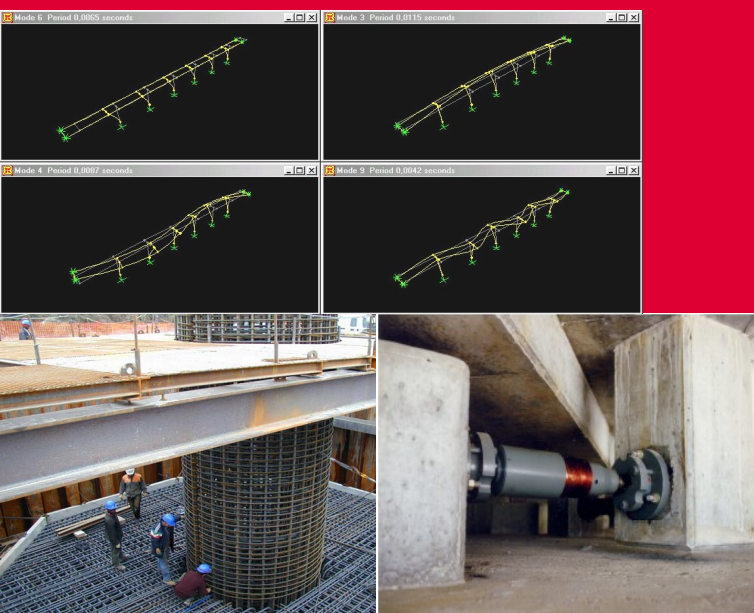


Journée technique

PRISE EN COMPTE DU RISQUE SISMIQUE

La conception parasismique des ponts

Denis DAVI - CETE Méditerranée



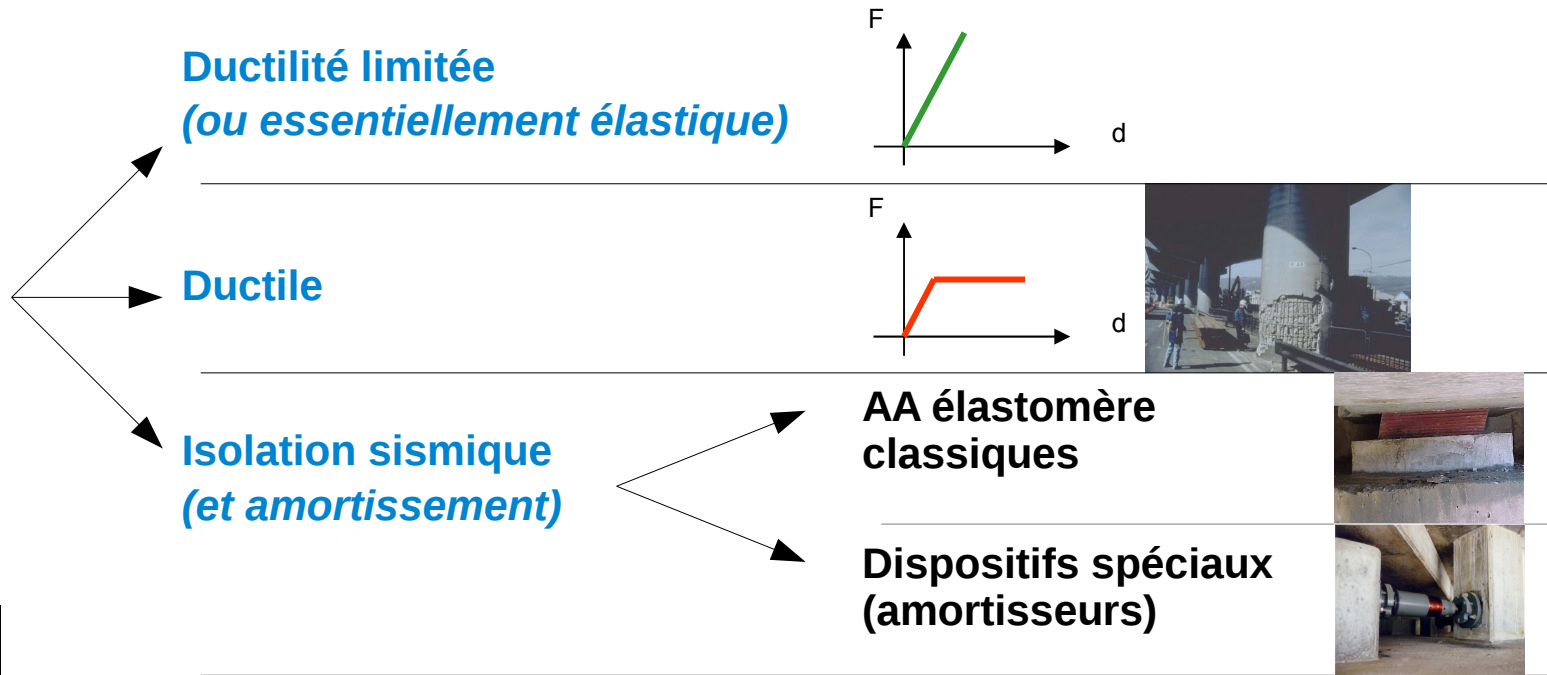
La conception parasismique des ponts

Contenu de l'exposé

- Différents principes de conception parasismique des ponts
- Domaines d'emploi, méthodes de calcul et de dimensionnement associées
- Dispositions constructives parasismiques
- Un exemple de réalisation exemplaire : le pont de Rion-Antirion (Grèce)

Conception parasismique des ponts (1/2)

3 principes de conception parasismique des ponts :
(basé sur la structure de l'Eurocode 8-2)



Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception en ductilité limitée
(ou essentiellement élastique)

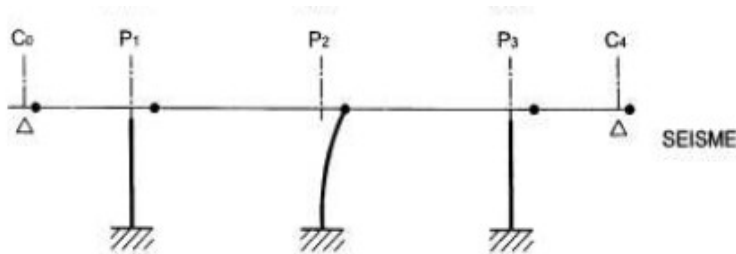


Conception parasismique des ponts (1/2)

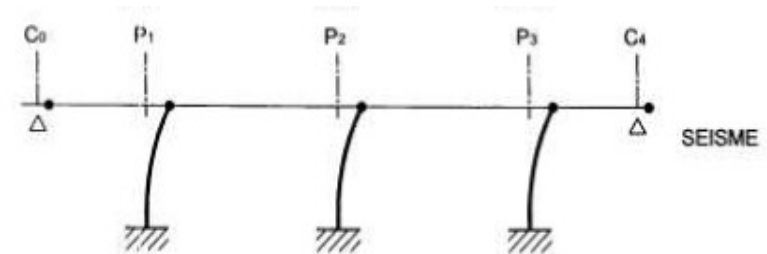
Conception en ductilité limitée (ou essentiellement élastique)

- Concept
 - Connexion rigide entre appuis et tablier

➔ Raideur de l'ouvrage principalement dictée par celle des appuis (piles, piédroits...)



$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_2}}$$



$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception en ductilité limitée (ou essentiellement élastique)

- Concept

- Incursions très limitées dans le domaine post-élastique des matériaux :

- Coefficient de comportement : $q \leq 1,5$

- Correspond grosso-modo aux limites ELU du BAEL :

$$\varepsilon_{c,u} = 0,0035$$

$$\varepsilon_{s,u} = 0,010$$

Légende

q — coefficient de comportement

IE — idéalement élastique

E — essentiellement élastique

LD — à ductilité limitée

D — ductile

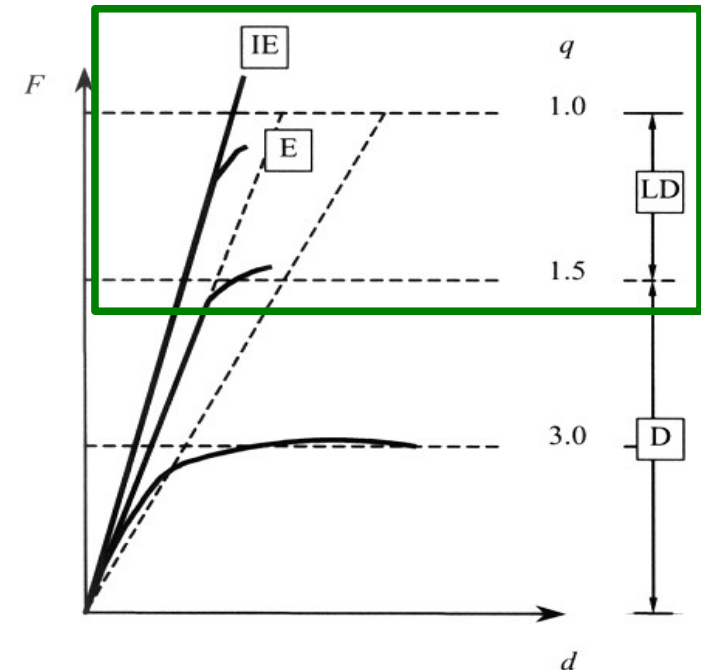


Figure 2.1 — Comportement sismique

Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception en ductilité limitée (ou essentiellement élastique)

- Avantages/inconvénients
 - **Calculs relativement aisés**
 - **Structure intacte ou très faiblement endommagée après séisme**
 - **Sollicitations très importantes en cas de sismicité élevée**
 - Efforts de dimensionnement très élevés voire rédhibitoires – notamment fondations (structures « bunker »)
 - Peu économe en coût et en quantités de matière

Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception en ductilité limitée (ou essentiellement élastique)

- Domaine d'emploi
 - Sismicité faible à modérée
 - Ouvrages courants ou particulièrement légers
 - Ouvrages à fort enjeu :
 - Nécessité de limiter les risques d'endommagement
 - Volonté de maintenir un niveau de fonctionnalité immédiatement après séisme

Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception en ductilité limitée (ou essentiellement élastique)

- Méthodes d'analyse

Approche statique forfaitaire

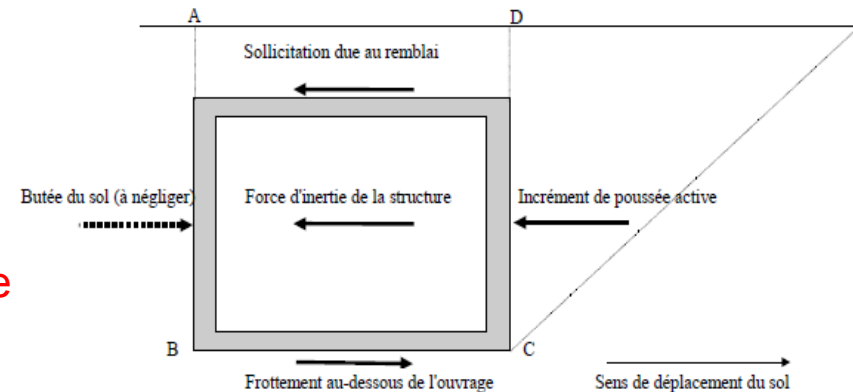
■ Domaine d'application :

- Ouvrages ou parties d'ouvrages supposés non-déformables
- Ouvrages parfaitement encastrés et solidaires du sol

Exemples : ponts-cadres, portiques de dimensions modestes, culées (composante inertielle hors poussées dynamique des terres), semelles de fondation...

- Principe : $F = M \times a_g \cdot S \cdot \tau$

Accélération de calcul au niveau du sol,
sans prise en compte de l'amplification dynamique



Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception en ductilité limitée (ou essentiellement élastique)

- Méthodes d'analyse

Méthodes monomodales (ex : méthode du tablier rigide)

- **Domaine d'application :**

- Composante de séisme longitudinale (*dans la grande majorité des cas*)
- Composante de séisme transversale
si tablier pouvant être considéré comme un bloc infiniment rigide et indéformable (*tabliers larges et courts*)

- **Principe :** $F = M \times S_d(T)$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M_{tab} + M_{piles_sup}}{\sum K_i}}$$

Réponse spectrale de calcul, prenant en compte l'amplification dynamique, fonction :

- de la période propre fondamentale de l'ouvrage T
- du coefficient de comportement q



Conception parasismique des ponts (1/2)

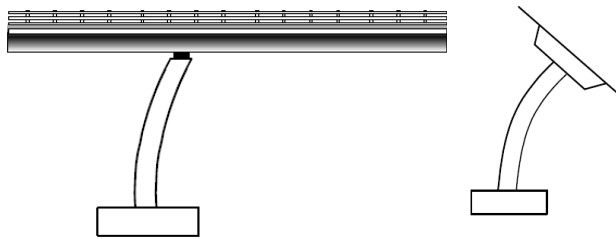
Conception en ductilité limitée (ou essentiellement élastique)

- Méthodes d'analyse

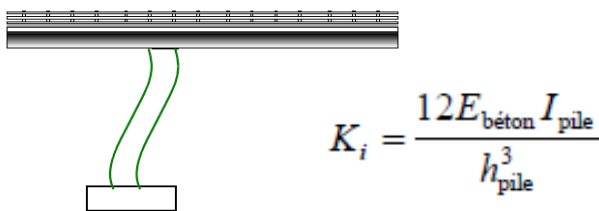
Méthodes monomodales (ex : méthode du tablier rigide)

- Principe :** $F = M \times S_d(T)$

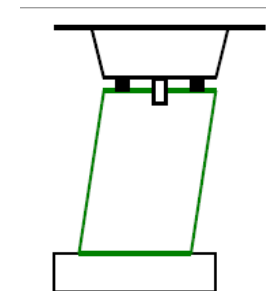
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M_{tab} + M_{piles_sup}}{\sum K_i}}$$



$$K_i = \frac{3E_{\text{béton}} I_{\text{pile}}}{h_{\text{pile}}^3}$$



$$K_i = \frac{12E_{\text{béton}} I_{\text{pile}}}{h_{\text{pile}}^3}$$



$$K_{ij} = \frac{G_{\text{béton}} S_{r,j}}{h_{\text{pile},j}}$$

Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception en ductilité limitée (ou essentiellement élastique)

- Méthodes d'analyse

Méthodes monomodales (ex : méthode du tablier rigide)

- Principe :** $F = M \times S_d(T)$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M_{tab} + M_{piles_sup}}{\sum K_i}}$$

$$K_i = \frac{3E_{béton} I_{pile}}{h_{pile}^3}$$

Analyse basée sur :

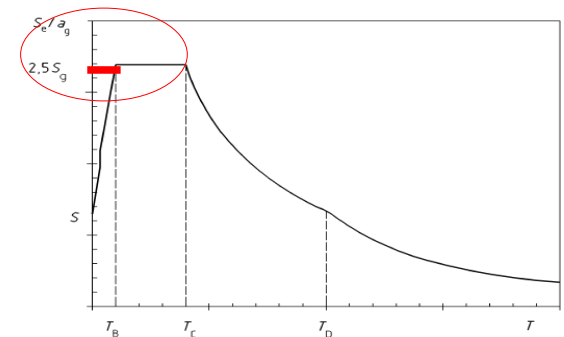
I_{brute} ou I_{fiss}

Uniquement pour la ré-évaluation des déplacements a posteriori

À privilégier :

- simplicité des calculs
- majoration sécuritaire des efforts

(à associer à un prolongement du plateau spectral jusqu'à l'origine)



Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception en ductilité limitée (ou essentiellement élastique)

- Méthodes d'analyse

Méthodes multimodales

■ Principe :

Nécessite une approche numérique (*logiciels permettant une analyse dynamique modale*)



➤ Combinaison quadratique des réponses modales

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

Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception en ductilité limitée (ou essentiellement élastique)

- Principes de dimensionnement

Combinaisons sismiques

- Combinaisons spaciales des sollicitations sismiques :

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

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

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

Uniquement dans quelques cas particuliers :

- Proximité de faille
- Tablier précontraint
- Dispositifs d'appui
- Béquilles ou piles inclinées...

- Combinaison de calcul :

$$E_d = G_k + P_k + A_{Ed} + \Psi_{21} Q_{1k} + Q_2 + 0,5 \cdot S_{Th} + S_{diff}$$

Uniquement pour les OA à fort trafic :

$\Psi_{21} = 0,2$ pour les ouvrages routiers urbains à trafic intense,

$\Psi_{21} = 0,3$ pour les lignes ferroviaires supportant un fort trafic.

