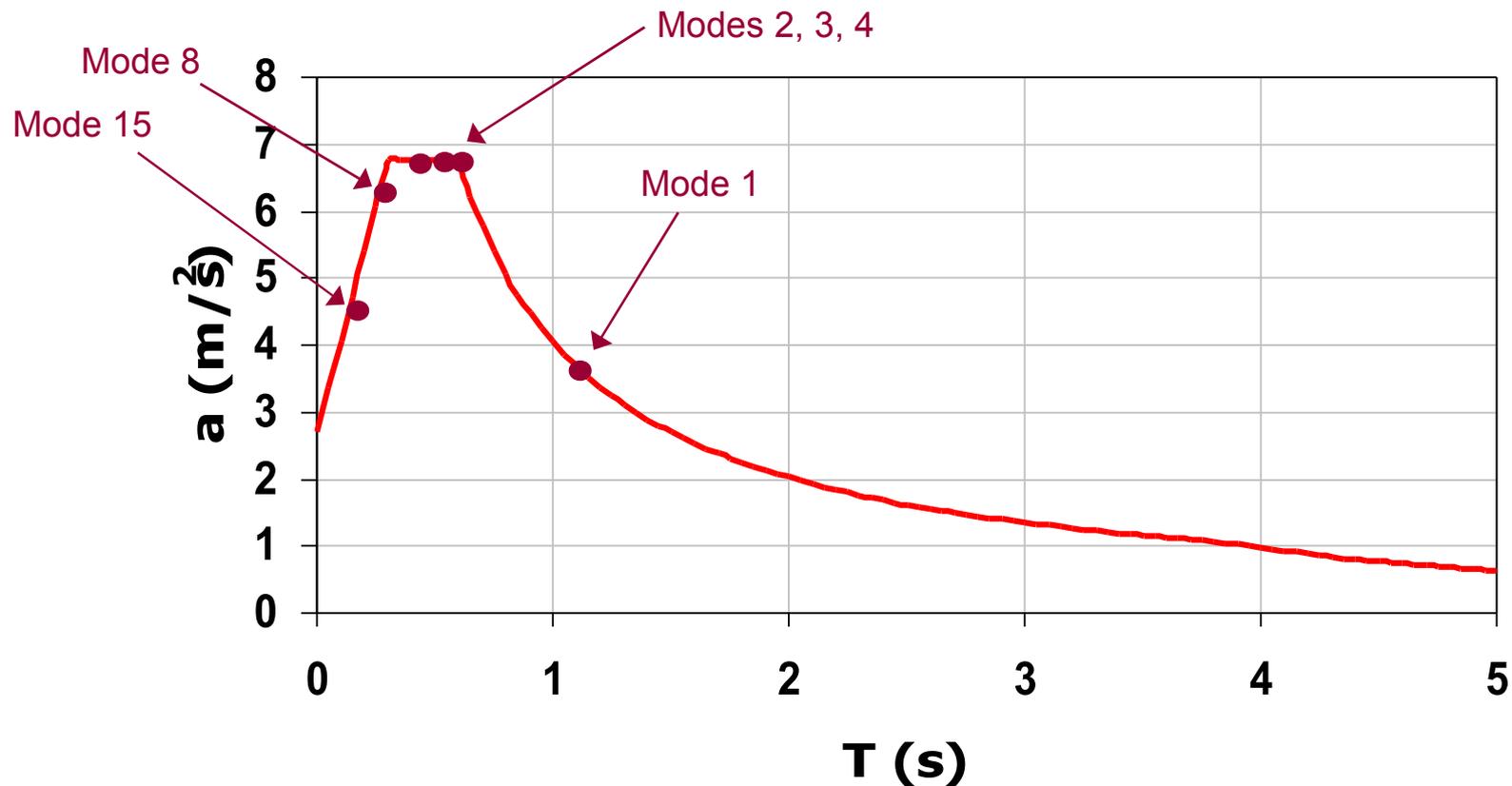
Modes propres des pylônes

Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont sur le Var à Puget-Théniers (06)

Analyse spectrale multimodale



Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont sur le Var à Puget-Théniers (06)

