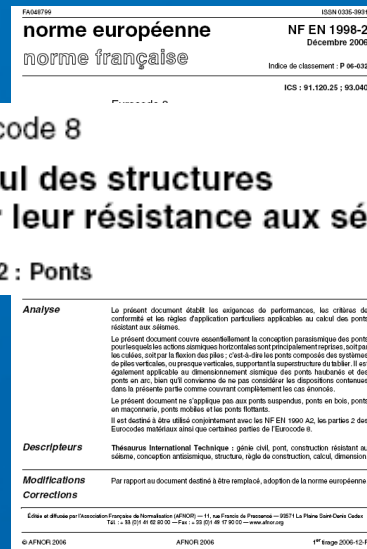


Comparaisons entre l'Eurocode 8 et les PS92 au travers de 2 exemples de dimensionnement parasismique d'ouvrages d'art



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

Analyse
Le présent document établit les exigences de performances, les critères de conformité et les règles d'application particulières applicables au calcul des ponts résistants aux séismes.
Le présent document couvre essentiellement la conception parasismique des ponts pour lesquels les actions sismiques horizontales sont principalement prises, soit par les colonnes, soit par la réaction des piles. Ceci inclut les ponts composés des systèmes de piles verticales, ou presque verticales, supportant la superstructure du tablier. Il est également applicable au dimensionnement sismique des ponts haubérés et des ponts en arc, bien qu'il convienne de ne pas considérer les dispositions contenues dans la présente partie comme couvrant complètement les cas énoncés.
Le présent document ne s'applique pas aux ponts suspendus, ponts en bois, ponts en maçonnerie, ponts mobiles et les ponts flottants.
Il est destiné à être utilisé conjointement avec les NF EN 1990 à 2, les parties 2 des Eurocodes matériaux ainsi que certaines parties de l'Eurocode 8.

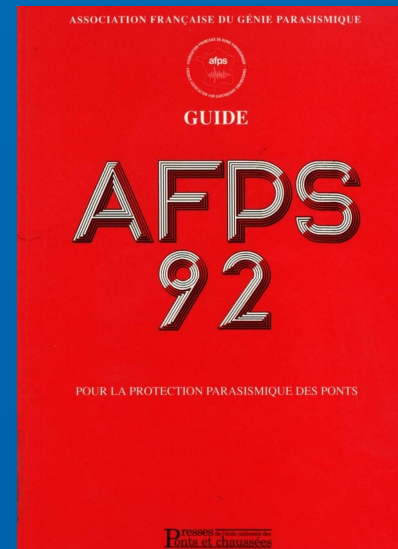
Descripteurs
Thésaurus International Technique : génie civil, pont, construction résistant au séisme, conception antisismique, structure, règle de construction, calcul, dimension.

Modifications
Par rapport au document destiné à être remplacé, adoption de la norme européenne.

Corrections

Édité et diffusé par l'Association Française de Normalisation (AFNOR) — 11, rue Francis de Pressensac — 92471 La Plaine Saint-Denis Cedex
Tél. : 33 (0)1 41 62 20 20 — Fax : 33 (0)1 41 62 20 22 — www.afnor.org

© AFNOR 2006 AFNOR 2006 1^{er} tirage 2006-12-F



J.P. Deveaud – Sétra
D. Davi - CETE Méditerranée
Jeudi 30 juin 2011



Sommaire

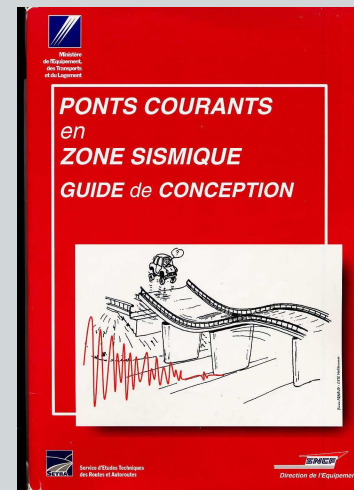
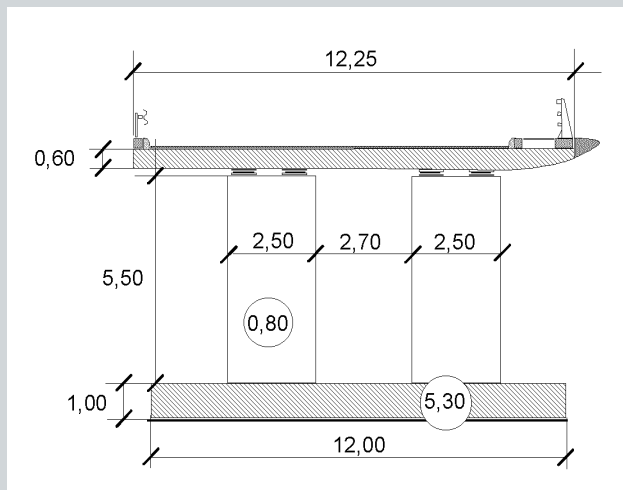
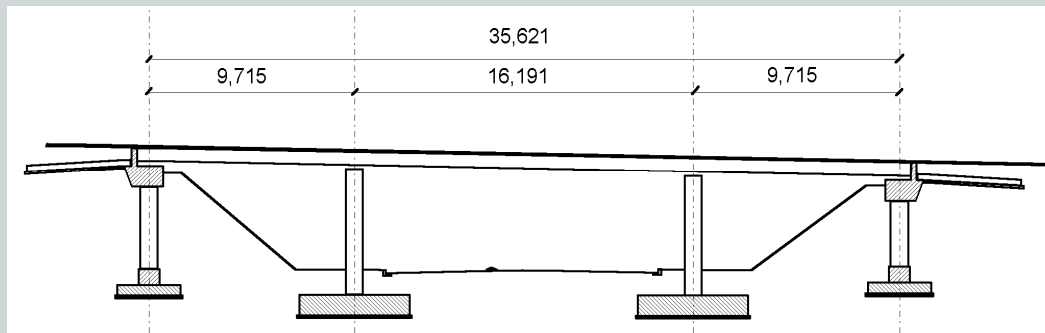
- Exemple 1 : Pont dalle à 3 travées, conception élastique ($q = 1$)
- Exemple 2 : Viaduc en béton précontraint, conception ductile ($q > 1,5$)