Essentiellement AA et JdC

Valeur quasi-perm actions longue durée :

- poussée terres
- poussée hydrostat. + hydrodyn. ...



Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception en ductilité limitée (ou essentiellement élastique)

- Prise en compte de la souplesse des fondations

(valable pour l'ensemble des approches)

- Requisse (selon l'EC8-2) uniquement si la souplesse des fondations contribue à plus de 20% du déplacement en tête de pile
- Modélisation des raideurs sur la base des modules dynamiques (sismiques) de sol
- Conseillé dans tous les cas en phase d'étude avancée (projet, exécution) pour les OA non-courants
- A défaut (OA courants), prolongement du plateau du spectre jusqu'à l'origine
- En règle générale, valeur haute de la fourchette des raideurs pour le calcul des efforts, basse pour le calcul des déplacements



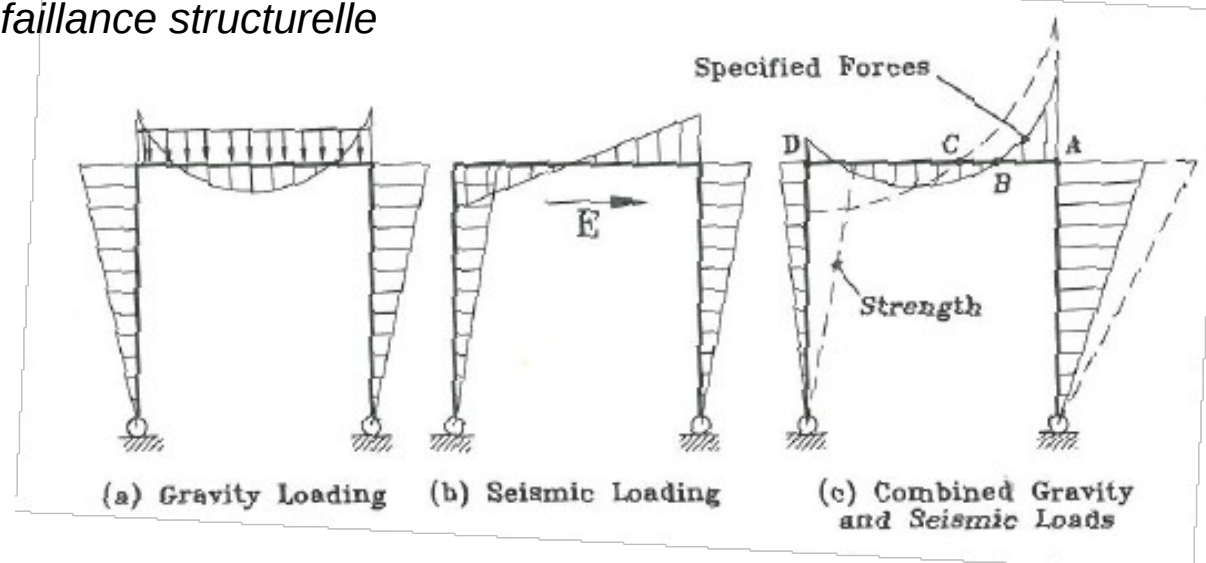
Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception en ductilité limitée (ou essentiellement élastique)

- Limites de l'approche strictement élastique

Proportionnalité entre sollicitations sismiques et niveau de séisme (non maîtrisé)

- **Par définition difficile à évaluer** (*Caractère conventionnel de la prise en compte de l'aléa sismique – Notion de période de retour de référence et de probabilité de risque acceptable...*)
- **En cas de séisme sous-estimé :**
 - *Distribution erronée des efforts internes*
 - *Risque de défaillance structurelle*



Conception parasismique des ponts (1/2)

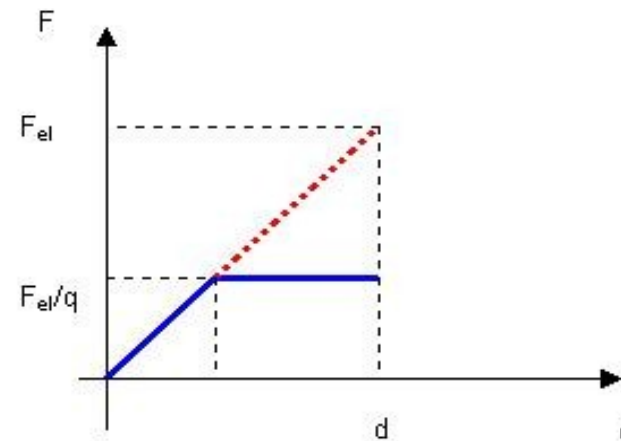
Conception en ductilité limitée (ou essentiellement élastique)

- Limites de l'approche strictement élastique

Proportionnalité entre sollicitations sismiques et niveau de résistance :

➔ A niveau de déplacement imposé par le séisme, plus on augmente la résistance structurelle et plus on augmente les efforts sismiques sollicitants

➔ Peu efficace et peu rentable



➔ Point essentiel d'évolution entre les règlements parasismiques de 1^{ère} génération (PS69) et ceux de 2^{ème} génération (PS92) :

Introduction de la notion fondamentale de « ductilité »
suite aux séismes destructeurs des années 80 (Japon, Californie...)

Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception ductile



Conception parasismique des ponts (1/2)

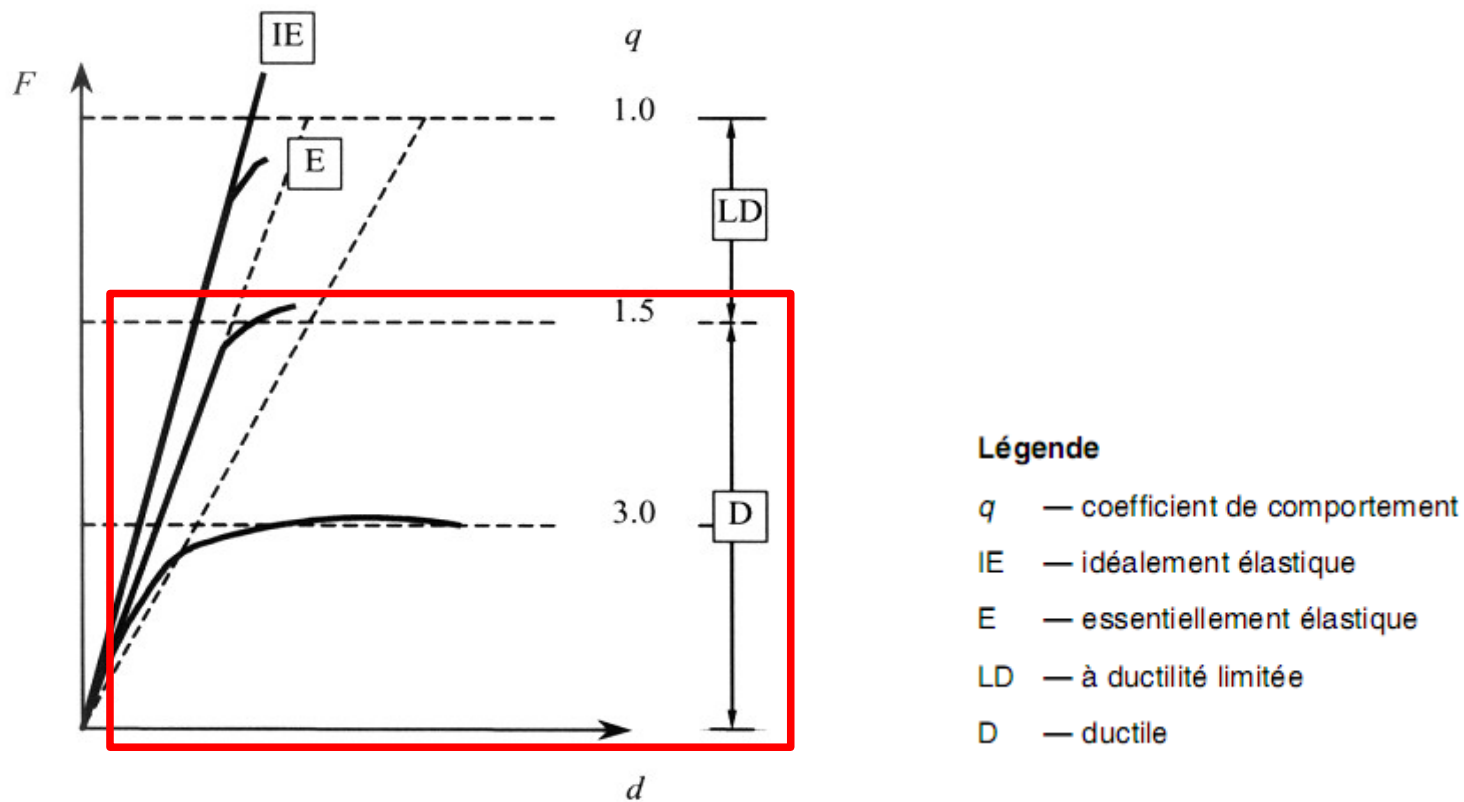
Conception ductile

- Concept
 - Connexion rigide entre appuis et tablier
- ➔ Raideur de l'ouvrage principalement dictée par celle des appuis (piles, piédroits...)
- Incursions **prononcées** dans le domaine post-élastique des matériaux :
 - Coefficient de comportement : **$1,5 < q \leq 3,5$**
 - Excède très sensiblement les limites ELU du BAEL :
 - $\varepsilon_{c,u}$: jusqu'à 0,012 à 0,030 (dispositions constructives spécifiques - confinement)
 - $\varepsilon_{s,u}$: jusqu'à 0,075 (Aciers de **classe de ductilité C**)

Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception ductile

- Concept



Légende

- q — coefficient de comportement
- IE — idéalement élastique
- E — essentiellement élastique
- LD — à ductilité limitée
- D — ductile

Figure 2.1 — Comportement sismique

Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception ductile

- Avantages/inconvénients
 - **Sollicitations sismiques efficacement abaissées et maîtrisées**
(zones fusibles, efforts plafonnés)
 - **Coûts raisonnables même en cas de sismicité élevée**
 - **Calculs plus complexes**
 - **Dispositions constructives contraignantes**
 - **Structure partiellement endommagée en cas de séisme**
 - **Réparations à prévoir**



Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception ductile

- Domaine d'emploi
 - Sismicité moyenne ou forte
 - Ouvrages non-courants
 - Ouvrages pouvant accepter un certain niveau de dégradation
(conception la plus couramment utilisée dans les zones sismiques du globe)

Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception ductile

- Méthodes d'analyse

Ouvrages de géométrie relativement régulière

Mêmes approches générales que dans le cas de la ductilité limitée et mêmes domaines d'application

MAIS :

Analyse basée systématiquement sur : I_{fiss}

à la fois pour l'évaluation des efforts et des déplacements

Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception ductile

- Méthodes d'analyse

Ouvrages de géométrie relativement régulière

- Évaluation de l'inertie fissurée « I_{fiss} » ou « J_{eff} »

EC8-2 Annexe C :

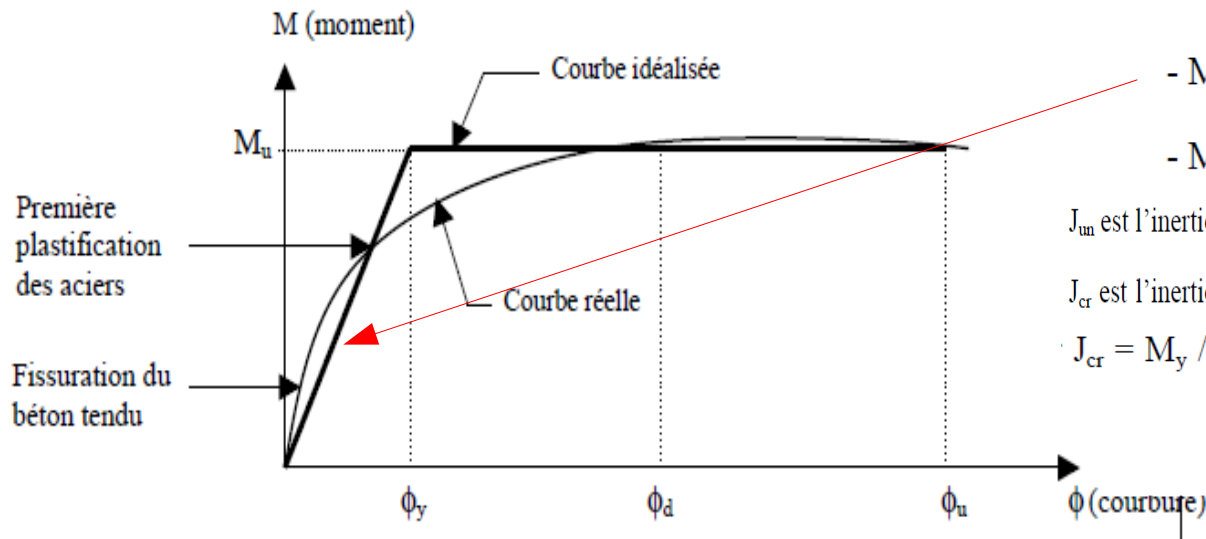
- Méthode 1 : $J_{eff} = 0,08 J_{un} + J_{cr}$

- Méthode 2 : $E_c J_{eff} = 1,2 M_{Rd} / \phi_y$

J_{un} est l'inertie brute non fissurée (« uncracked ») ;

J_{cr} est l'inertie fissurée (« cracked ») à la limite élastique des armatures tendues

$$J_{cr} = M_y / (E_c \cdot \phi_y)$$



Avec :

$$\phi_y = 2,1 \varepsilon_{sy} / d \quad \text{pour les sections rectangulaires (cf. EC 8-2 eq. C.5)}$$

$$\phi_y = 2,4 \varepsilon_{sy} / d \quad \text{pour les sections circulaires (cf. EC 8-2 eq. C.6)}$$

avec ε_{sy} la déformation limite élastique des armatures ($\varepsilon_{sy} = 2,5\%$) et d l'épaisseur effective de la section.