Les combinaisons de calcul

Combinaison quadratique des réponses modales

$$S = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + \dots}$$

Combinaison spatiale des sollicitations :

$$E_1 = E_{\text{long}} \pm 0,3 E_{\text{trans}} \pm 0,3 E_{\text{vert}}$$

$$E_2 = E_{\text{trans}} \pm 0,3 E_{\text{long}} \pm 0,3 E_{\text{vert}}$$

$$E_3 = E_{\text{vert}} \pm 0,3 E_{\text{long}} \pm 0,3 E_{\text{trans}}$$

Combinaison de calcul : $G + P + E + \Psi_{21} Q_{1k} + \Psi_2 T$

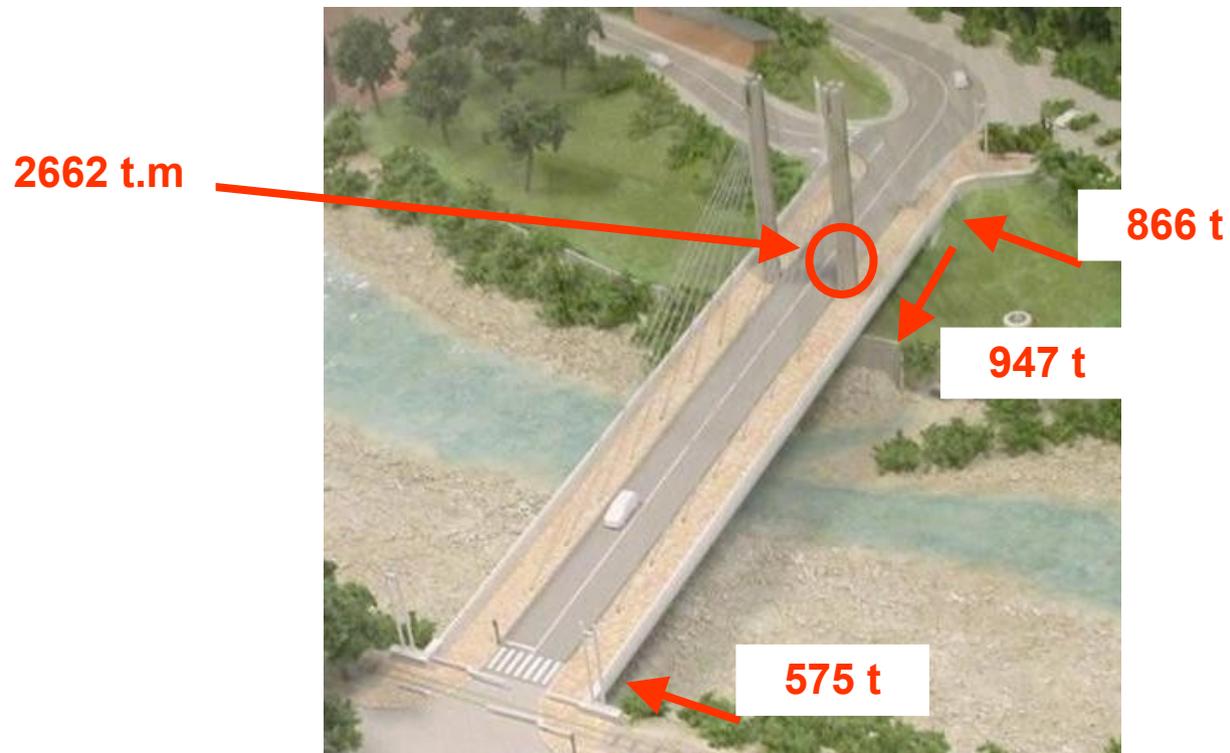


Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont sur le Var à Puget-Théniers (06)