(Caractérisation de l'aléa, hypothèses de calcul, méthodes d'analyse, éléments de dimensionnement, dispositions constructives)



Exemple 1 : Pont dalle à 3 travées, conception élastique ($q = 1$)

Présentation de l'ouvrage



Exemple 1 : Pont dalle à 3 travées, conception élastique ($q = 1$)

Principe de conception parasismique

- Le tablier repose sur 16 appareils d'appuis en élastomère fretté, bloqués transversalement au culée.
- Le mur garde grève est fusible
- Dimensionné pour rester « élastique » sous séisme ($q=1$)
- Les AA sont vérifiés suivant NF EN 15129 « Dispositifs anti-sismiques »



Exemple 1 : Pont dalle à 3 travées, conception élastique ($q = 1$)

Matériaux :

Béton **C35/45** pour le tablier, les piles, les culées les semelles et les pieux

- Contrainte limite à l'ELU sismique : $f_{ck}/1,3=26,9$ MPa

Aciers HA, classe de ductilité B, $f_{yk} = 500$ MPa

- Contrainte limite à l'ELU sismique : $f_{yk} /1,00 = 500$ MPa

Appareil d'appui

- $G_g=0,9$ MPa en statique
- $G_b=1.1 \times G_g=1,0$ MPa sous séisme (**PS 92 : $G = 1,2$ MPa**)



Exemple 1 : Pont dalle à 3 travées, conception élastique ($q = 1$)

Chargement statique :

- Trafic normal => pas de charge de trafic ($\Psi_{21}=0$)
- Poids propre du tablier (équipements compris) 822 tonnes soit 230.75kN/ml
- Retrait et fluage $4,9 \cdot 10^{-4}$ m/ml
- La variation uniforme de température $\Delta_{TN, \text{exp}} = 32^\circ\text{C}$, $\Delta_{TN, \text{con}} = 32^\circ\text{C}$ ($T_0 = 10^\circ\text{C}$) (ouvrage supposé en Savoie (73))



Exemple 1 : Pont dalle à 3 travées, conception élastique ($q = 1$)

Valeur de calcul de l'action sismique

- catégorie d'importance 2 $\gamma_I = 1,2$
- zone de sismicité 4 $A_{Ek} = 1,6 \text{ m/s}^2$
- sol de classe C ($S=1,5$)

$$A_{Ed} = \gamma_I \times A_{Ek} = 1,2 \times 1,6 = 1,92 \text{ m/s}^2$$

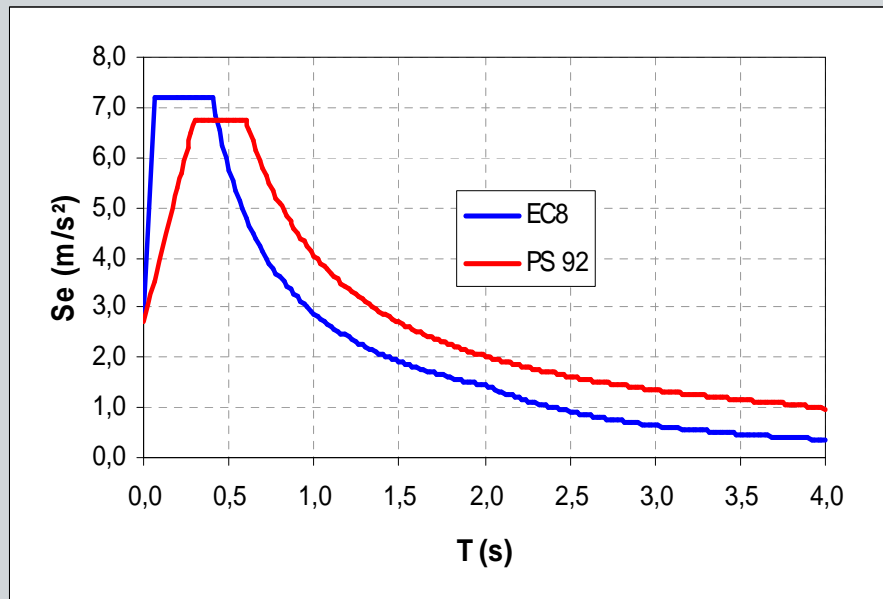
Équivalent PS 92 :

- ouvrage de classe C
- zone de sismicité II $\Rightarrow a_N = 3,0 \text{ m/s}^2$
- site de type S2

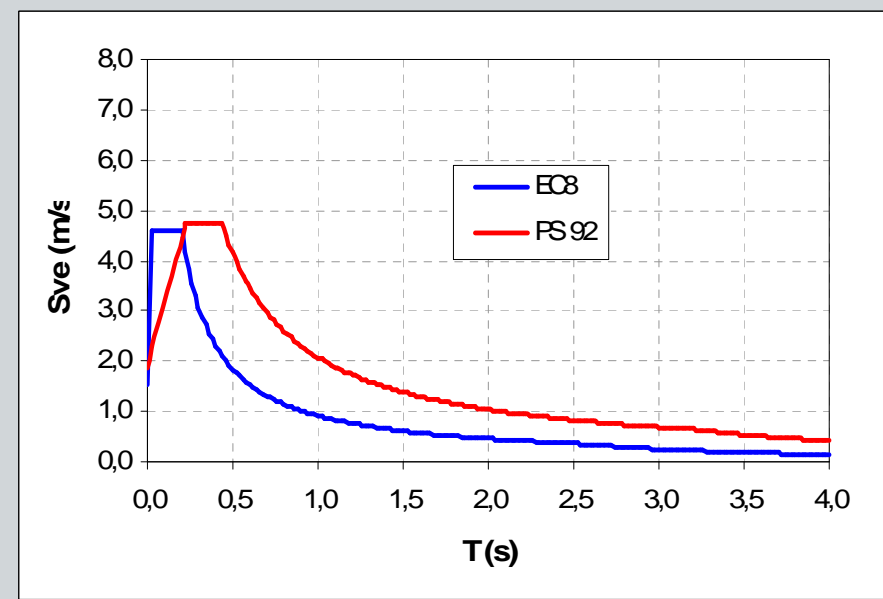


Exemple 1 : Pont dalle à 3 travées, conception élastique ($q = 1$)