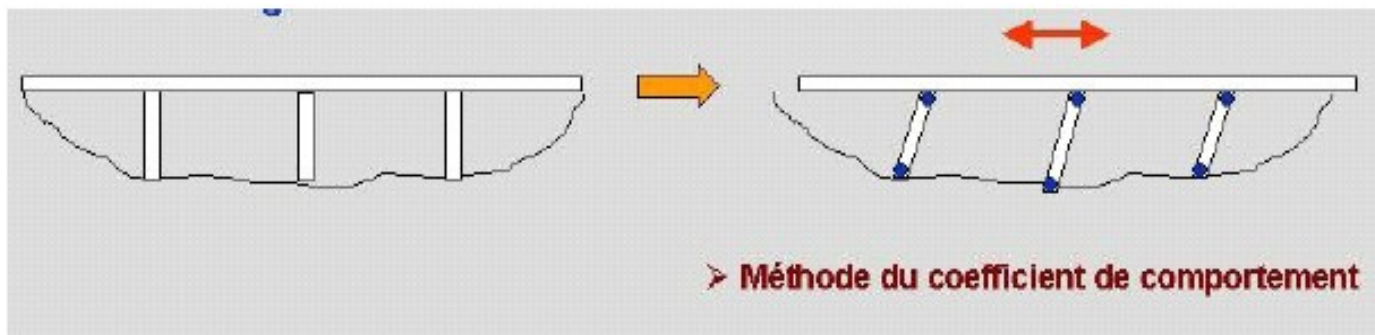
Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception ductile

- Méthodes d'analyse

Ouvrages de géométrie relativement régulière

- Critère de validité de la méthode du coefficient de comportement



Critère de régularité basé sur l'homogénéité des niveaux de ductilité solicités (ou « ductilité appelée ») dans les différentes sections :

Conception parasismique des ponts (1/2)

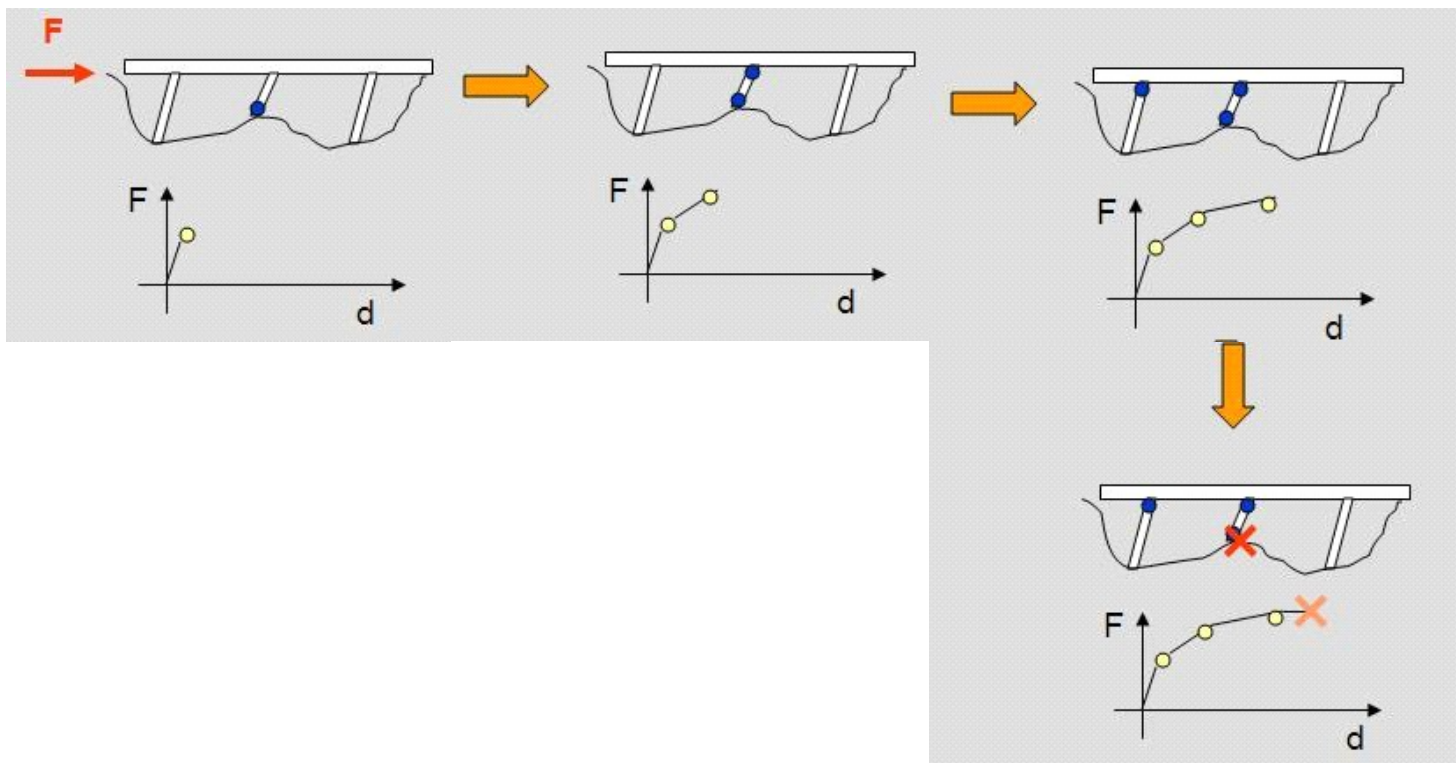
Conception ductile

- Méthodes d'analyse

Analyse des structures irrégulières

- Méthode push-over

(EC 8-2 Annexe H)



Conception parasismique des ponts (1/2)

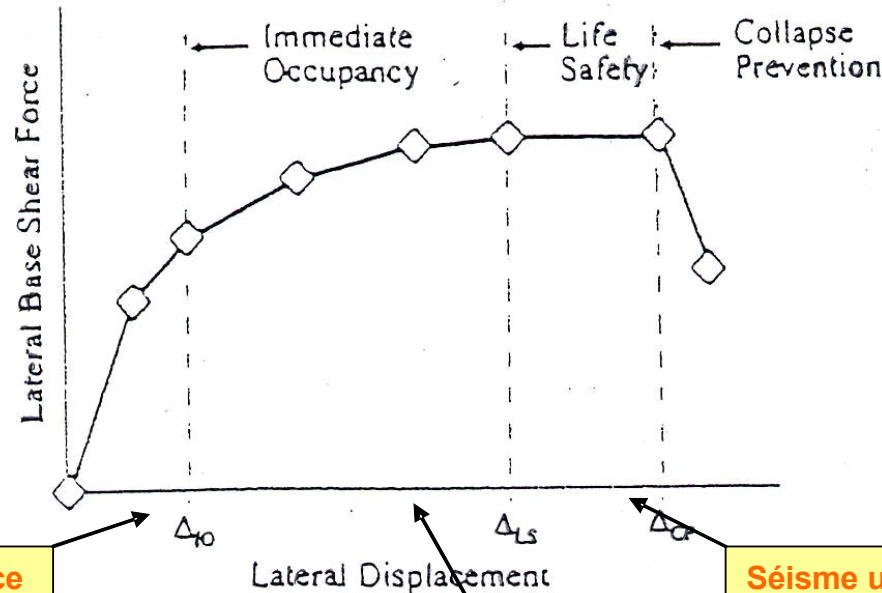
Conception ductile

- Méthodes d'analyse

Analyse des structures irrégulières

- Méthode push-over

(EC 8-2 Annexe H)



Séisme de service

Lateral Displacement

Séisme ultime

Séisme réglementaire de calcul

Remarque :

La méthode Push-Over fonctionne bien lorsque le 1er mode de vibration est prédominant.

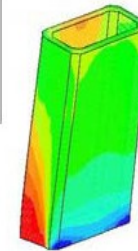
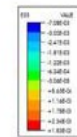
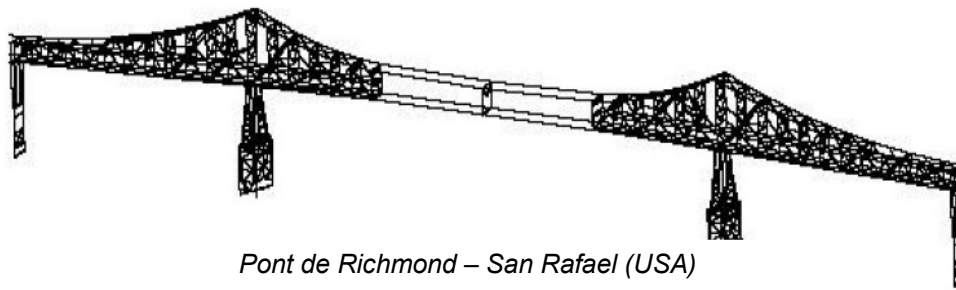
Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception ductile

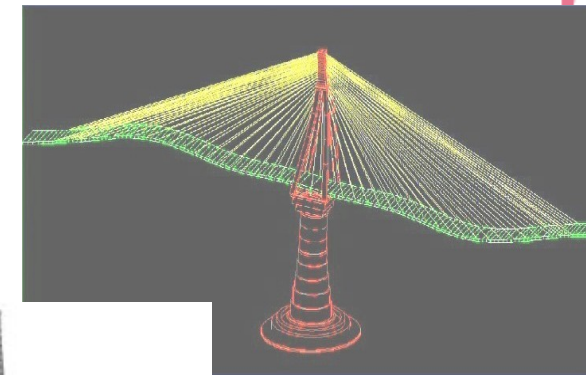
- Méthodes d'analyse

Analyse des structures très irrégulières avec modes supérieurs influents

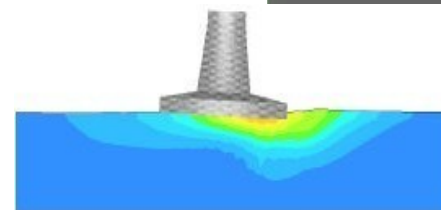
Dans ce cas, une analyse dynamique temporelle non-linéaire complète est nécessaire ...



Exemples de modèles dynamiques non-linéaires sophistiqués



Pont de Rion-Antirion (Grèce)



Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception ductile

- Méthodes d'analyse

Analyse des structures très irrégulières avec modes supérieurs influents

Prescription EC8-2 pour l'analyse dynamique temporelle non-linéaire :

- Au minimum 3 accélérogrammes, de préférence issus de signaux naturels
- Si $n < 7$ → Enveloppe des réponses
- Si $n \geq 7$ → Moyenne des réponses

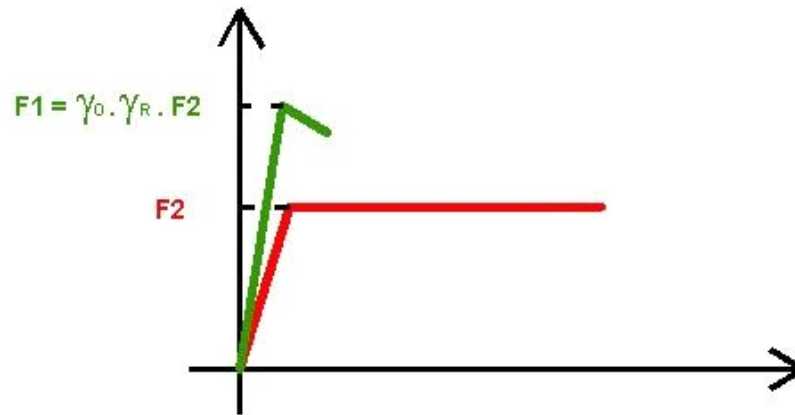
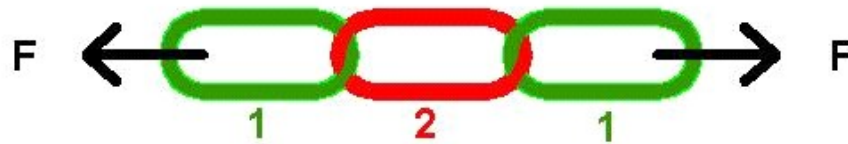
Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception ductile

- Principes de dimensionnement

Dimensionnement en capacité

(EC8-2 § 5.3)



Objectifs :

- Efforts écrêtés quelque soit le niveau de séisme considéré

- Endommagement contrôlé

- localisation
- type (flexion privilégiée)

γ_0 : coeff. de surcapacité (=1,35 pour BA)

γ_{Bd} : coeff. de sécurité supplémentaire contre les risques de rupture fragile (=1,25)

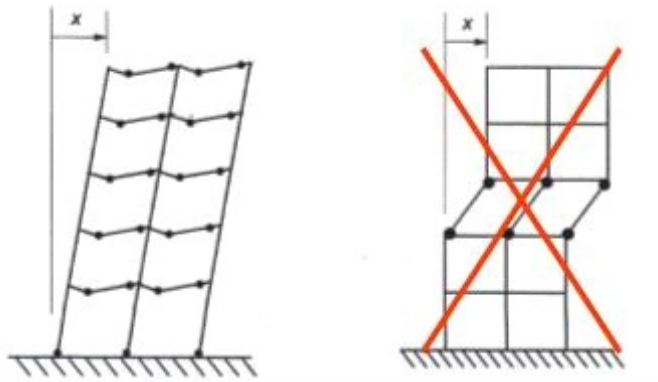
Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception ductile

- Principes de dimensionnement

Localisation des rotules plastiques

- Choisie par le concepteur
- Zones de concentration des déformations = zones fusibles



Cas des ponts
(EC8-2 § 2.3.2.1)



Cas des bâtiments



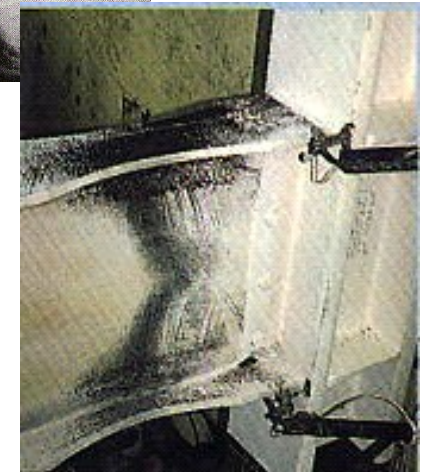
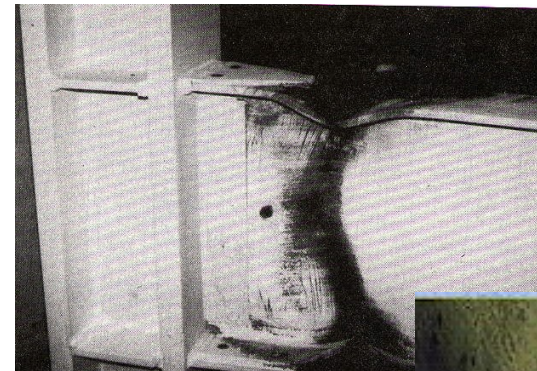
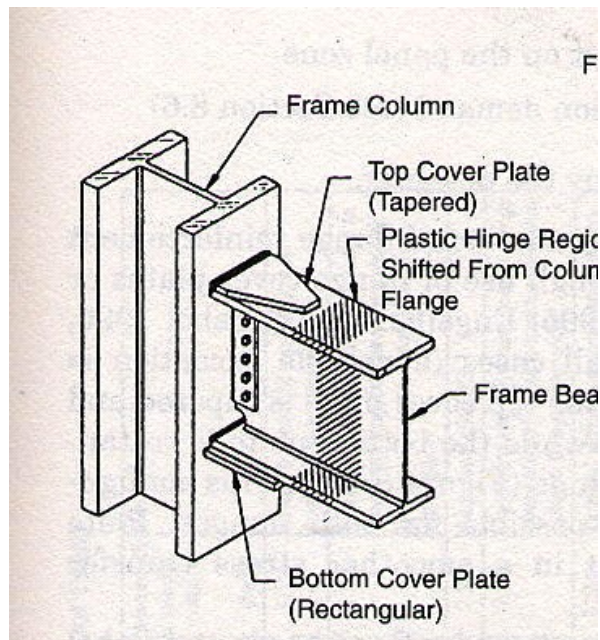
Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception ductile

- Principes de dimensionnement

Localisation des rotules plastiques

- Cas des constructions métalliques



Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception ductile

- Principes de dimensionnement

Justification des sections

- **Moments fléchissants**

- Zones de rotules plastiques :

Directement à partir du spectre pré-divisé par q : $M_{Rd} \geq M_{Ed}$

- Zones courantes (yc fondations) :

Dimensionnement en capacité : $M_{Rd} \geq M_C = f(\gamma_0 \cdot M_{Rd_rot})$

- **Efforts tranchants**

Dimensionnement en capacité + coeff. de sécurité « ruptures fragiles γ_{Bd} :

$$V_{Rd} \geq \gamma_{Bd} \cdot V_C \quad \text{avec } V_C = f(\gamma_0 \cdot M_{Rd_rot})$$



Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception ductile

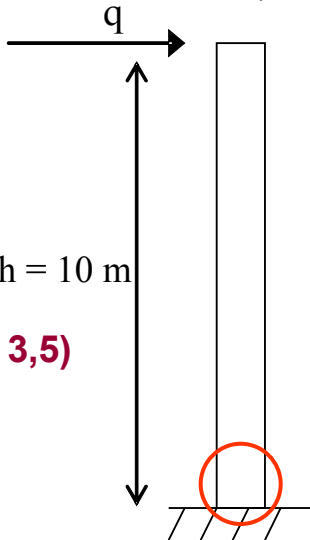
- Principes de dimensionnement

Justification des sections

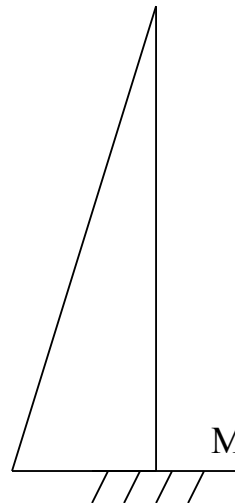
- En dehors des zones de rotules plastiques

Exemple d'application

$$F_E = \frac{1,302 \text{ MN}}{q} = 0,372 \text{ MN}$$



(q = 3,5)



$$M_E = 0,372 \times 10 = 3,72 \text{ MNm}$$

Moment de flexion dans la rotule plastique :

$$M_{Rd} \geq M_E$$

par exemple : $M_{Rd} = 4 \text{ MNm} = M_C$



Conception parasismique des ponts (1/2)