Principaux efforts sismiques

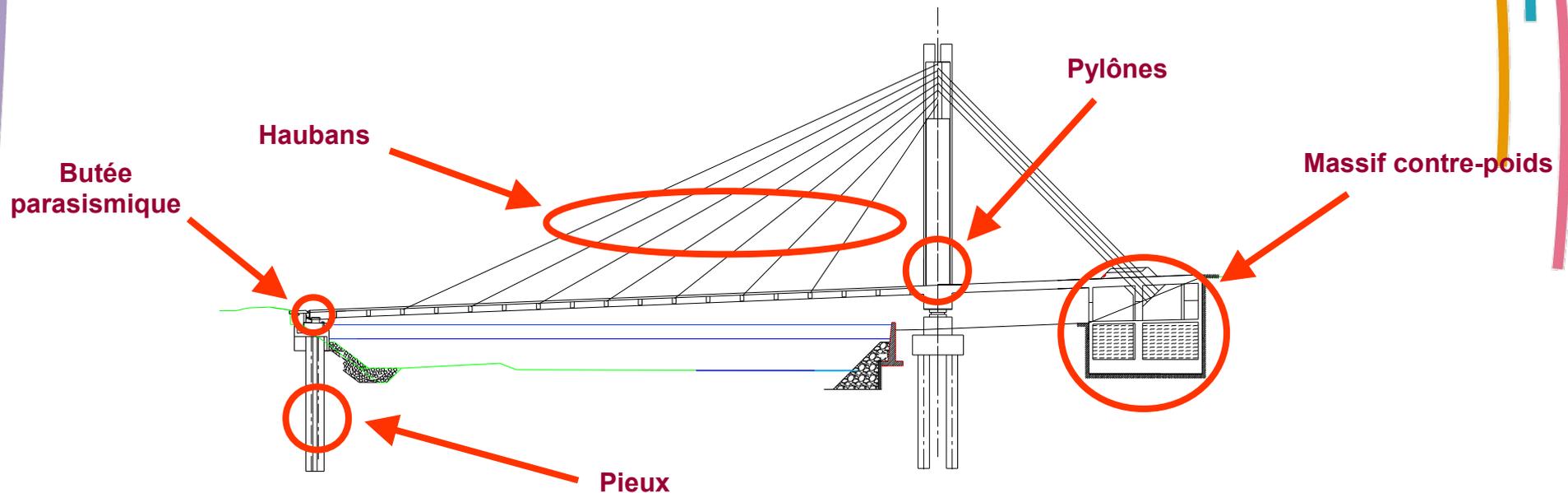


Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont sur le Var à Puget-Théniers (06)

Les dispositifs anti-sismiques sur l'ouvrage

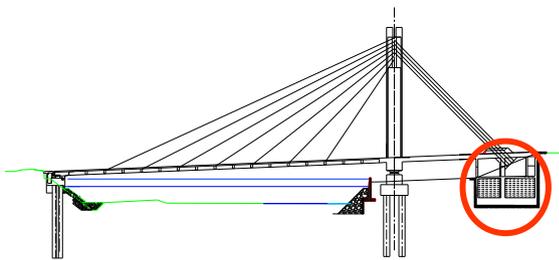


Conception parasismique des ponts (2/2)

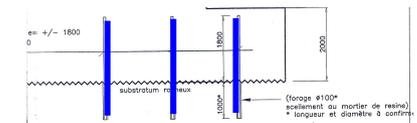
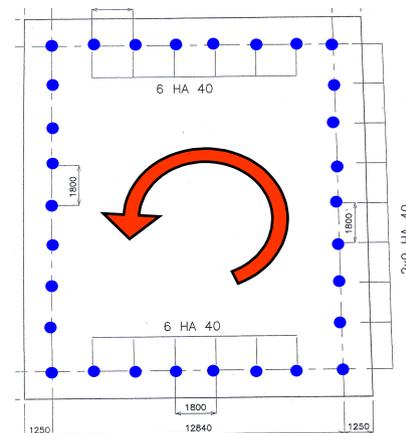
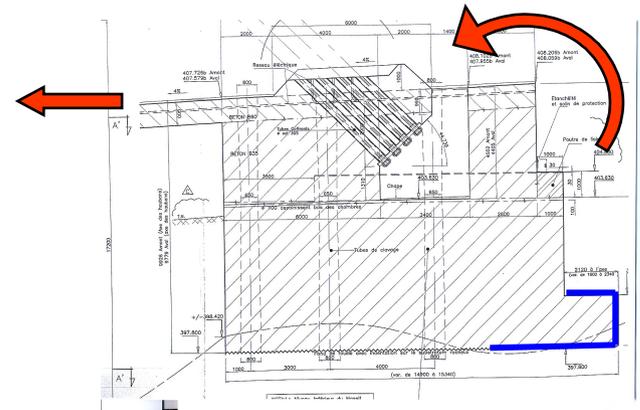
Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont sur le Var à Puget-Théniers (06)

Les dispositifs anti-sismiques sur l'ouvrage



Massif contre-poids



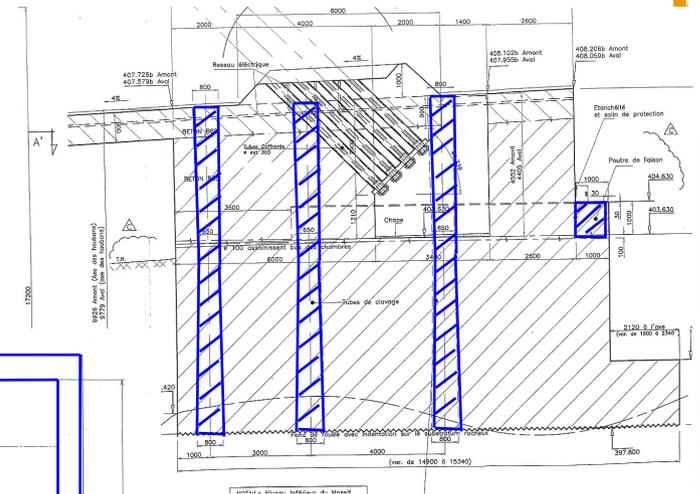
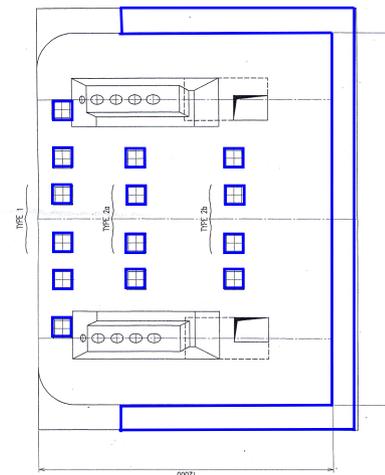
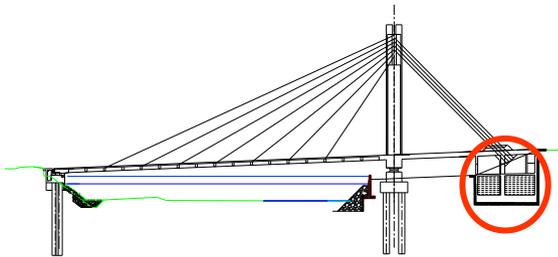
Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont sur le Var à Puget-Théniers (06)