Comparatif des spectres de réponse élastique



Horizontal



Vertical



Exemple 1 : Pont dalle à 3 travées, conception élastique ($q = 1$)

Méthode d'analyse

Analyse monomodale à tablier rigide en direction longitudinale ($T=0,98s - 0,80s$) et transversale.

$$Se(T=0,98s)=2,48m/s^2 \quad R(T=0,80s) \times a_N \approx Se(T=0,80s)=5,04m/s^2$$

Dimensionnement des appareils d'appui en élastomère

	EC8	PS 92
Sur culée	0,30 x 0,40 x 5 (10 + 3)	0,30 x 0,35 x 5 (10 + 3)
Sur appuis	0,40 x 0,40 x 5 (10 + 3)	0,40 x 0,40 x 5 (10 + 3)

Sollicitations sismiques issues de l'analyse

	EC 8		PS 92	
	culée	pile	culée	piles
Flong (MN)	0,500	0,710	0,948	1,124
Ftrans (MN)	2,960	-	2,775	-
Fverti (MN)	0,413	0,826	0,424	0,848
Déplacement Sismique (m)	0,120	0,104	0,092	0,077



Exemple 1 : Pont dalle à 3 travées, conception élastique ($q = 1$)

Vérification des piles

Sollicitations sismiques dans un fût de la pile

	EC8	PS 92
FL (MN)	0,705	1,124
FT (MN)	-	-
Fv (MN)	0,826	0,848
Rmax (MN)	3,561	3,440
Rmin (MN)	3,360	3,116

Combinaisons des directions

$$E1 = E_L + 0,3 (E_T + E_V)$$

$$E2 = E_T + 0,3 (E_L + E_V)$$

Combinaisons des actions

$$(1) \pm E1 + R_{\max} + PP_{\text{Pile}}$$

$$(2) \pm E2 + R_{\max} + PP_{\text{Pile}}$$



Exemple 1 : Pont dalle à 3 travées, conception élastique ($q = 1$)

Vérification des piles

Efforts et dimensionnement du ferrailage

	EC8		PS92	
	1	2	1	2
Effort horizontaux longitudinaux, VL	<u>0,405</u>	0,121	<u>0,592</u>	0,178
Efforts horizontaux transversaux, VT	0,059	0,198	0,056	0,186
Moment longitudinal, ML	<u>2,016</u>	0,605	<u>3.133</u>	0,940
Moment transversal, MT	0,168	0,545	0,153	0,510
Effort normal, N	<u>1,539</u>	1,910	<u>1,700</u>	2,128



Exemple 1 : Pont dalle à 3 travées, conception élastique ($q = 1$)

Vérification des piles

- Le calcul du ferrailage longitudinal conduit à $39,90 \text{ cm}^2$ inférieur au ferrailage mini de l'Eurocode 2 §9.2.1.1 (= 43 cm^2),

- Pour le ferrailage transversal (tranchant)

$\gamma_{Bd1} \cdot V_{Ed} = 1,25 \times 0,405 = 0,506 \text{ MN} < V_{rdc} = 0,915 \text{ MN} \Rightarrow$ on dispose le ferrailage mini de l'Eurocode 2 §9.2.2(5)

$$\rho_{w,\min} = (0,08 \cdot f_{ck}^{1/2}) / f_{yk} = 0,08 \times 35^{1/2} / 500 = 9,47 \cdot 10^{-4}$$

PS 92 γ_{Bd1} (était noté γ_R) = 1,4

NOTA :

Pour les piles, le fait d'avoir réalisé le dimensionnement avec $q=1$ alors que la typologie des piles autoriserait de prendre $q = 1,5$ permet de s'affranchir des dispositions constructives de l'EC8 (***point en cours de discussion pour les ponts équipés d'AA élastomères***).

Les dispositions constructives à appliquer sont celles **de l'EC2, sauf...**



Exemple 1 : Pont dalle à 3 travées, conception élastique ($q = 1$)

Les dispositions constructives à appliquer sont celles de l'EC2, sauf pour les fondations profondes

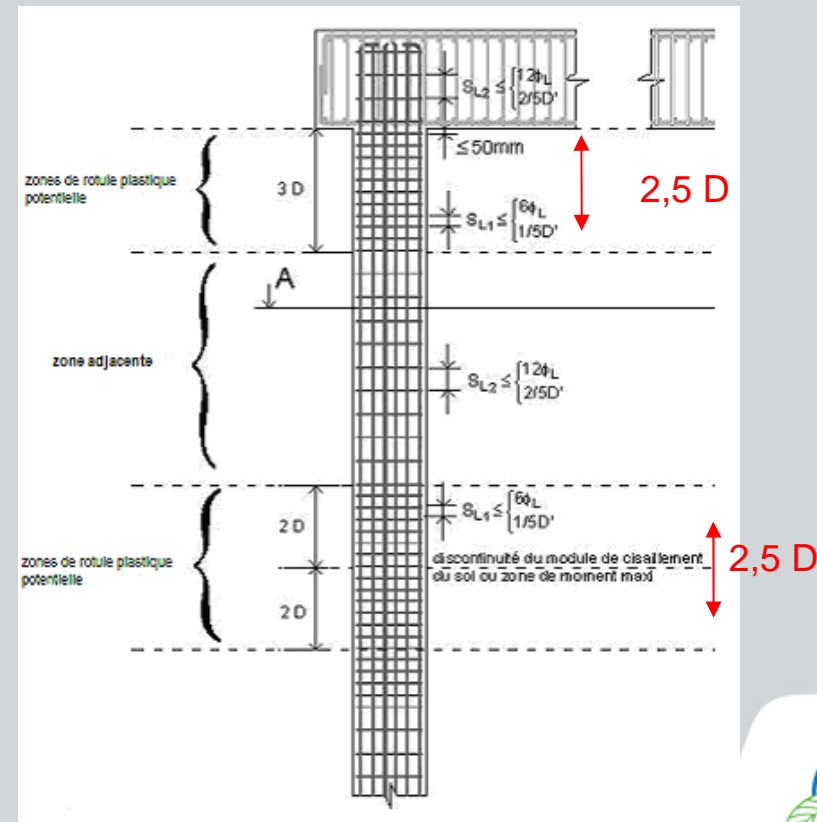
Doivent être traitées comme des zones de RPP