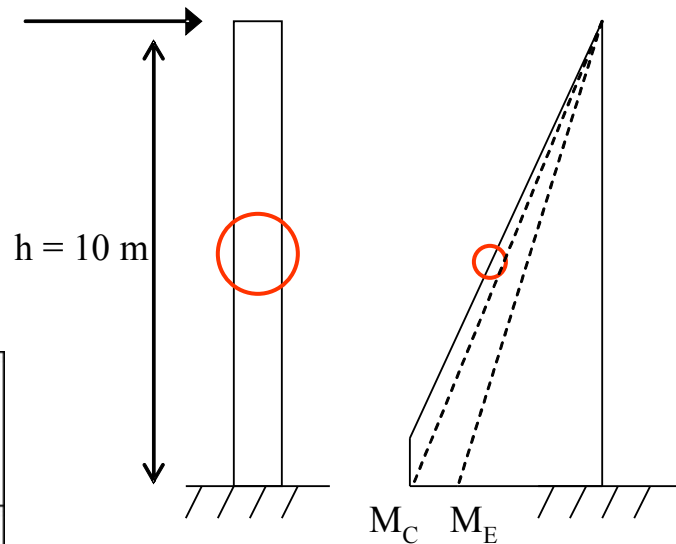
Conception ductile

- Principes de dimensionnement

Justification des sections

- En dehors des zones de rotules plastiques

Exemple d'application



Moment de flexion à mi-hauteur :

$$M_{Rd1/2} \geq \gamma_0 \cdot \frac{M_C}{2} = 1,35 \times \frac{4}{2} = 2,7 \text{ MNm}$$

Effort tranchant dans la pile :

$$V_{Rd,s} \geq \gamma_0 \cdot \gamma_{Bd} \frac{M_C}{h} = 1,35 \times 1,25 \times \frac{4}{10} = 0,675 \text{ MN}$$

Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception ductile

- Principes de dimensionnement

Justification des sections

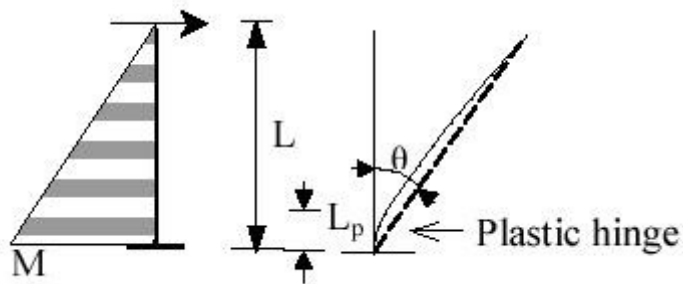
- Dans les zones de rotules plastiques

- si méthode du coefficient de comportement

⇒ dispositions constructives forfaitaires (EC8-2 § 6.2)

- si push-over ou analyse dynamique non-linéaire

⇒ vérification des niveaux de déformation (EC8-2 Annexe E)



Conception parasismique des ponts (1/2)

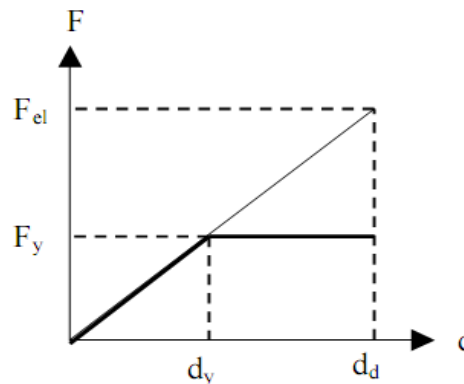
Conception ductile

- Principes de dimensionnement

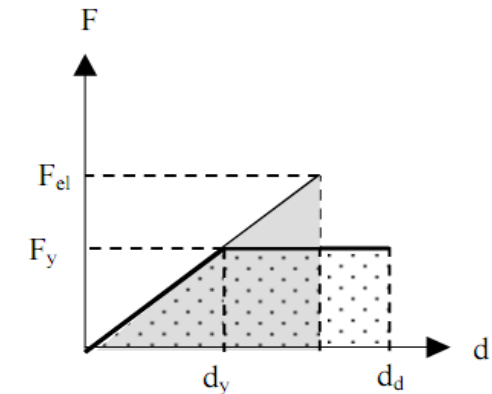
Vérification des déplacements

Déplacements remultipliés par $\mu_d = f(q)$

$T > T_0 = 1,25.T_C$	Iso-déplacement	$\mu_d = q$
$0,033s < T < T_0 = 1,25.T_C$	Iso-énergie	$\mu_d = \frac{T_0}{T}(q-1) + 1 \leq 5q - 4$
$T < 0,033s$	Iso-accélération	$q=1$



Iso-déplacement



Iso-énergie

Conception parasismique des ponts (1/2)

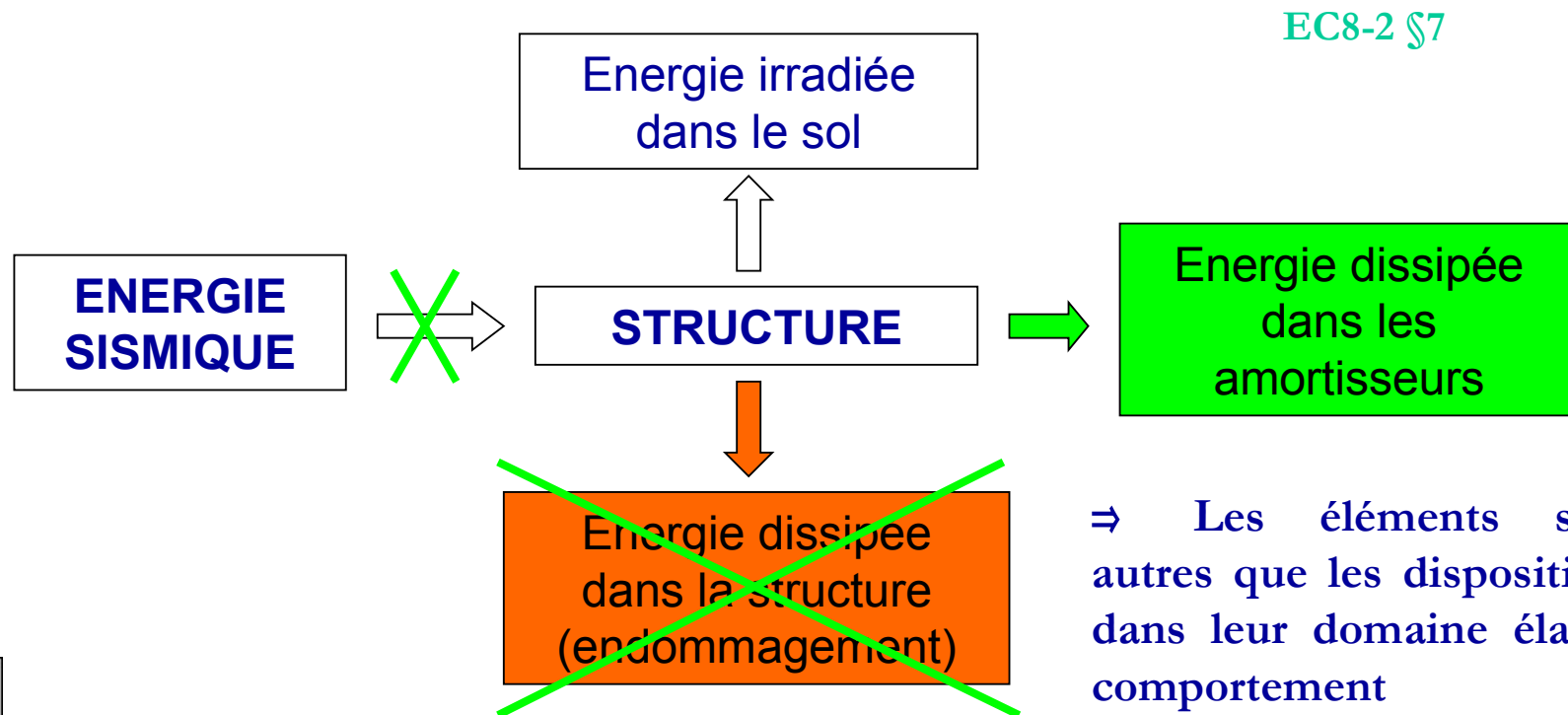
Isolation sismique et amortissement



Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement

- Concept



Conception parasismique des ponts (1/2)

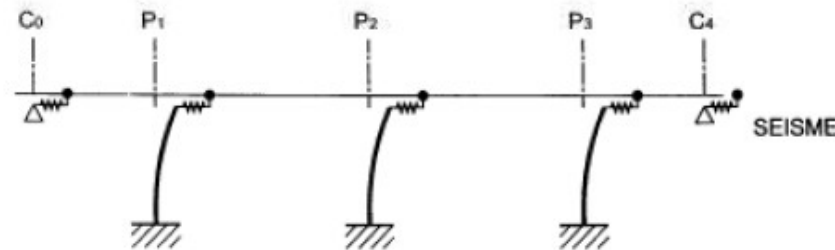
Isolation sismique et amortissement *Appareils d'appui élastomère classiques*



- Concept

- Connexion souple entre appuis et tablier

➔ Raideur de l'ouvrage principalement dictée par celle des appareils d'appui



$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Conception parasismique des ponts (1/2)

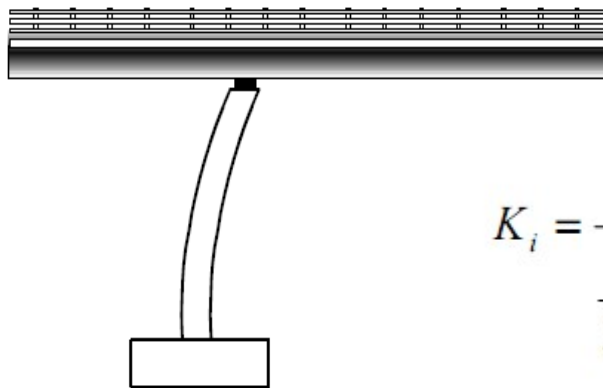
Isolation sismique et amortissement *Appareils d'appui élastomère classiques*



- Concept

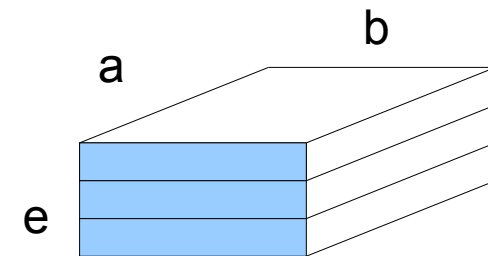
- Connexion souple entre appuis et tablier

➔ Raideur de l'ouvrage principalement dictée par celle des appareils d'appui



$$K_i = \frac{1}{\frac{h_{pile}^3}{3E_{béton} I_{pile}} + \frac{e}{nGab}}$$

$$G_{néop_séisme} = 1 \text{ MPa}$$



Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement Appareils d'appui élastomère classiques

- Concept
 - Aucune incursion *en principe* dans le domaine post-élastique des matériaux
Coefficient de comportement : $q = 1$

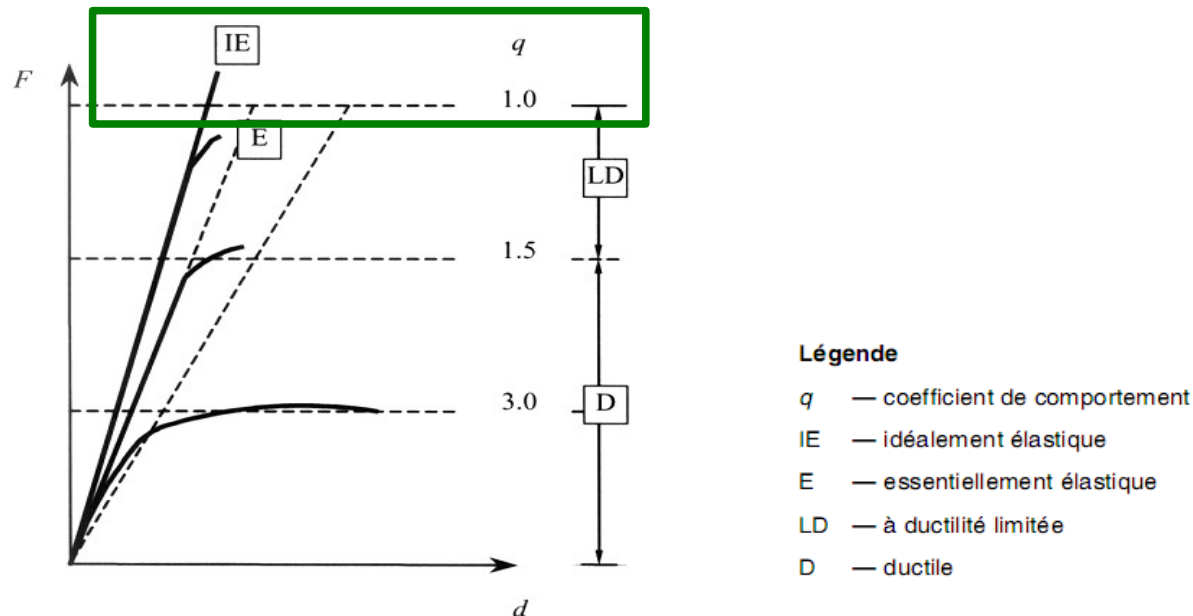


Figure 2.1 — Comportement sismique

Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement *Appareils d'appui élastomère classiques*

- Avantages/inconvénients
 - **Calculs relativement aisés**
 - **Efforts sismiques efficacement abaissés** (souplesse = filtre fréquentiel)
 - **Structure intacte après séisme**
 - **Aucune dissipation d'énergie**
 - **Limites du domaine d'emploi des AA élastomère**
 - Capacité de descentes de charges limitées : pb si tablier lourd type caisson BP
 - Limites de déformation AA peuvent être incompatibles en zones de sismicité moyenne à forte
 - Compatibilité séisme/statique peut nécessiter quelques itérations

Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement *Appareils d'appui élastomère classiques*

- Domaine d'emploi
 - Sismicité faible à moyenne
 - Ouvrages courants ou non-courants (notamment tabliers mixtes)



Conception parasismique des ponts (1/2)

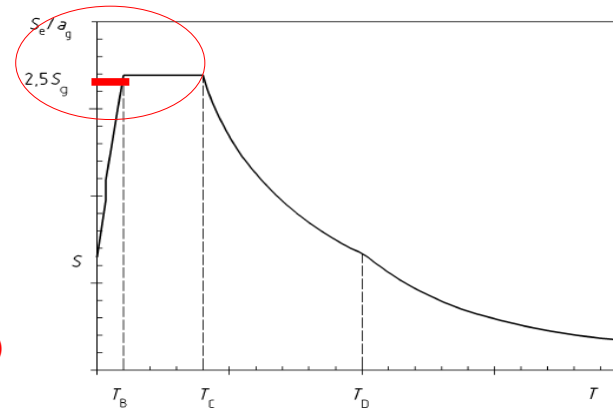
Isolation sismique et amortissement Appareils d'appui élastomère classiques

- Méthodes d'analyse

- **Principe :** $F = M \times S_e(T)$

Analyse basée sur : I_{brute}

Majoration sécuritaire des efforts
(à associer à un prolongement du plateau spectral jusqu'à l'origine)



A cumuler avec les modes propres de piles...

Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement Appareils d'appui élastomère classiques

- Principes de dimensionnement

Dimensionnement des appareils d'appui

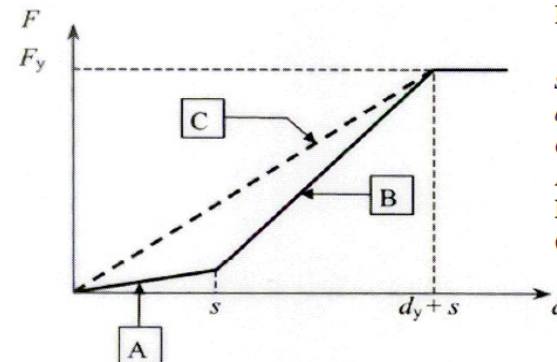
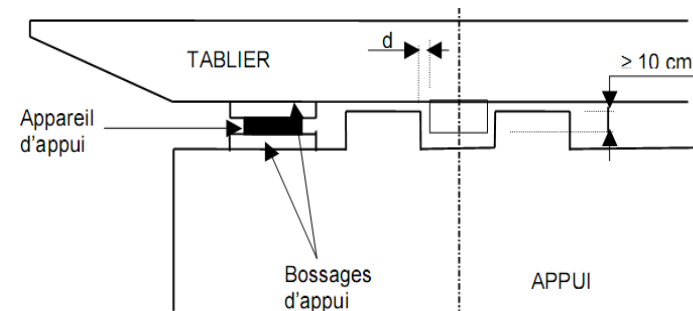
■ Distorsion :

- Multipliée par $\gamma_{IS} = 1,50$
- ou - Principe de butées de sécurité

Cas simples :

*Dimensionnement pour 75%
des efforts sismiques*

Ouvrages complexes ou à fort enjeu :



Légende

- s : Jeu de l'attelage
- d_y : Flèche élastique maximale de l'élément d'appui
- A — Rigidité de l'appareil d'appui
- B — Rigidité de l'élément d'appui
- C — Approximation linéaire de la courbe

Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement Appareils d'appui élastomère classiques

- Principes de dimensionnement

Dimensionnement des appareils d'appui

■ Distorsion limite :

- Totale : $\epsilon_{t,d} = K_L (\epsilon_{c,E} + \epsilon_{q,max} + \epsilon_{\alpha,d}) \leq 7 / \gamma_m$

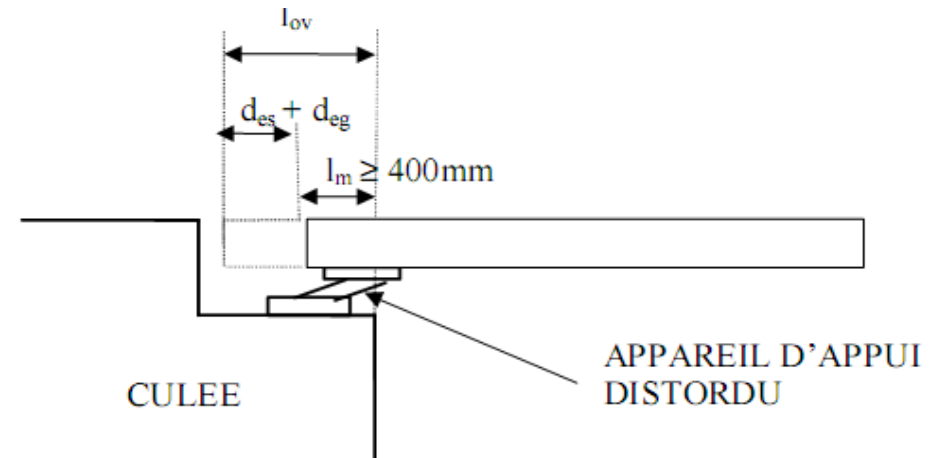
$\gamma_m = 1$

- Cisaillement : $\epsilon_{q,max\ ultimate} \leq 2,5$ selon NF EN15129
 $\leq 2,0$ selon NF EN1998-2

■ Repos d'appui

$$l_{ov} = l_m + d_{eg} + d_{es}$$

Longueur d'appui mini + Dépl. différentiel + Dépl. inertiel



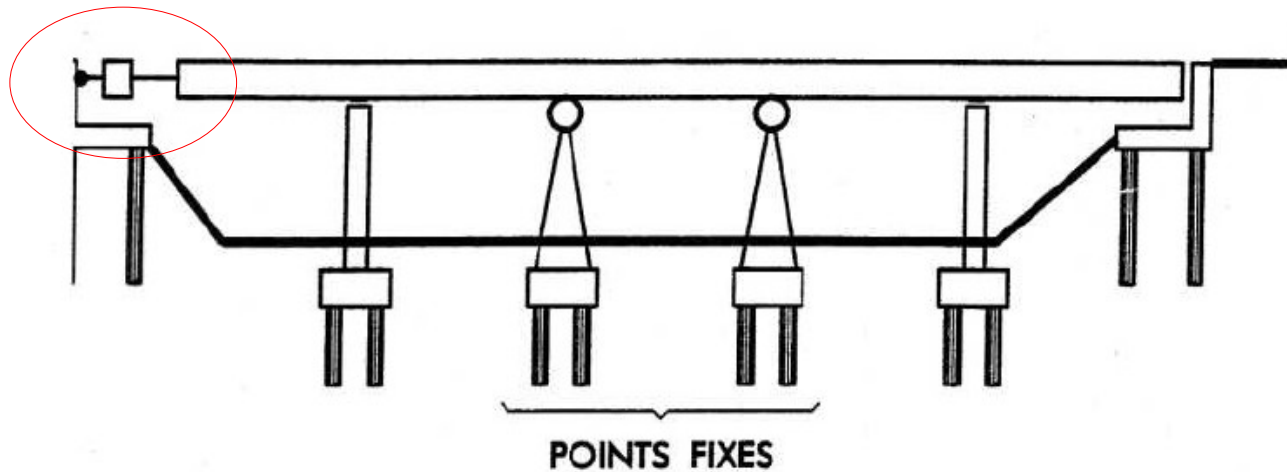
Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement *Dispositifs spéciaux (amortisseurs)*



- Concept

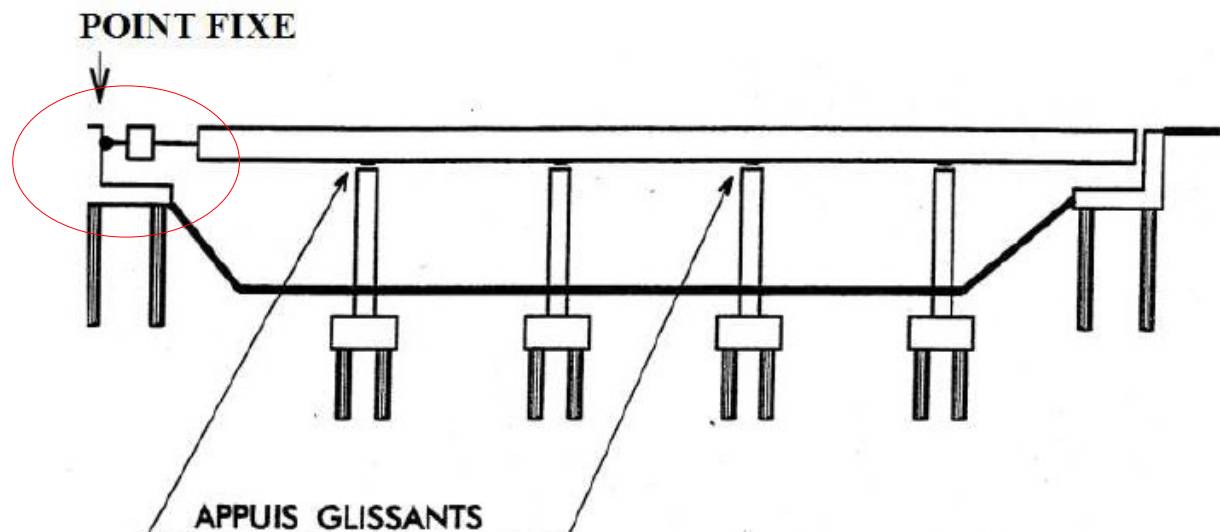
- Vient généralement en complément d'une configuration de type ductilité limitée ou appareils d'appui élastomère classiques :



Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement *Dispositifs spéciaux (amortisseurs)*

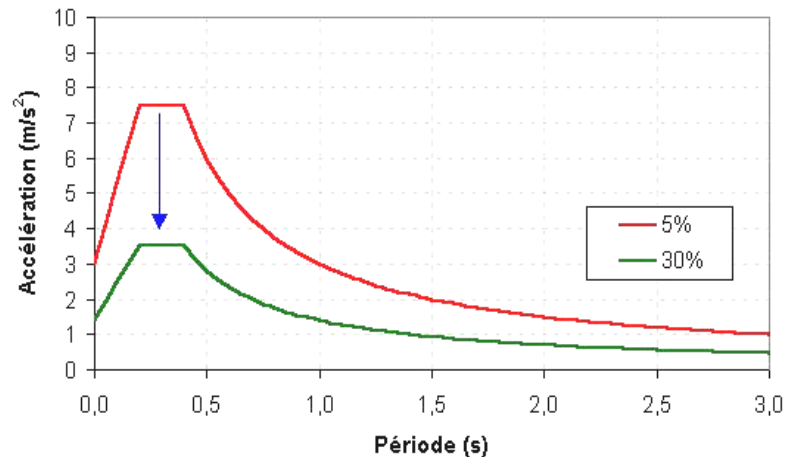
- Concept
 - Peut également être couplé à une isolation parfaite (AA glissants) mais nécessite dans ce cas un système spécifique pour assurer un point fixe en service :
 - Système fusible disposé en parallèle
 - Amortisseur précontraint (à seuil de déclenchement)...



Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement Dispositifs spéciaux (amortisseurs)

- Concept
 - Comportement de l'ouvrage principalement dicté par celui des dispositifs
 - Permet une réduction efficace des sollicitations sismiques
(efforts et déplacements)



- Aucune incursion *en principe* dans le domaine post-élastique des matériaux des éléments structuraux (piles)

Coefficient de comportement : $q = 1$

Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement *Dispositifs spéciaux (amortisseurs)*

- Avantages/inconvénients
 - Sollicitations sismiques efficacement abaissées et maîtrisées (efforts + déplacements)
 - Structure intacte après séisme
 - Calculs complexes
 - Coûts élevés
 - Contraintes d'inspection / maintenance des dispositifs

Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement *Dispositifs spéciaux (amortisseurs)*

- Domaine d'emploi
 - Sismicité forte
 - Ouvrages non-courants
 - Ouvrages à fort enjeu
 - Durcissement au séisme d'ouvrages existants

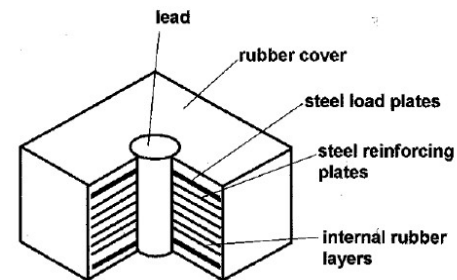
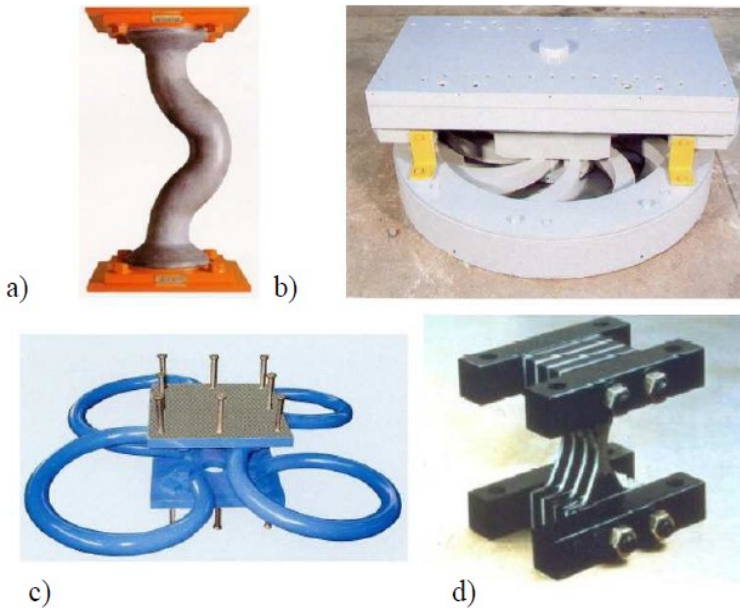


Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement Dispositifs spéciaux (amortisseurs)

- Exemples de dispositifs

Dispositifs métalliques élasto-plastiques

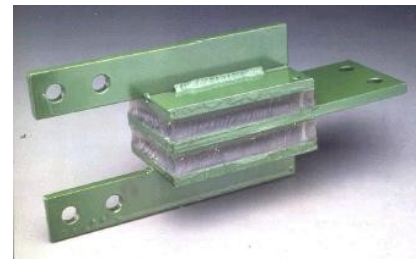


Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement *Dispositifs spéciaux (amortisseurs)*

- Exemples de dispositifs

Dispositifs visqueux

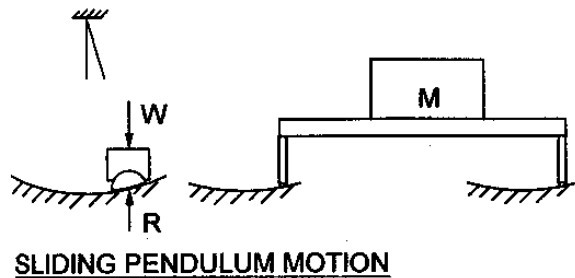
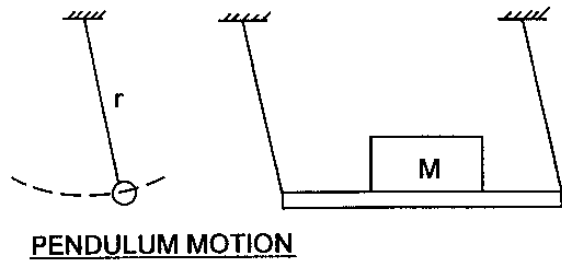


Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement Dispositifs spéciaux (amortisseurs)

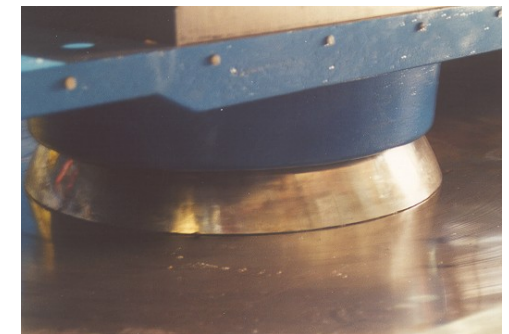
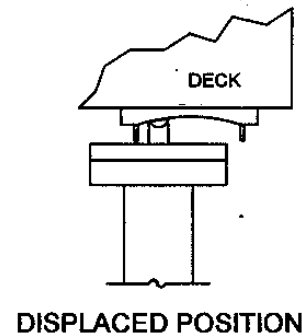
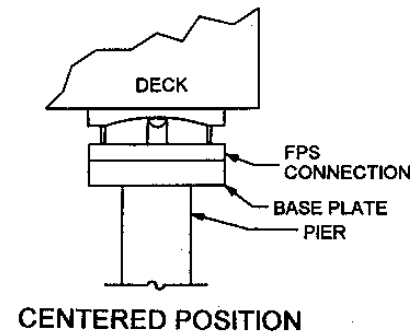
- Exemples de dispositifs

Systemes pendulaires



PERIOD $T = 2\pi \sqrt{r/g}$

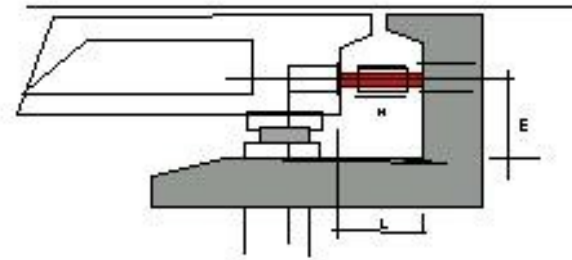
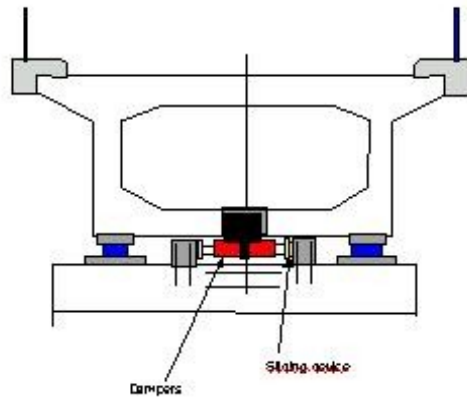
STIFFNESS $k = W/r$



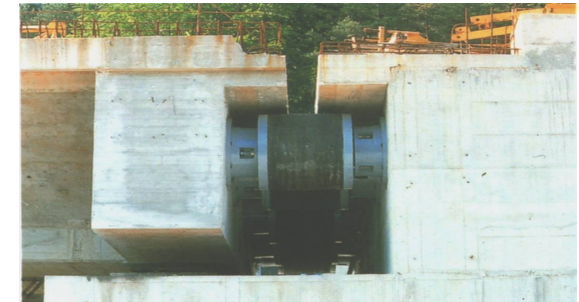
Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement *Dispositifs spéciaux (amortisseurs)*

- Exemples de mise en oeuvre sur des ponts



Pont à Petra Tou Roumiou, Chypre



Viaduc de Fella, Italie

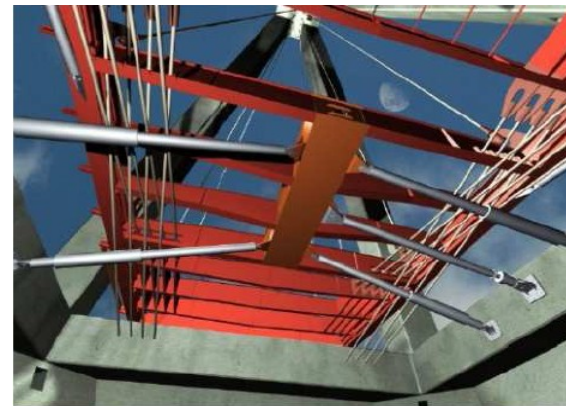
Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement *Dispositifs spéciaux (amortisseurs)*