Les dispositifs anti-sismiques sur l'ouvrage

Massif contre-poids



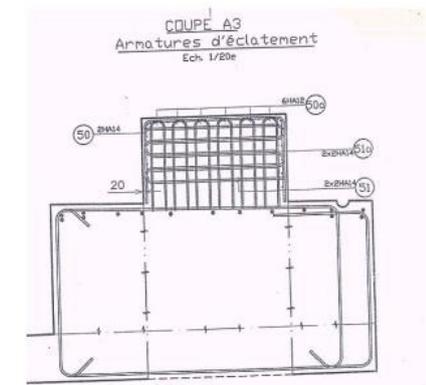
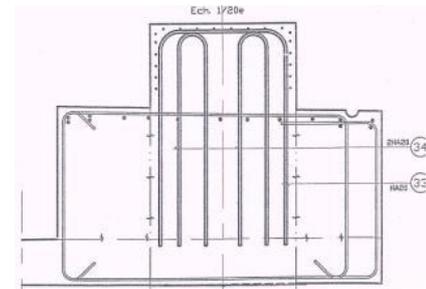
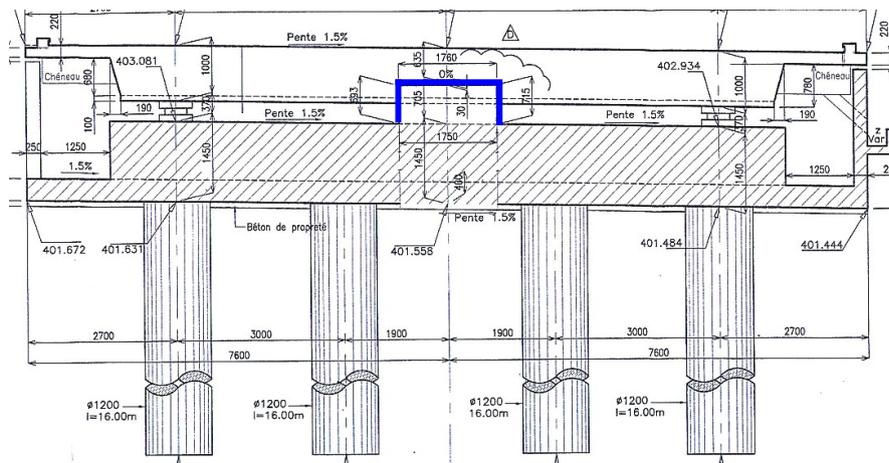
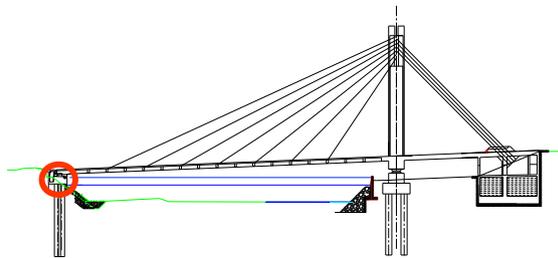
Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont sur le Var à Puget-Théniers (06)