-zone d'encastrement du pieu dans la semelle sur 3 diamètres

-zone de moment maxi (2 diamètres de part et d'autre)

-interface de couche de sol avec un module très différent (rapport de 6)(2 diamètres de part et d'autre)

En zones courantes, dispositions EC2



Exemple 1 : Pont dalle à 3 travées, conception élastique ($q = 1$)

Conclusions

- Méthodes d'analyse globalement similaires entre EC8-2 et PS92
- Efforts sismiques selon EC8-2 sensiblement moins élevés (effets forme spectre + module plus faible des AA élastomère)
- Dispositions constructives imposées par l'EC8-2 beaucoup moins contraignantes dans le cas d'une conception parfaitement élastique ($q=1$)



Exemple 2 : Viaduc en béton précontraint, conception ductile ($q > 1,5$)

Présentation de l'ouvrage

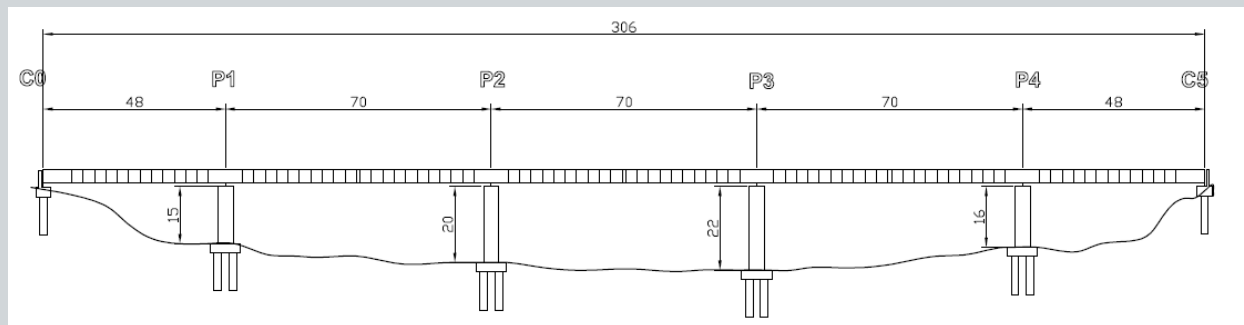
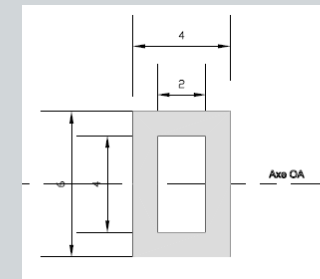
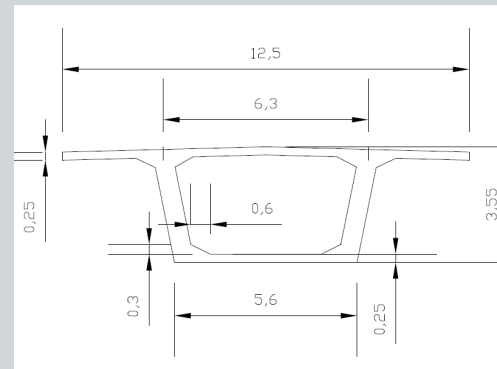
- Ouvrage fictif, inspiré d'un ouvrage réel, régulier au sens de l'EC8-2

- **Tablier (C45) :**

- 2 voies de 3,50 m + 2 BAU
- Biais nul
- $M_{\text{tab}} = 8300 \text{ t}$

- **Piles rectangulaires creuses (C35)**

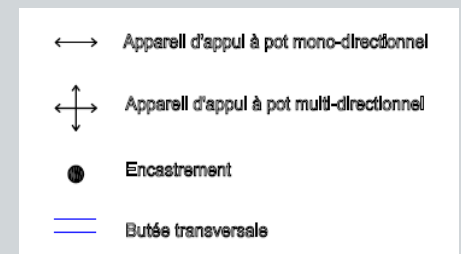
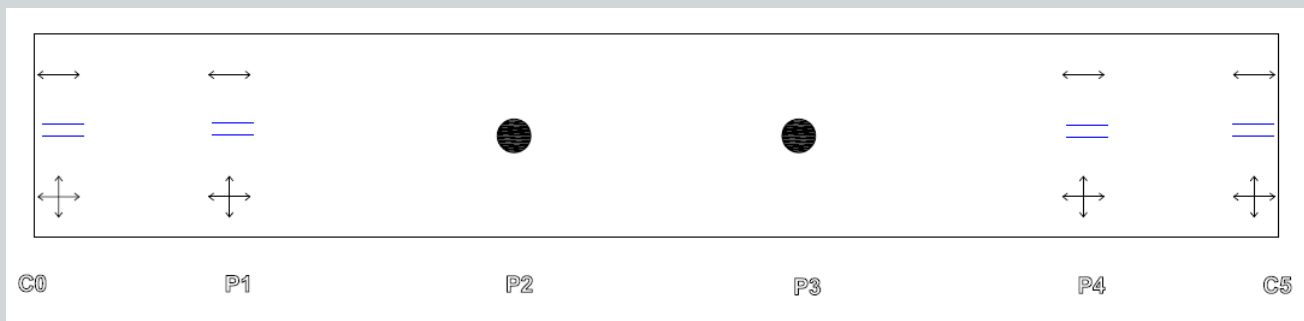
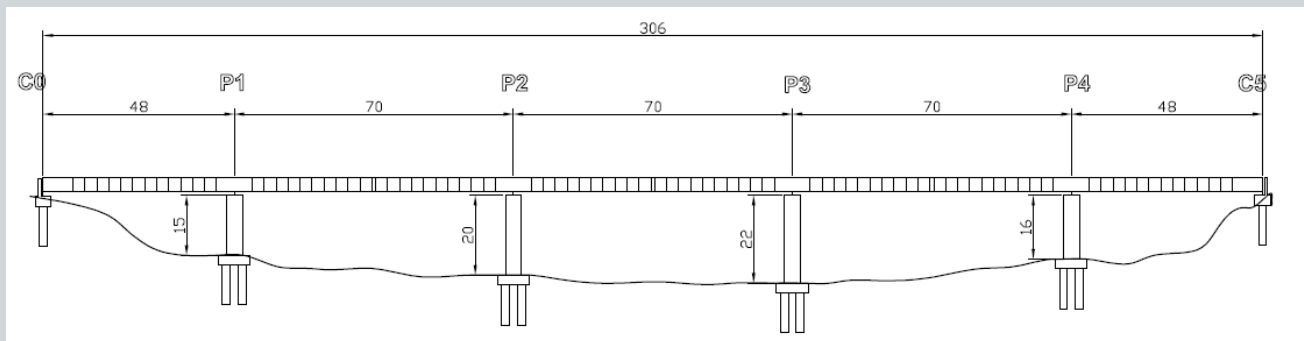
- $M_{\text{piles}} = 600 \text{ à } 880 \text{ t}$
- Fondées sur barrettes