- Exemples de mise en oeuvre sur des ponts



Pont Vasco de Gama, Portugal



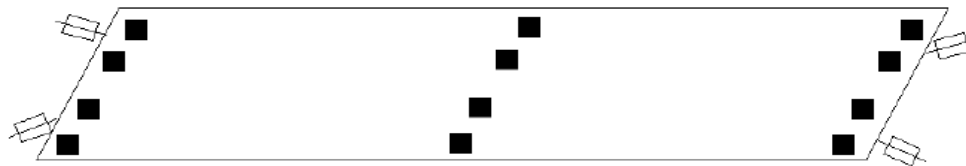
Pont de Rion-Antirion, Grèce



Conception parasismique des ponts (1/2)

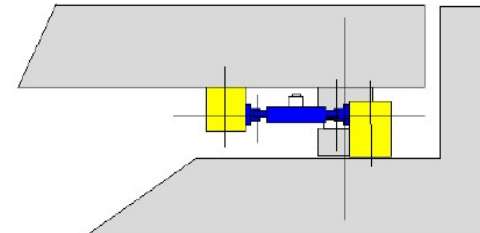
Isolation sismique et amortissement *Dispositifs spéciaux (amortisseurs)*

- Exemples de mise en oeuvre sur des ponts



- Appui élastomère 800 x 800
- ▭ Amortisseur dissipatif

Ouvrages (PS) de l'A51, France



Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement *Dispositifs spéciaux (amortisseurs)*

- Principes de dimensionnement

Dimensionnement des dispositifs

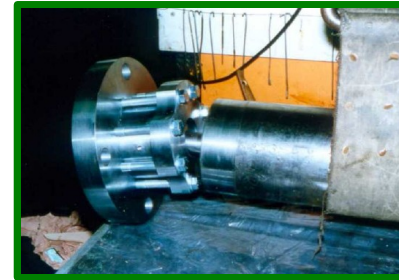
- **Déformation limite (souffle) :** $d_{Ed} \times \gamma_{IS} = 1,50$
- **Effort de dimensionnement des amortisseurs :** $F_{Ed} \times \gamma_{IS}^{\alpha/2}$
- **Attaches à dimensionner pour γ_{Rd} x effort maxi dispositif,**
 - Conformément au principe de dimensionnement en capacité
 - γ_{Rd} dépend du type de dispositif



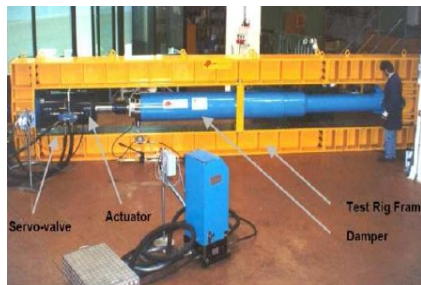
Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement *Dispositifs spéciaux (amortisseurs)*

- Précautions d'emploi
 - Bonne installation essentielle



- Inspection et maintenance
- Garanties de pérennité et d'invariance des caractéristiques
- Validation des propriétés mécaniques (tests en laboratoire)



NF EN 15 129

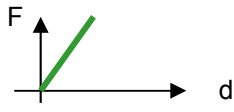
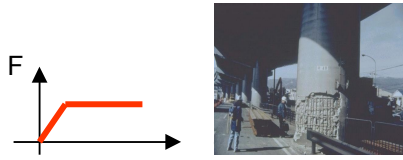

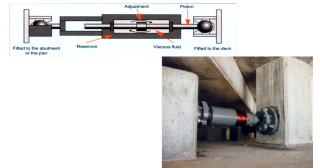
Conception parasismique des ponts (1/2)

Récapitulatif



Conception parasismique des ponts (1/2)

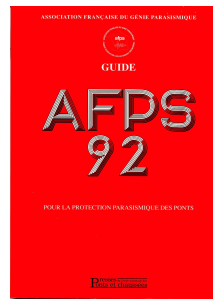
Récapitulatif

	DUCTILITE LIMITEE (ou essentiellement élastique)	DUCTILE (ductilité structurelle)	ISOLATION SISMIQUE	
			Isolateurs, AA élastomère classiques	Amortisseurs, systèmes ductiles
				
Comportement sous séisme "de calcul"	Ouvrage intact ou très faiblement endommagé	Ouvrage moyennement à fortement endommagé	Ouvrage intact	Ouvrage intact
Dispositions constructives	Classiques, cf. EC2 sauf en zones dites "critiques"	Très contraignant dans les zones de rotules plastiques potentielles (+ classe d'acier ductile)	Classiques, cf. EC2 sauf en zones dites "critiques"	Classiques, cf. EC2 sauf en zones dites "critiques"
Calculs et dimensionnement	Relativement aisés	+ ou - complexes selon degré de régularité structurelle	Relativement aisés	Complexes
Méthodes d'analyse	Statique équivalent Analyse mono ou multi-modale	Analyse mono ou multi-modale Push-Over Dynamique temporelle non-linéaire	Analyse mono ou multi-modale	Dynamique temporelle non-linéaire (le plus souvent)
Coeff. de comportement	$q \leq 1,5$	$1,5 < q \leq 3,5$	$q = 1$, en général	
Conditions de maintenance	Aucune particulière	Aucune particulière	Très variable selon technologie employée	
Domaines d'application	Sismicité faible à modérée Ouvrages courants ou à fort enjeu	Sismicité moyenne ou forte Ouvrages non-courants	Sismicité faible à moyenne Ouvrages courants et non-courants	Sismicité forte Ouvrages non-courants Ouvrages à fort enjeu

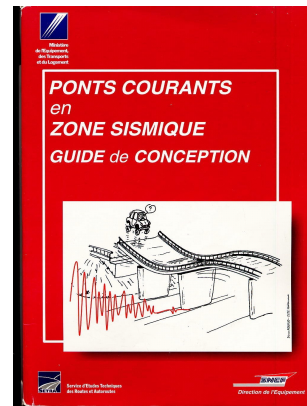
Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

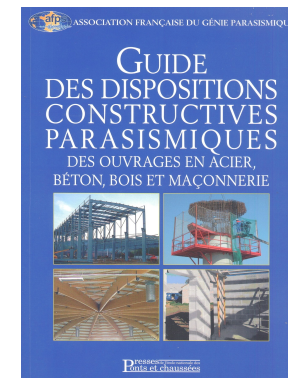
- De l'importance des dispositions constructives...
 - L'application de dispositions constructives adéquates a été identifié comme un des facteurs essentiels du bon comportement sismique des structures



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



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



Le guide AFPS des dispositions constructives parasismiques

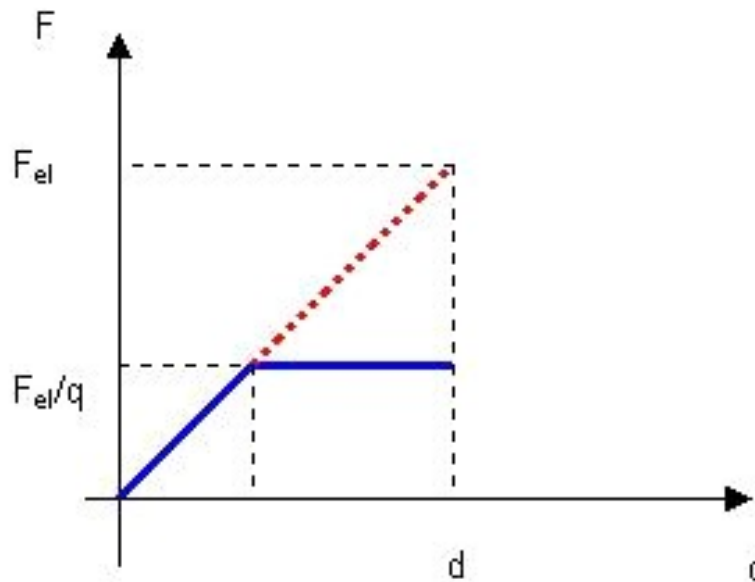
- Hypothèse de base à tous les concepts et méthodes d'analyses permettant d'appréhender le comportement sismique des structures (rotules plastiques, ductilité, plasticité, dissipation d'énergie, coefficient de comportement, push-over, amortissement structurel...)

Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- De l'importance des dispositions constructives...

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...

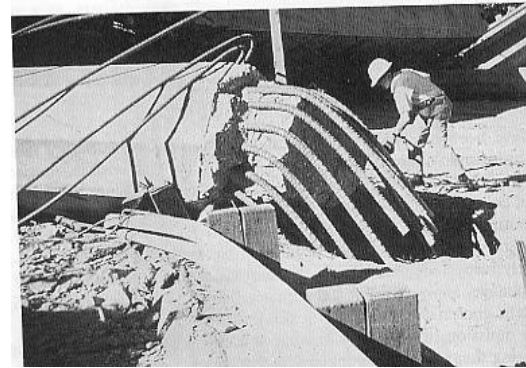
Coefficient de comportement et notion de ductilité

Des dispositions particulières destinées à :

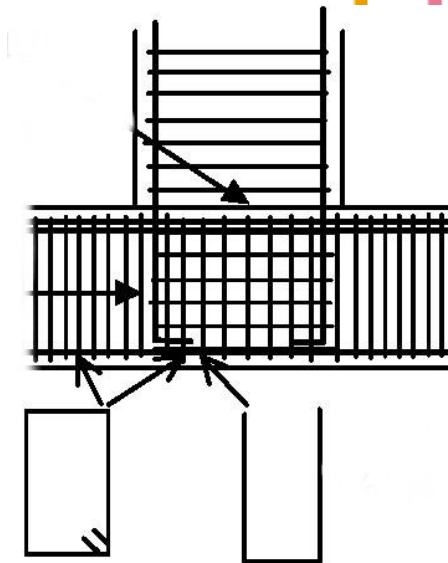
- supprimer tout risque de rupture fragile



Recouvrements interdits
dans les zones plastiques



Dispositions d'ancrage des
armatures longitudinales



EC8-2 fig. 5.3

Conception parasismique des ponts (2/2)

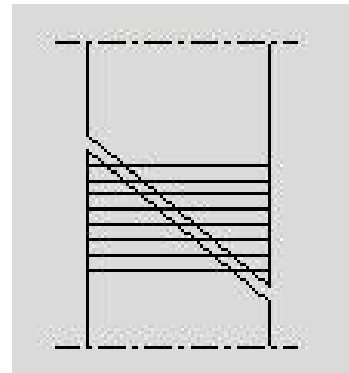
Dispositions constructives parasismiques

- De l'importance des dispositions constructives...

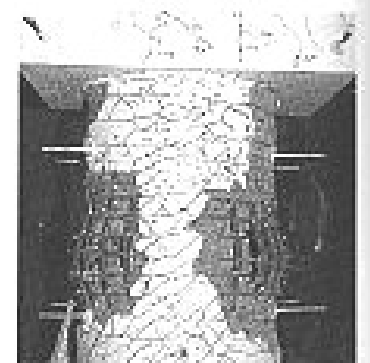
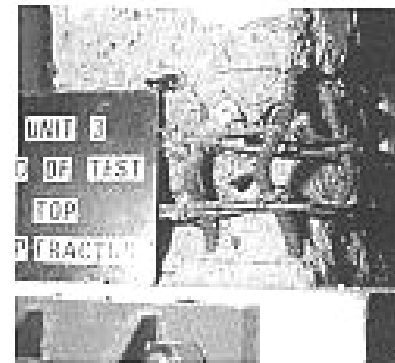
Coefficient de comportement et notion de ductilité

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)

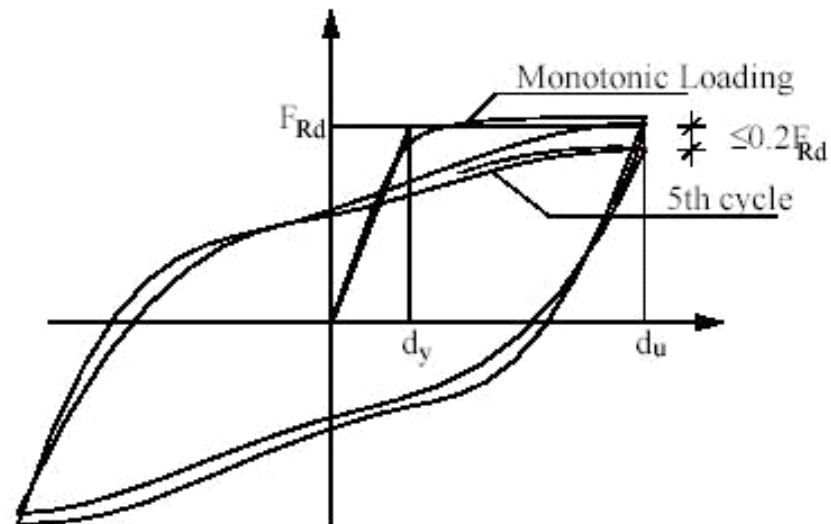
Dispositions constructives parasismiques

- 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

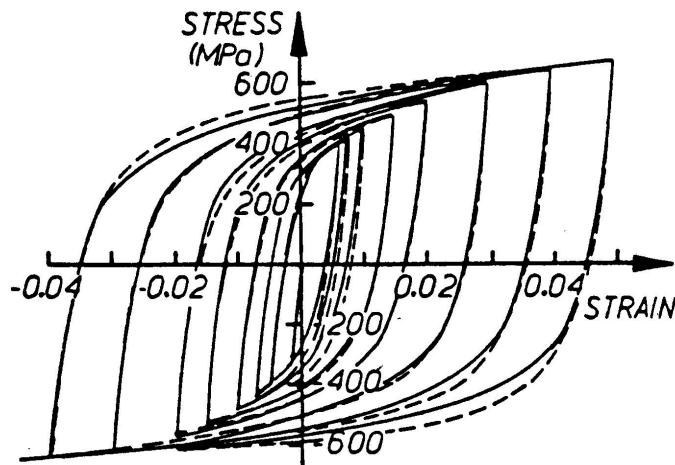
Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- De l'importance des dispositions constructives...

Coefficient de comportement et notion de ductilité

Ductilité de l'acier



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

(de classe B ailleurs)

EC8-2 § 5.2.1

Essais cycliques sur l'acier des armatures

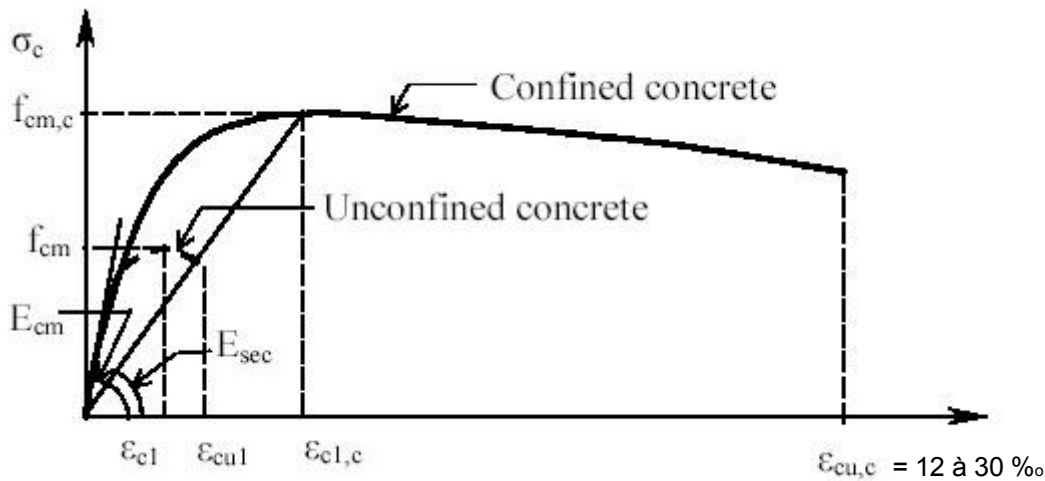
Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- De l'importance des dispositions constructives...