Les dispositifs anti-sismiques sur l'ouvrage

Butée parasismique culée RG



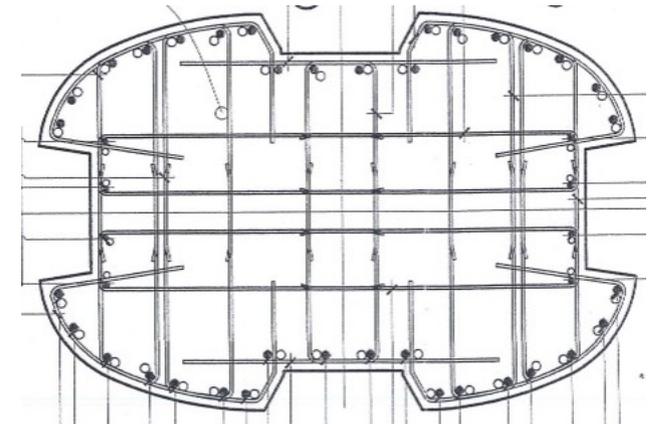
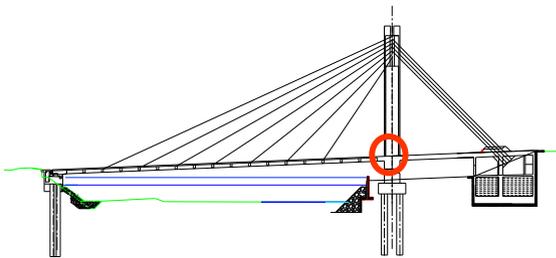
Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont sur le Var à Puget-Théniers (06)

Les dispositifs anti-sismiques sur l'ouvrage

Ferrailage du pylône



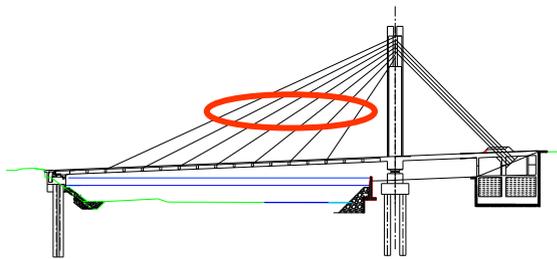
Espacement vertical : $e = 140 \text{ mm}$

Conception parasismique des ponts (2/2)

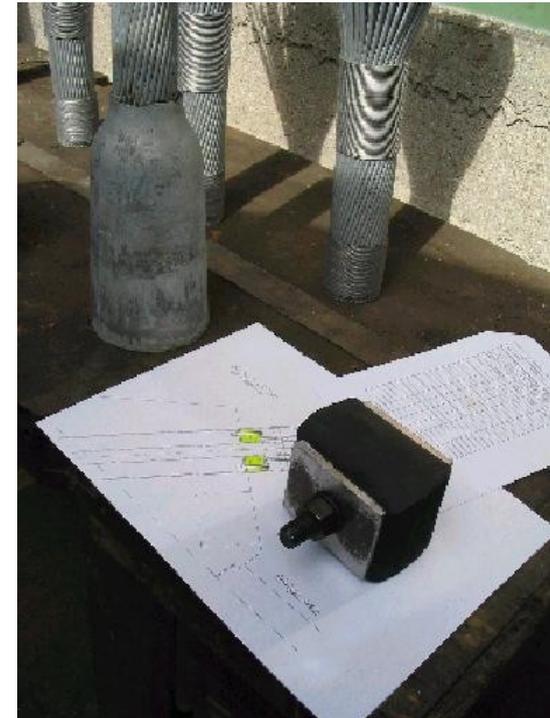
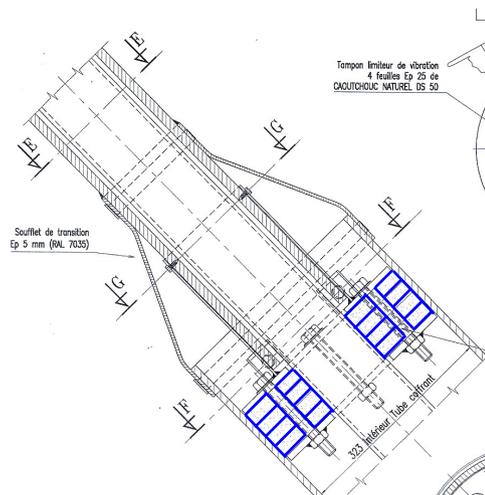
Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont sur le Var à Puget-Théniers (06)

Les dispositifs anti-sismiques sur l'ouvrage



Dispositifs anti-vibration des haubans



Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont de Rion-Antirion (Grèce)

Présentation de l'ouvrage



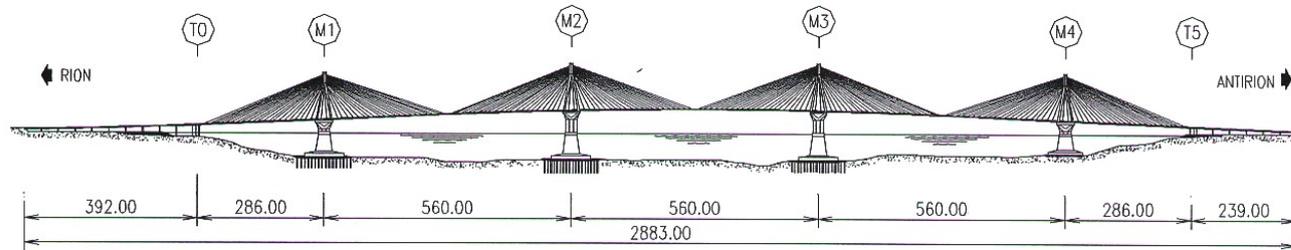
- Pont autoroutier entre Grèce continentale et Péloponnèse
- Longueur totale : 2883 m
- Largeur : 27 m
- Hauteur des pylônes : 227 m (dont 63 m sous l'eau)
- 5 ans de construction

Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont de Rion-Antirion (Grèce)

Présentation de l'ouvrage



- Construction : Vinci
- Contrat de concession de 42 ans attribué à Geyfira
- Trafic prévu : 11000 véh./j

Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont de Rion-Antirion (Grèce)

Définition de l'aléa sismique

- **9 séismes majeurs** ($M > 6$) enregistrés dans la zone depuis 1965
- **Activité tectonique** : écartement des berges de 8 mm/an pouvant atteindre brutalement 25 cm en cas de fort séisme
- Sol alluvionnaire présentant une très forte sensibilité à la **liquéfaction** et absence de substratum à moins de 500 m de profondeur rendant impossible toute solution de fondation profonde



Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont de Rion-Antirion (Grèce)

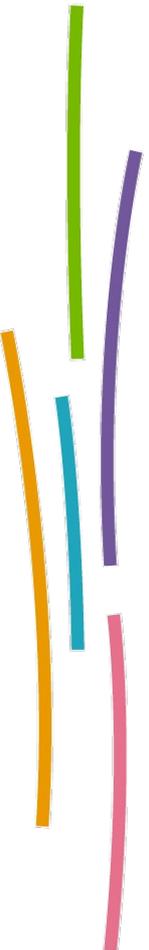
Objectifs de la conception parasismique

L'ouvrage a été conçu pour :

- résister à une d'accélération nominale **0,48 g** associée à un séisme de magnitude 7 et de **période de retour de 2000 ans**
- supporter un déplacement de 2 m dans n'importe quelle direction entre 2 pylônes adjacents
- rester élastique sous l'effet de vents violents de 250 km/h et d'un choc d'un bateau pétrolier de 180 000 tonnes



Conception basée sur un certain nombre de systèmes fusibles

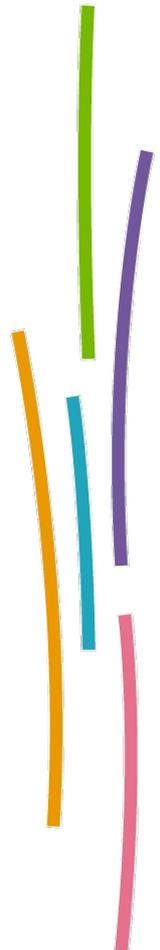
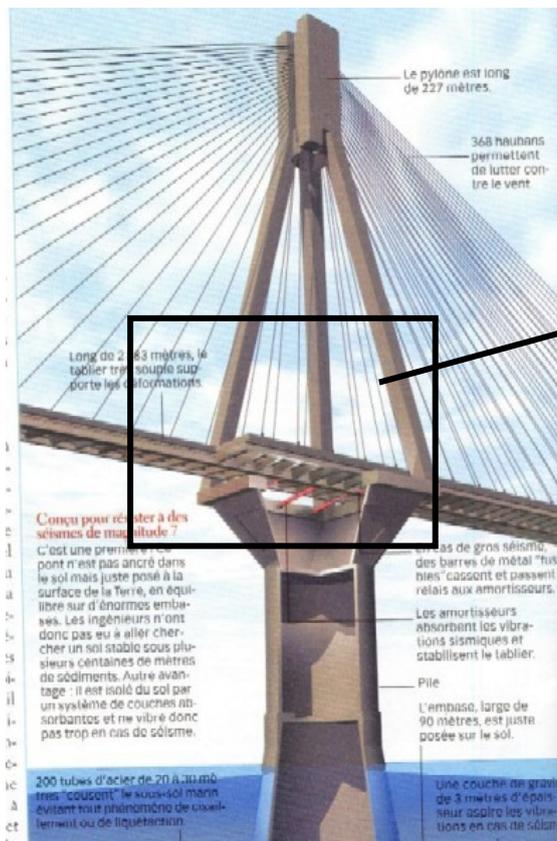


Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont de Rion-Antirion (Grèce)

Éléments de conception parasismique



Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont de Rion-Antirion (Grèce)

Éléments de conception parasismique



Amortisseurs visqueux prenant le relais des fusibles pour :