Exemple 2 : Viaduc en béton précontraint, conception ductile ($q > 1,5$)

Présentation de l'ouvrage

- Schéma statique



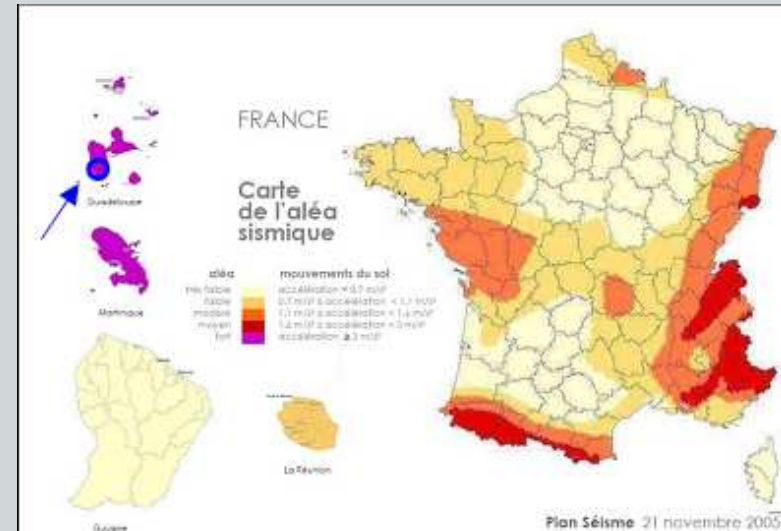
Exemple 2 : Viaduc en béton précontraint, conception ductile ($q > 1,5$)

Contexte sismique

- Guadeloupe : Zone 5 $\Rightarrow A_{Ek} = 3,0 \text{ m/s}^2$
- Ouvrage stratégique : Catégorie IV
 $\Rightarrow \gamma_I = 1,4$
- Sol cohérent sur-consolidé : Classe B
 $\Rightarrow S = 1,2$
- Zone montagneuse : Effet topographique
 $\Rightarrow \tau = 1,3$

$$A_{Ed} = \gamma_I \cdot A_{Ek} = 4,20 \text{ m/s}^2$$

$$A_{Ev} = 0,90 A_{Ed} = 3,78 \text{ m/s}^2$$



Selon PS 92 :

- Zone III, classe D $\Rightarrow a_N = 4,5 \text{ m/s}^2$
- Site S1 (intégré directement dans le spectre)
- $\tau = 1,3$
- $a_{Nv} = 0,7 a_N = 3,15 \text{ m/s}^2$



Exemple 2 : Viaduc en béton précontraint, conception ductile ($q > 1,5$)

Choix de conception parasismique et hypothèses de calcul

- Conception ductile, plastifications prévues :
 - Longitudinalement : piles P2 et P3 (*pieds et têtes*)
 - Transversalement : piles P1, P2, P3, P4 (*pieds*)
 - $q_{\max \text{ applicable}} = 3,2$ ($q=1$ en vertical)
- Fondations supposées parfaitement encastrées
- Calculs en ***inerties fissurées***
 - **Tablier** ($0,5 I_{\text{Torsion}}$ – EC8-2 §2.3.6.1)
 - **Piles** (EC8-2 §2.3.6.1 et Ann. C)

$$J_{\text{eff}} = 1,2 M_{\text{Rd}} / (\phi_y \cdot E_c)$$

Nécessite de prédimensionner l'ouvrage...

Selon PS 92 :