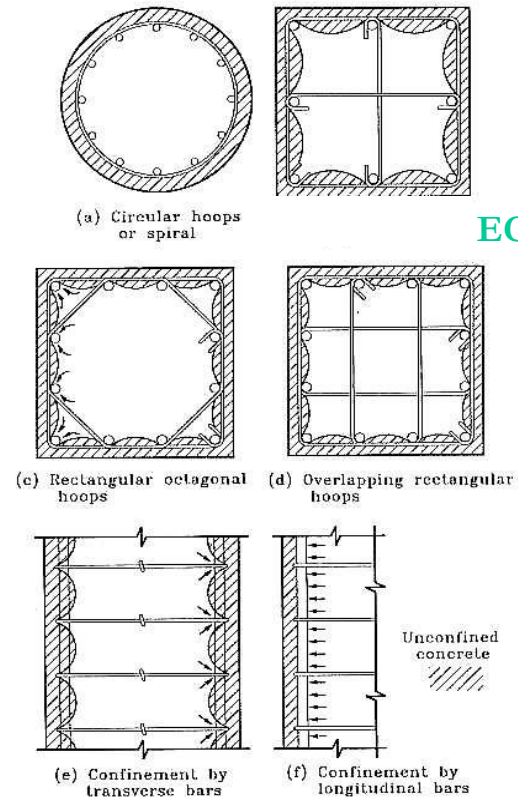
Coefficient de comportement et notion de ductilité

Ductilité du béton confiné



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

EC 8-2 Annexe E



EC8-2 fig. 6.1

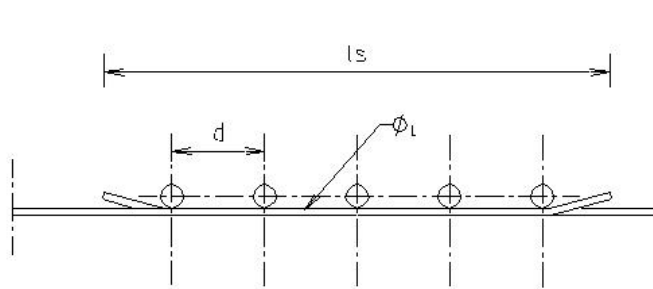
Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Prescriptions réglementaires

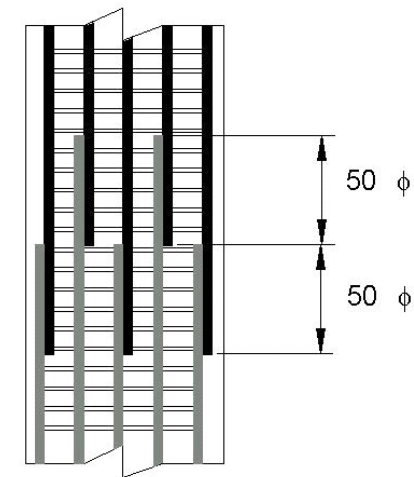
Dispositions relatives aux armatures longitudinales

Continuité - recouvrement



Longueur de recouvrement des armatures

Φ_L : armatures principales.
 l_s : longueur de recouvrement.
 $l_s = 1,30 * 40 \Phi_L = 50 \Phi_L$
 d : écartement armatures de couture.
 $d < 12 \Phi_L$



Généralement couvert par les prescriptions de l'EC2

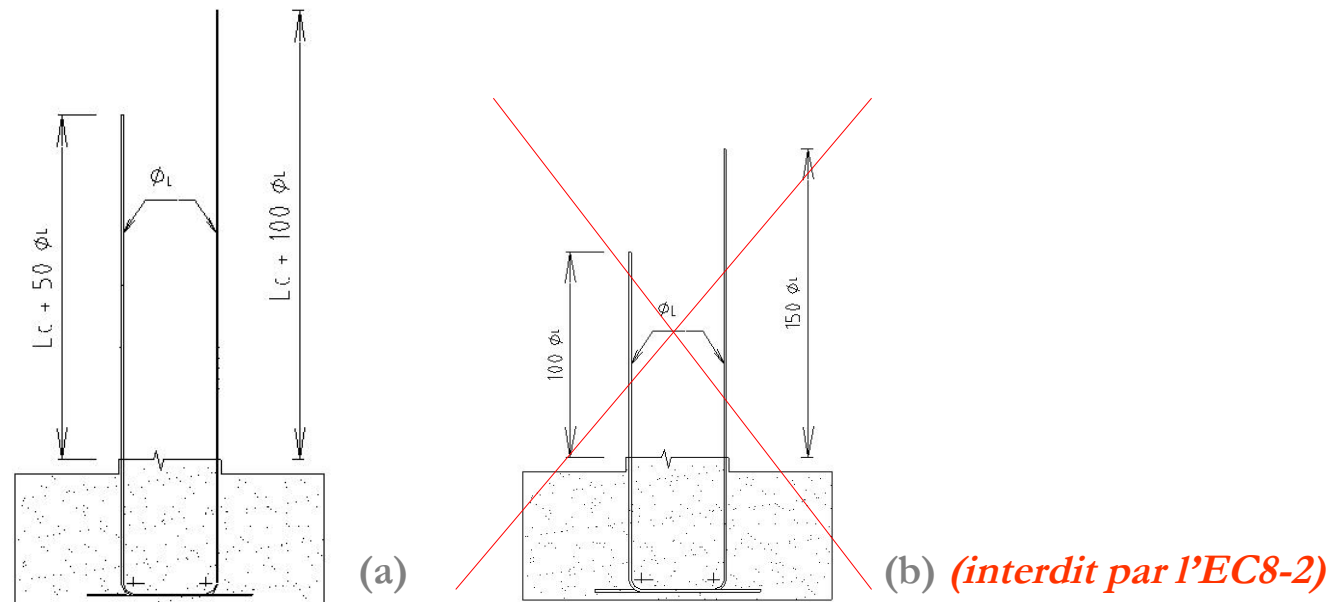
Conception parasismique des ponts (2/2)

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

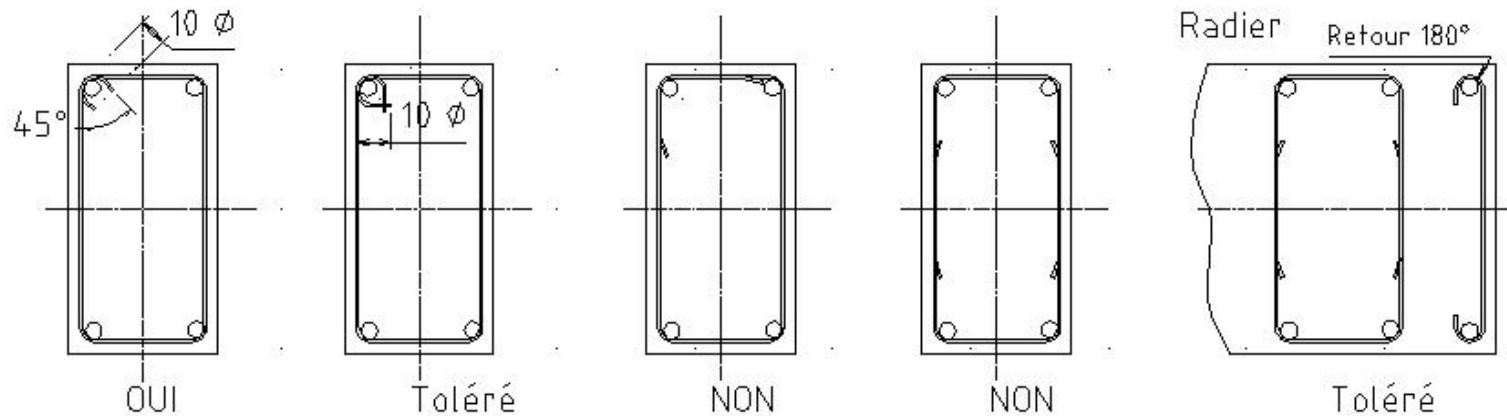
Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