- limiter les déplacements
- dissiper une partie de l'énergie sismique

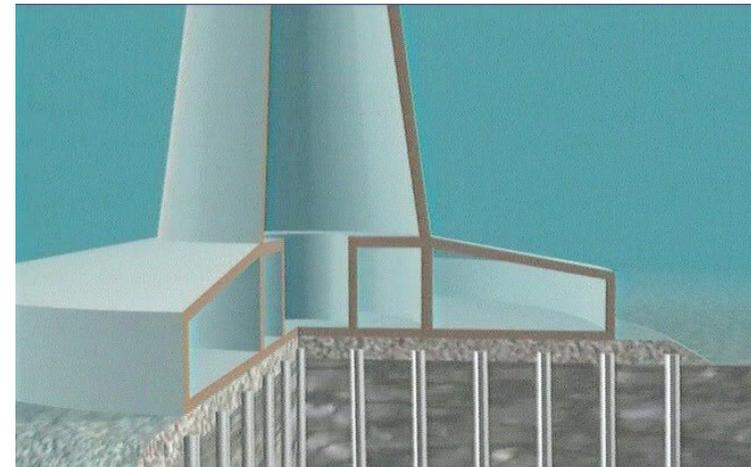
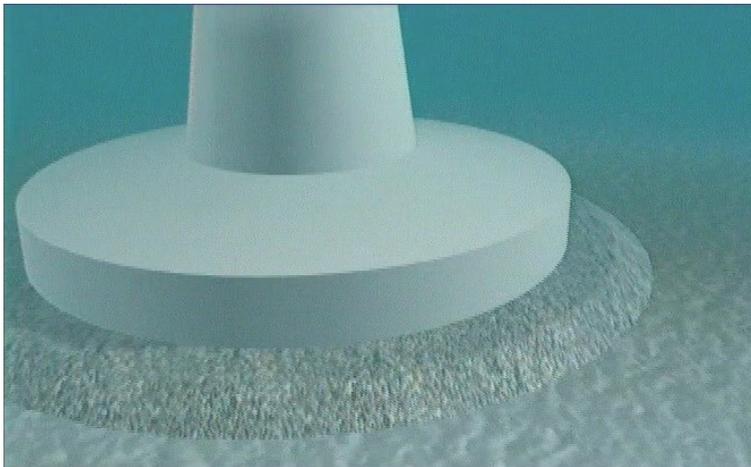
+ Joints de dilatation longitudinaux de course 5 m disposés au niveau de chaque culée

Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont de Rion-Antirion (Grèce)

Éléments de conception parasismique



Fondations superficielles sur lit de gravier et sol renforcé :

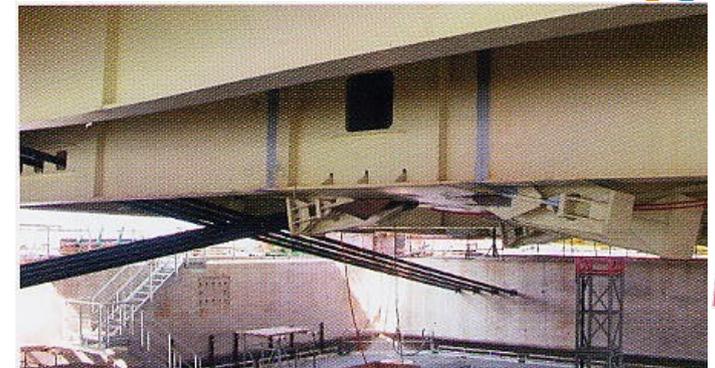
- suppression du risque de liquéfaction
- écrêtage des efforts sismiques
- dissipation d'énergie par friction

Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont de Rion-Antirion (Grèce)