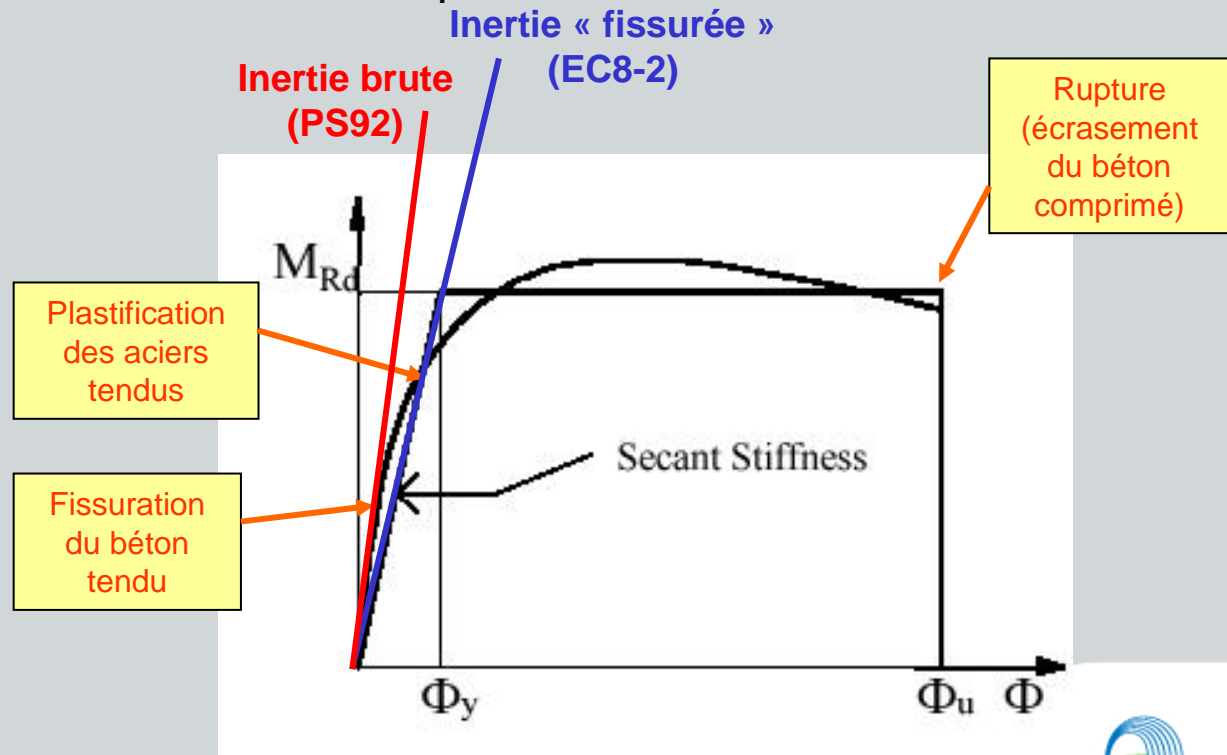
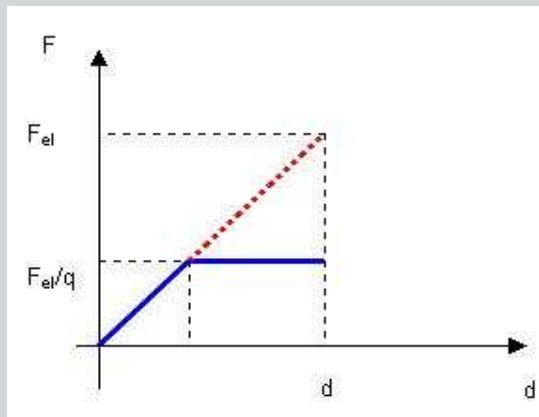
- **$q = 2,3$**
- Calculs en ***inertie brute***



Exemple 2 : Viaduc en béton précontraint, conception ductile ($q > 1,5$)

Evaluation de l'inertie fissurée des piles

- Rappel de la théorie du coefficient de comportement :



Exemple 2 : Viaduc en béton précontraint, conception ductile ($q > 1,5$)

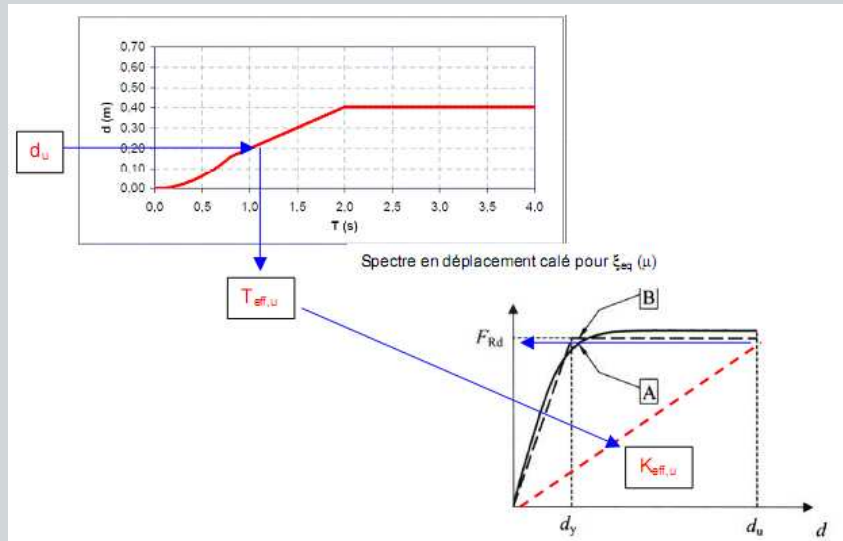
Evaluation de l'inertie fissurée des piles

- Prédimensionnement par la méthode directe en déplacement
 - « Direct Displacement or Performance Based Design » (US, NZ)
 - Analyse initiée par l'évaluation du déplacement (ou endommagement) acceptable

(ex : $2\% H$; $q_{max} \times d_y$; 25 cm)

$$\phi_y = 2,1 \varepsilon_{sy}/d$$

(cf. EC8-2 eq. C.5)



$$\Rightarrow M_{Rd\ long} = 160\ MNm ; I_{fiss} = 16\% I_{brute}$$

$$\Rightarrow M_{Rd\ trans} = 230\ MNm ; I_{fiss} = 10\% I_{brute}$$

Vérification de l'homogénéité des ductilités appelées dans chaque pile :

$$r_{max_Long} / r_{min_Long} = 2,87 / 2,36 = 1,22 < 1,5 ;$$

$$r_{max_Trans} / r_{min_Trans} = 3,24 / 2,42 = 1,34 < 1,5.$$

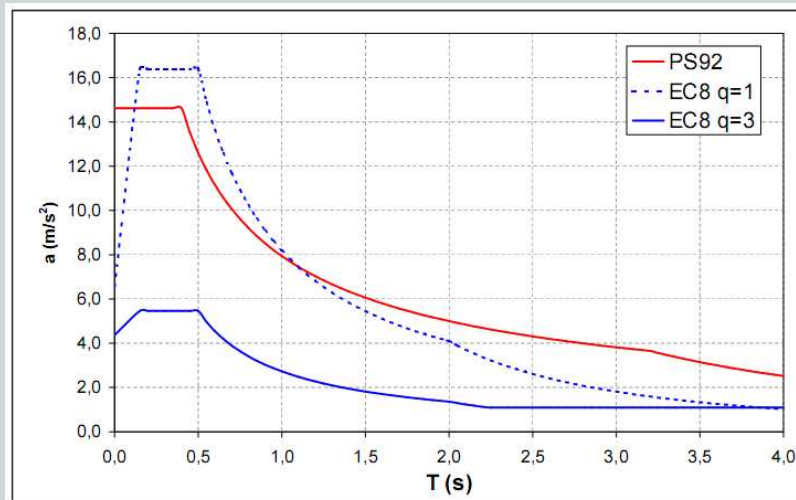
$\Rightarrow q = 2,7$
pour chaque direction horizontale