- Prescriptions réglementaires

Dispositions relatives aux armatures transversales

Recouvrement des armatures en parement

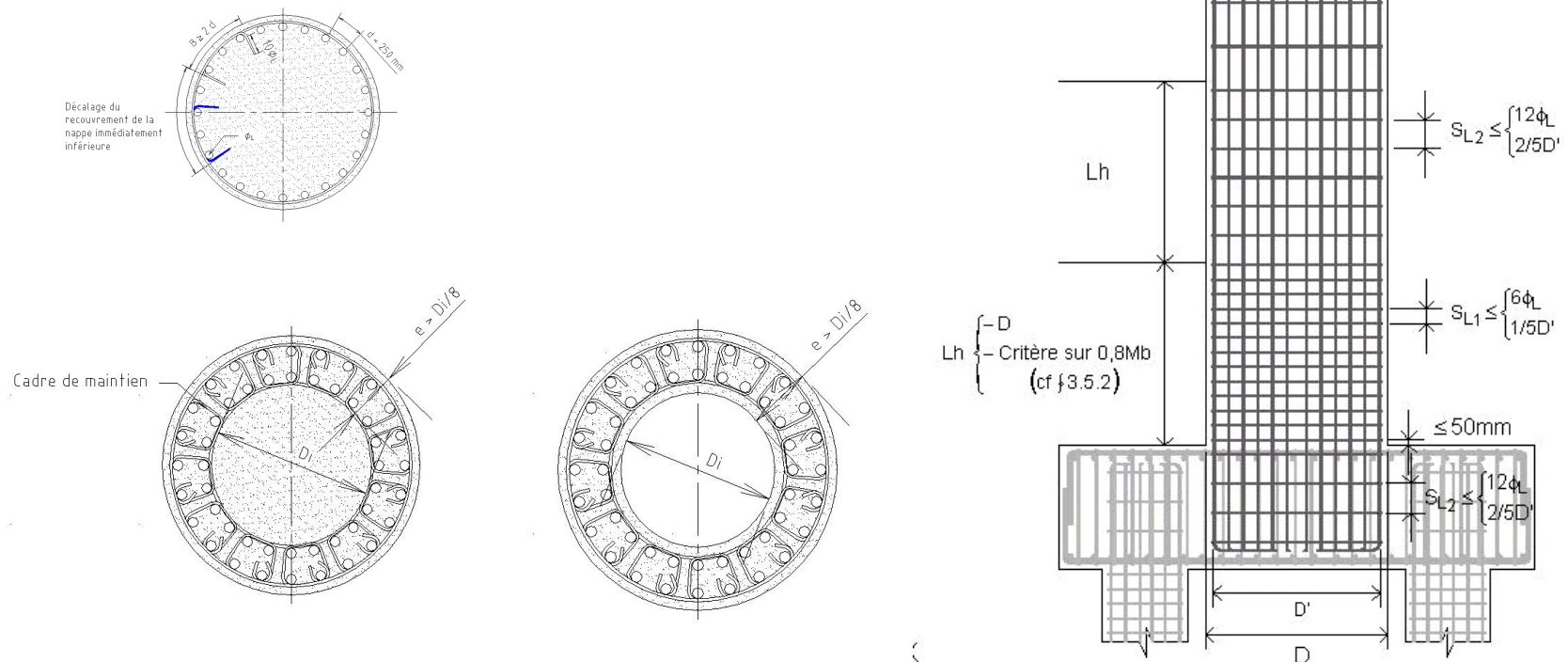


Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

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

Fûts de piles

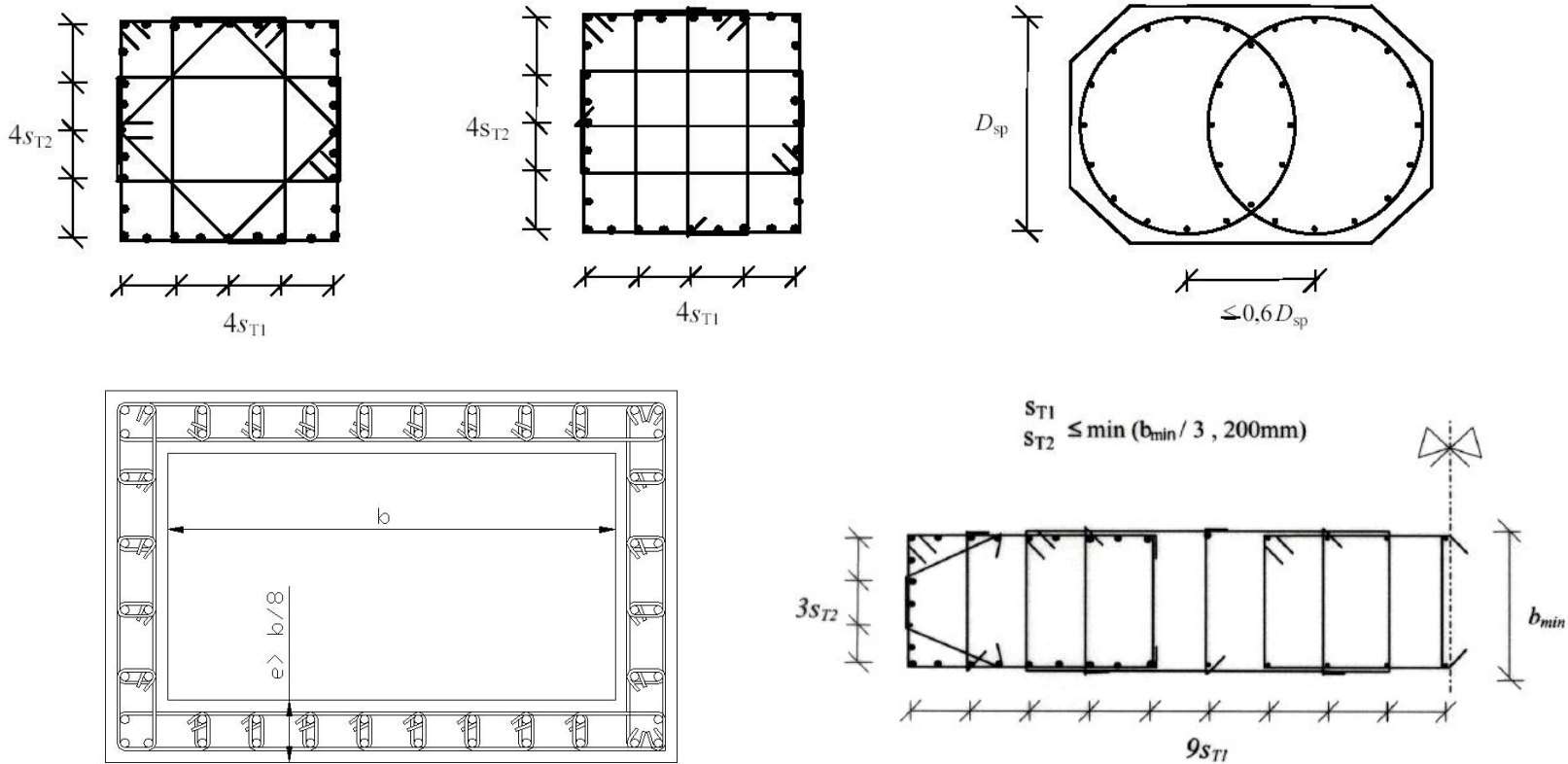


Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

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

Fûts de piles

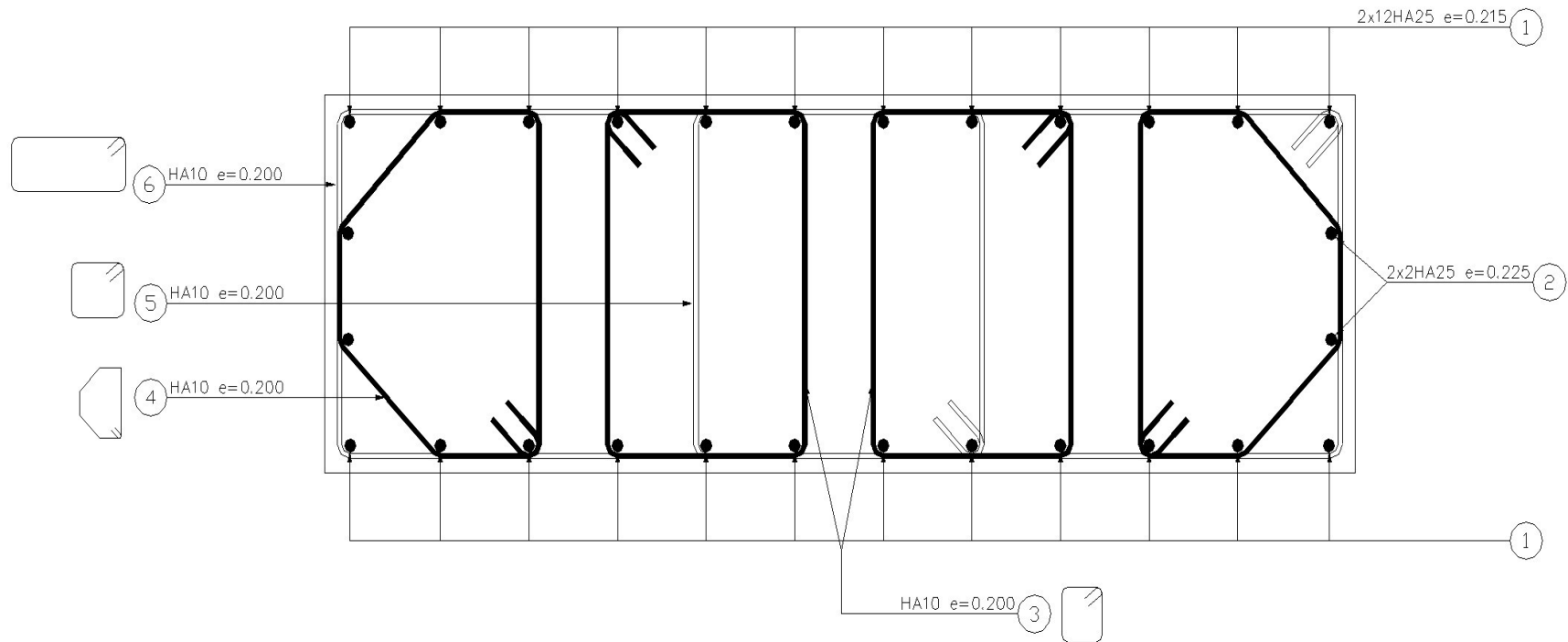


Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

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

Fûts de piles

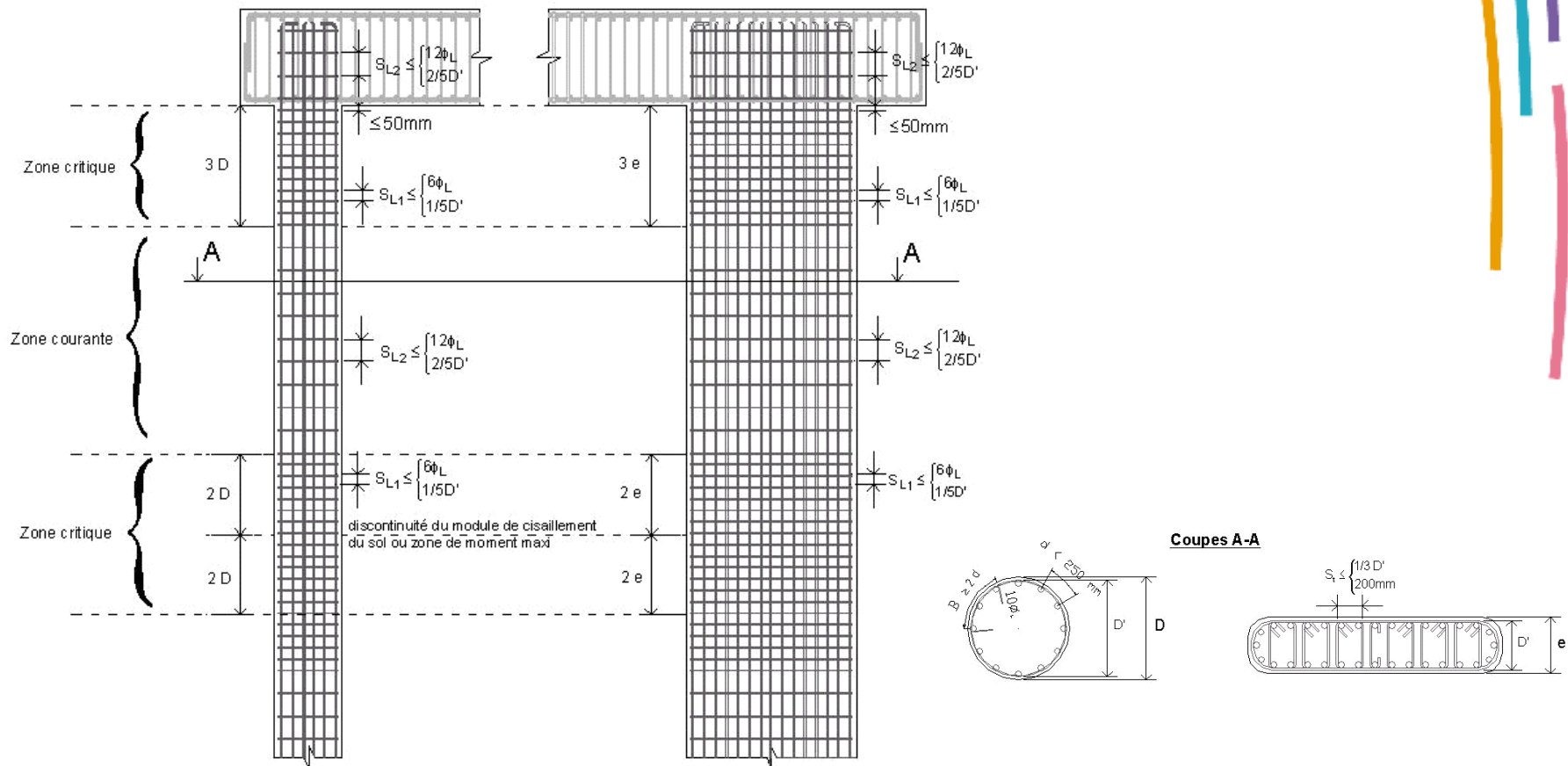


Conception parasismique des ponts (2/2)

Dispositions constructives parasismiques

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

Fondations profondes – pieux et barrettes



Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemple du pont de Rion-Antirion (Grèce)

Présentation de l'ouvrage



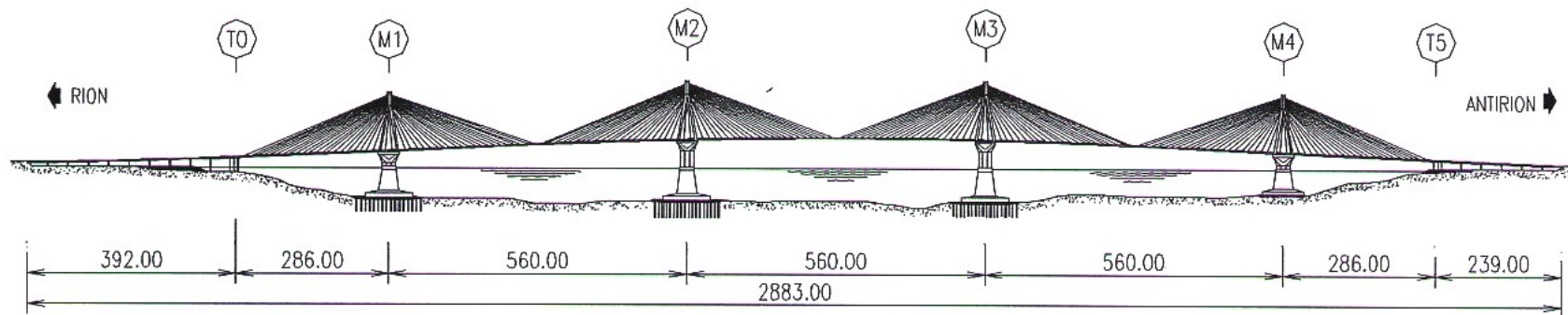
- Pont autoroutier entre Grèce continentale et Péloponnèse
- Longueur totale : 2883 m
- Largeur : 27 m
- Hauteur des pylônes : 227 m (dont 63 m sous l'eau)



Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemple du 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)

Exemple du 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



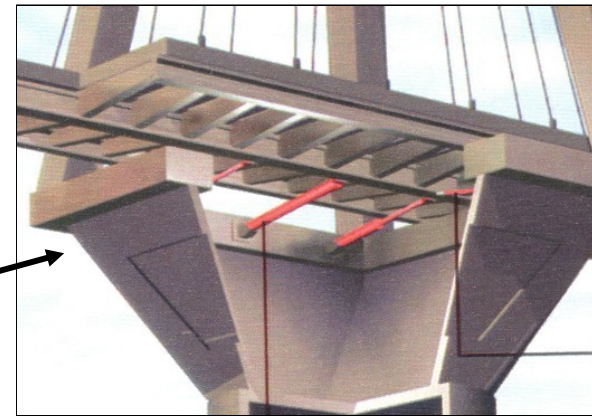
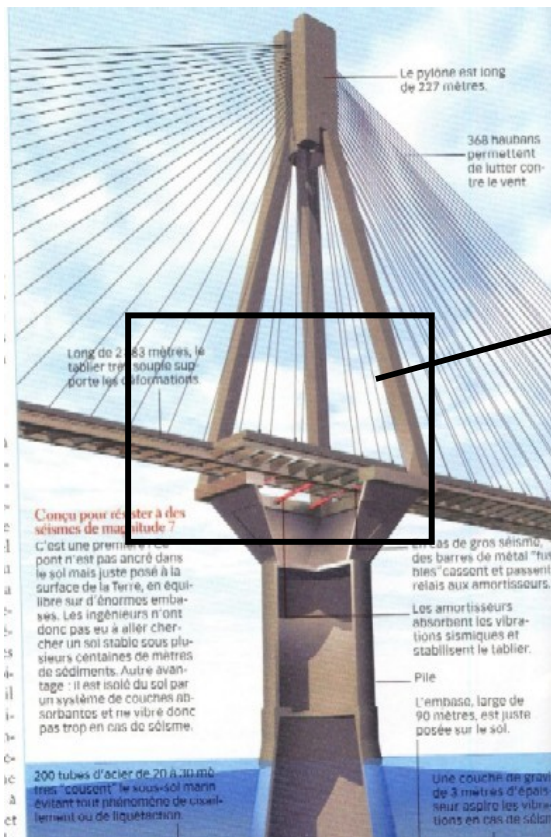
Conception basée sur un certain nombre de systèmes fusibles



Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemple du pont de Rion-Antirion (Grèce)

Éléments de conception parasismique



Systèmes fusibles disposés entre le tablier et les pylônes (assouplissement de la structure)

Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemple du pont de Rion-Antirion (Grèce)

Éléments de conception parasismique



Amortisseurs visqueux prenant le relais des fusibles pour :

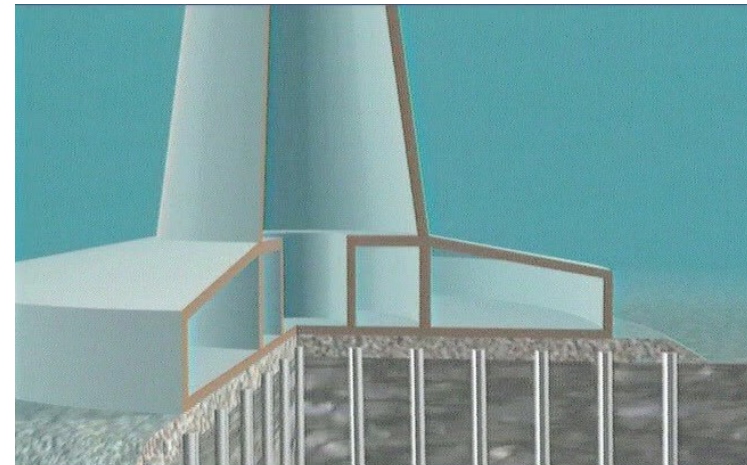
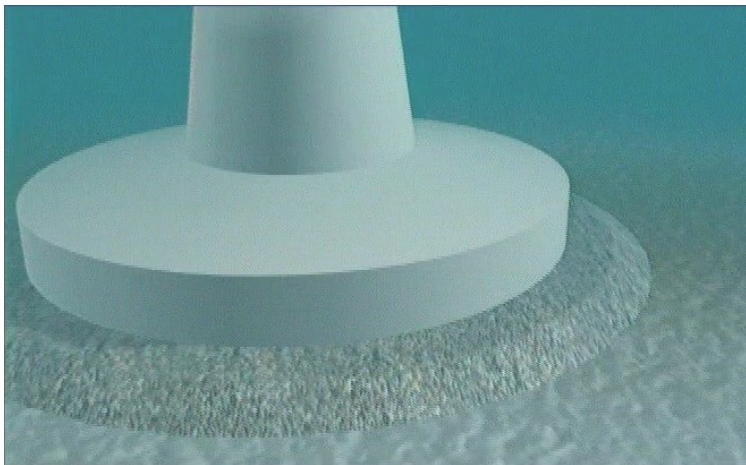
- limiter les déplacements
- dissiper une partie de l'énergie sismique

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

Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemple du 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)

Exemple du pont de Rion-Antirion (Grèce)

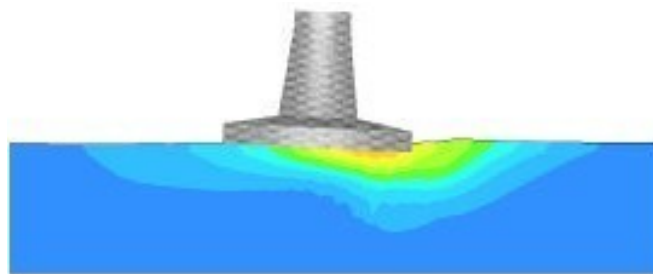
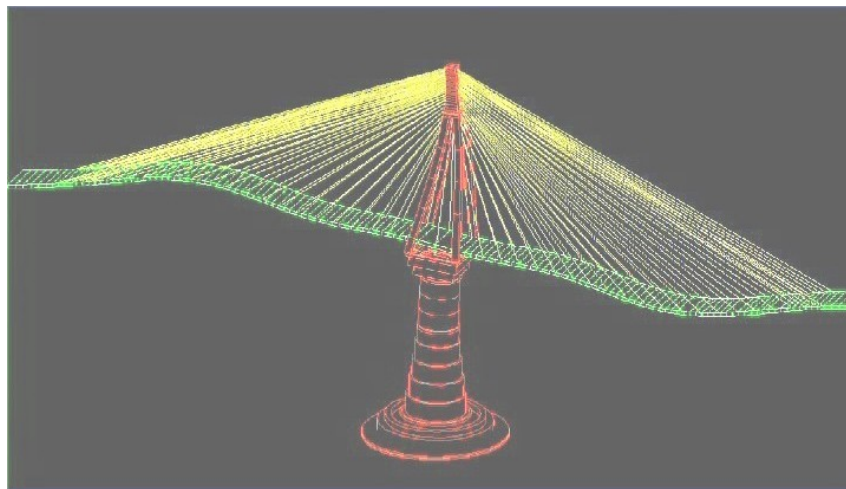
Prise en compte du séisme en phase de construction



Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemple du pont de Rion-Antirion (Grèce)

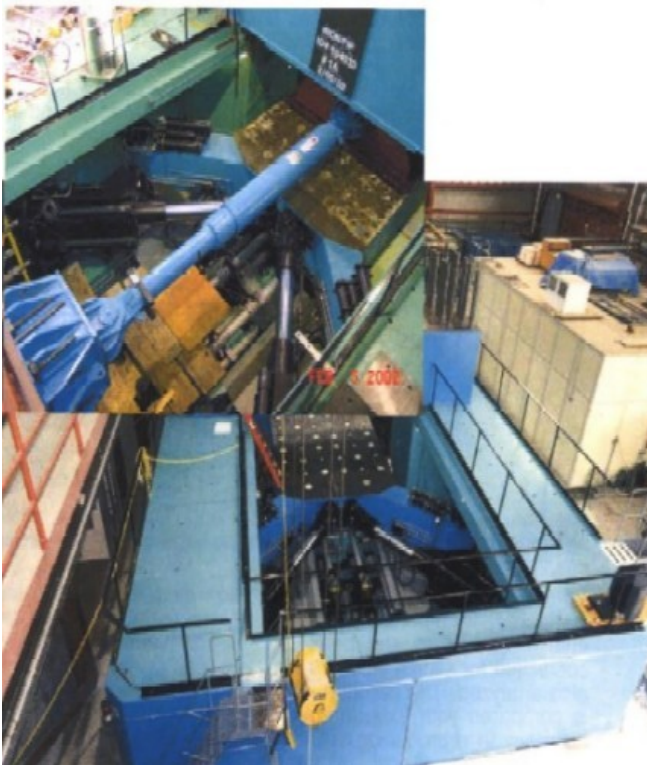
Modélisations numériques



Conception parasismique des ponts (2/2)

Exemple du 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