Prise en compte du séisme en phase de construction

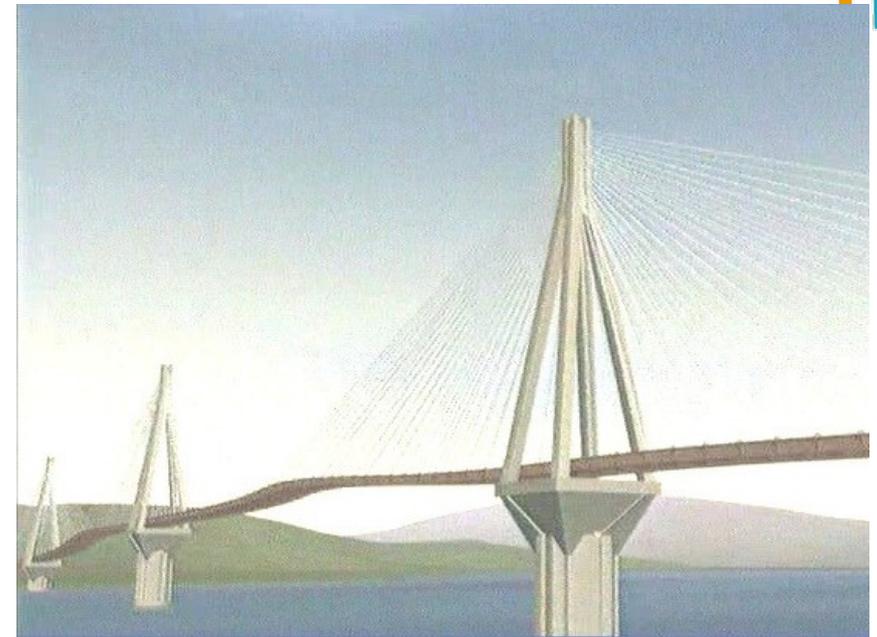
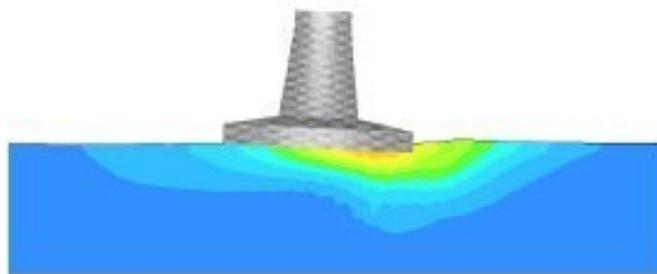
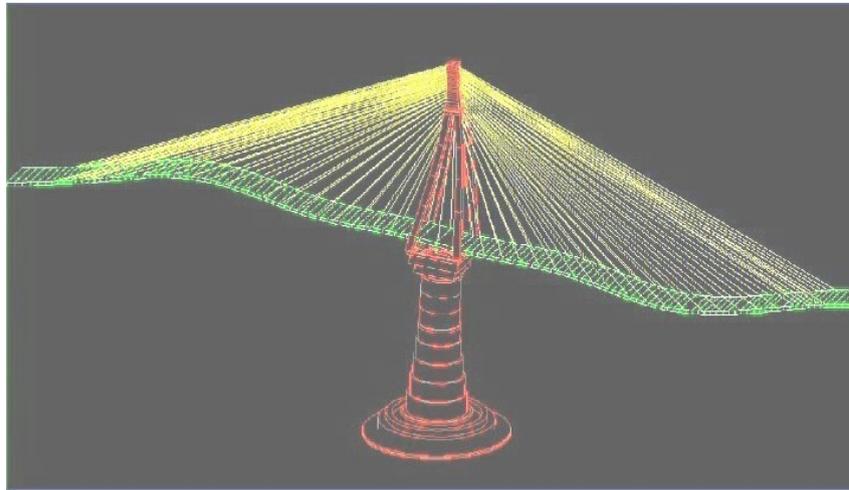


Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont de Rion-Antirion (Grèce)

Modélisations numériques

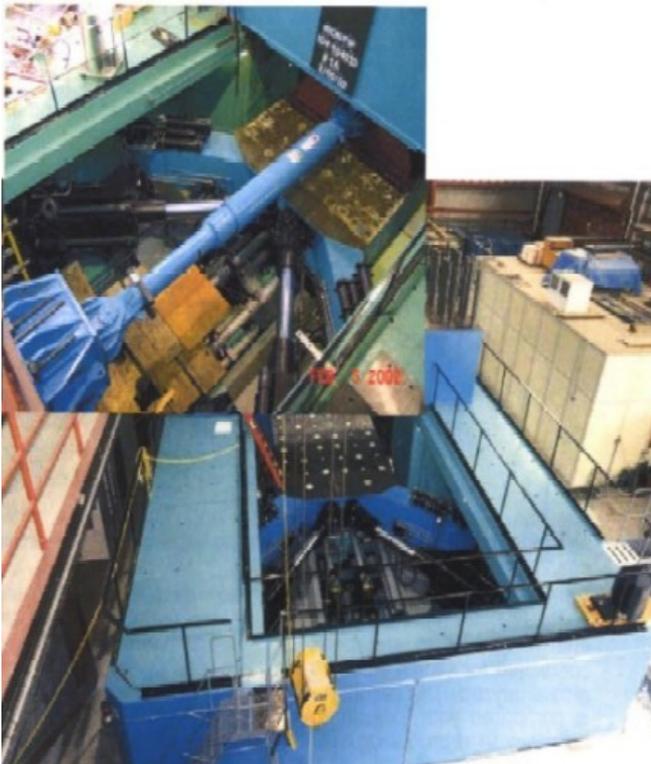


Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemples de ponts parasismiques en France et en Europe

- Le pont de Rion-Antirion (Grèce)

Essais en laboratoire



- Amortisseurs testés à échelle réelle à l'Université de Californie, San Diego

- Système de fondation testés à échelle 1/100ème au LRPC de Nantes à partir d'échantillons de sol prélevés sur le site