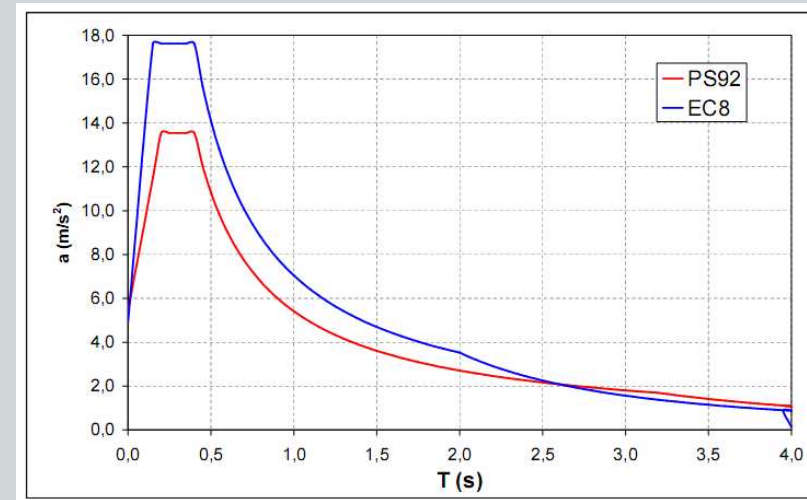
Exemple 2 : Viaduc en béton précontraint, conception ductile ($q > 1,5$)

Analyse spectrale multimodale

- Spectres de calcul



Spectres horizontaux ($\xi = 5\%$ - BA)



Spectres verticaux ($\xi = 2\%$ - BP)

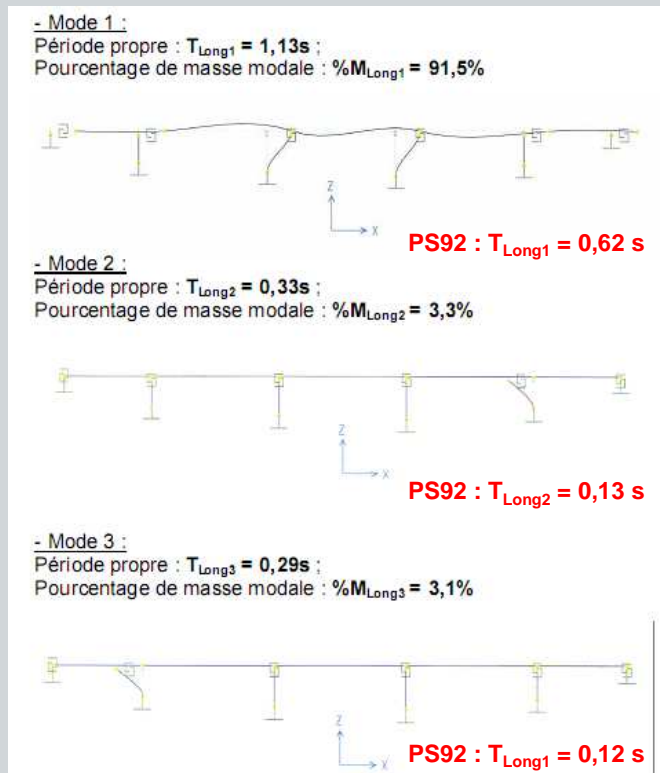
Tablier BP \Rightarrow la composante verticale (ascendante) peut-être dimensionnante pour le tablier



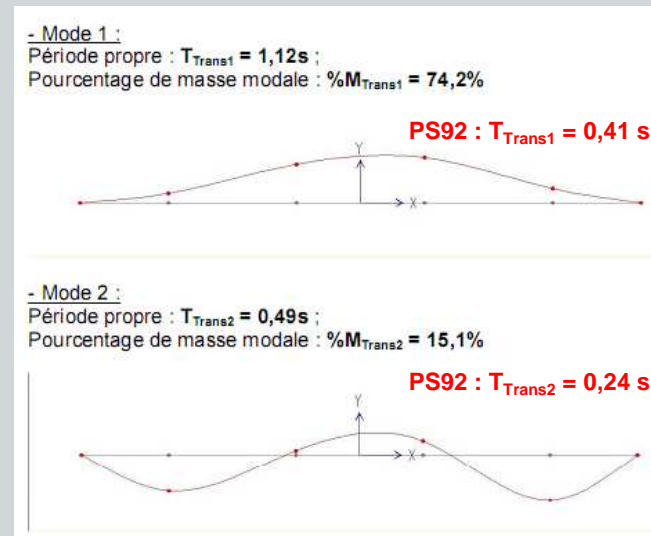
Exemple 2 : Viaduc en béton précontraint, conception ductile ($q > 1,5$)

Analyse spectrale multimodale

- Principaux modes de vibration horizontaux



Modes longitudinaux



Modes transversaux



Exemple 2 : Viaduc en béton précontraint, conception ductile ($q > 1,5$)

Principaux éléments de dimensionnement

- Sollicitations principales

- $M_{Ed \text{ long}}$ en pied de P2 = 170 MNm \Rightarrow **HA32 e200** (faces ext. et int.)
- Moments hors rotules plastiques $\times \gamma_0$ (=1,35)
- Efforts tranchants $\times \gamma_0$ (=1,35) $\times \gamma_{Bd}$ (=1,25) = 27 MN \Rightarrow **4 cadres HA20 e200**
- $d = q \cdot d_{\text{séisme}} + d_{\text{perm}} + 0,5 d_{Th} = 0,235 + 0,041 + 0,5 \times 0,031 = \mathbf{0,292 \text{ m}}$

Selon PS92 :

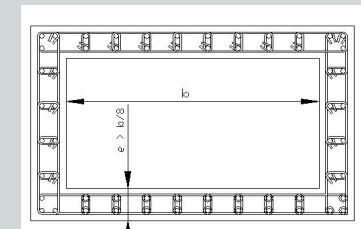
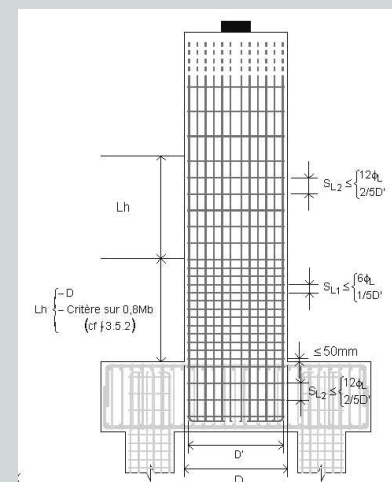
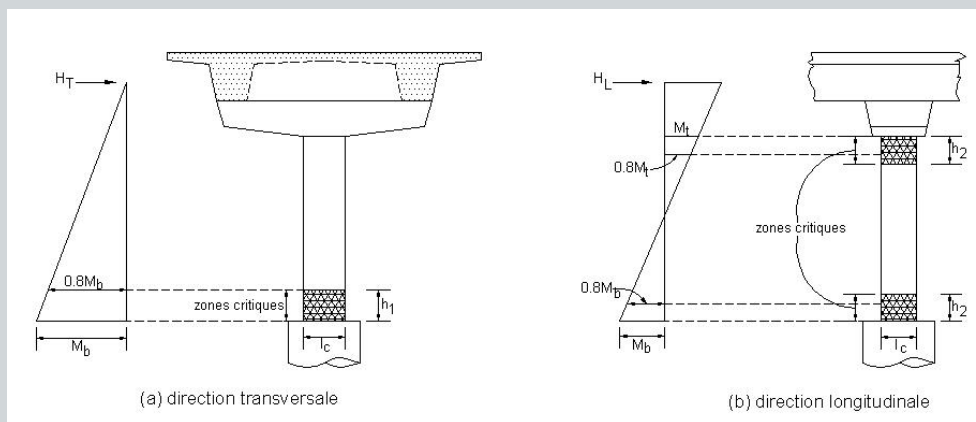
- $M_{Ed \text{ long}}/q$ en pied de P2 = 355 MNm \Rightarrow **2 HA40 e200** (faces ext. et int.)
- Moments hors rotules plastiques $\times \gamma_0$ (=1,2)
- Efforts tranchants $\times \gamma_0$ (=1,2) $\times \gamma_R$ (=1,4) = 61 MN \Rightarrow **4 cadres HA32 e200**
- $d = d_{\text{séisme}} + d_{\text{perm}} + 0,4 d_{Th} = 0,105 + 0,041 + 0,4 \times 0,031 = \mathbf{0,177 \text{ m}}$



Exemple 2 : Viaduc en béton précontraint, conception ductile ($q > 1,5$)

Principaux éléments de dimensionnement

- Dispositions constructives
 - Concentrées dans les zones de rotules plastiques potentielles (piles + barrettes)
(PS 92 concernent toute la hauteur de pile + semelles + barrettes)
 - Concerne essentiellement les armatures transversales (*confinement béton + anti-flambement*)
⇒ **4 cadres HA25 e160** (PS92 : mêmes principes + aciers long.)
 - Recouvrement des aciers longitudinaux interdit dans les rotules plastiques ! (toléré dans PS92)
 - Aciers long. : **classe ductilité C dans les rotules**, B ailleurs (non précisé dans PS92)



Exemple 2 : Viaduc en béton précontraint, conception ductile ($q > 1,5$)

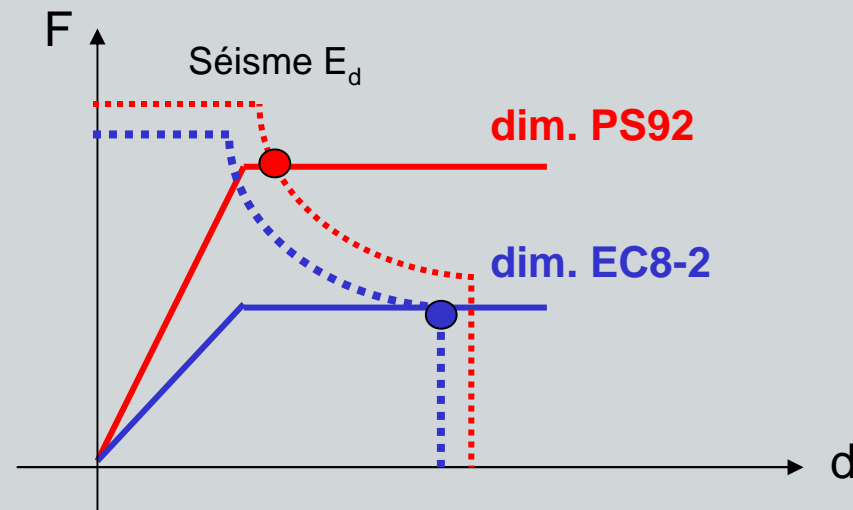
Conclusions

- La prise en compte de l'inertie fissurée dans l'EC8-2 complexifie sensiblement l'analyse par rapport aux règles PS92 pour une conception ductile
- L'EC8-2 :
 - Permet de mieux prendre en compte le comportement réel de l'ouvrage sous sollicitations sismiques
 - Impose des dispositions constructives globalement moins contraignantes et plus ciblées
- PS92 :
 - Surévaluation importante (*facteur 2 environ*) des efforts de dimensionnement malgré une réponse spectrale légèrement plus faible (pour le cas envisagé et les périodes de vibration considérées) \Rightarrow **conservatif**
 - Conduit à des déplacements plus faibles mais potentiellement sous-évalués
 \Rightarrow **risque pour : jdc, AA des piles non-bloquées, ancrages préc. tablier...**



Exemple 2 : Viaduc en béton précontraint, conception ductile ($q > 1,5$)

Interprétation en terme de comportement (ou performance) sismique



- Sous l'effet du séisme de calcul E_d , l'application des règles PS92 s'avère très sécuritaire (en terme efforts de dimensionnement)
 - Ne permet pas de mettre à profit la ductilité disponible de la structure (dissipation d'énergie)
 - Peu économique et non conforme au comportement théorique prévu à la conception (comportement ductile)





Merci pour votre attention

