

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



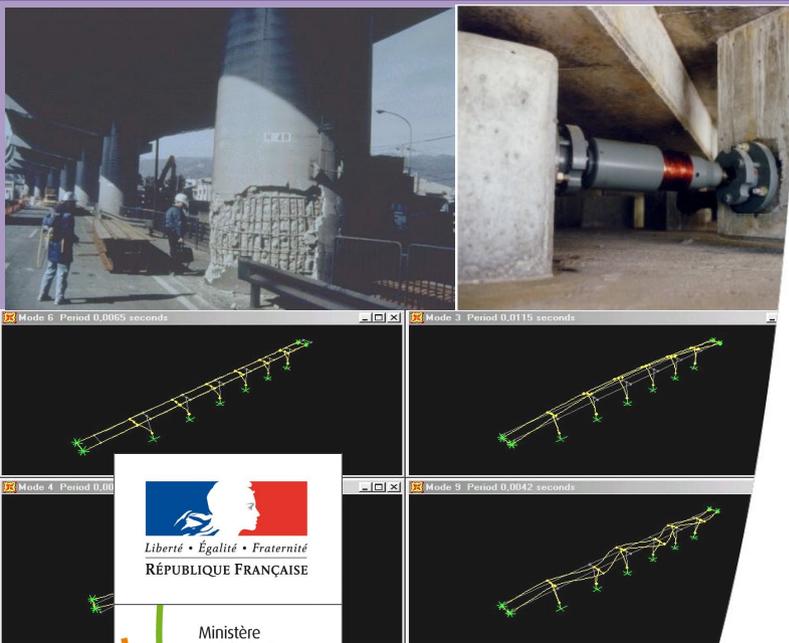
Journées techniques organisées avec l'appui du Sétra et sous l'égide de la CoTITA

PRISE EN COMPTE DU RISQUE SISMIQUE

Conception parasismique des ponts (1/2)

- Différents principes de conception parasismique des ponts
- Domaines d'emploi
- Méthodes de calcul et de dimensionnement associées

Denis DAVI
CETE Méditerranée

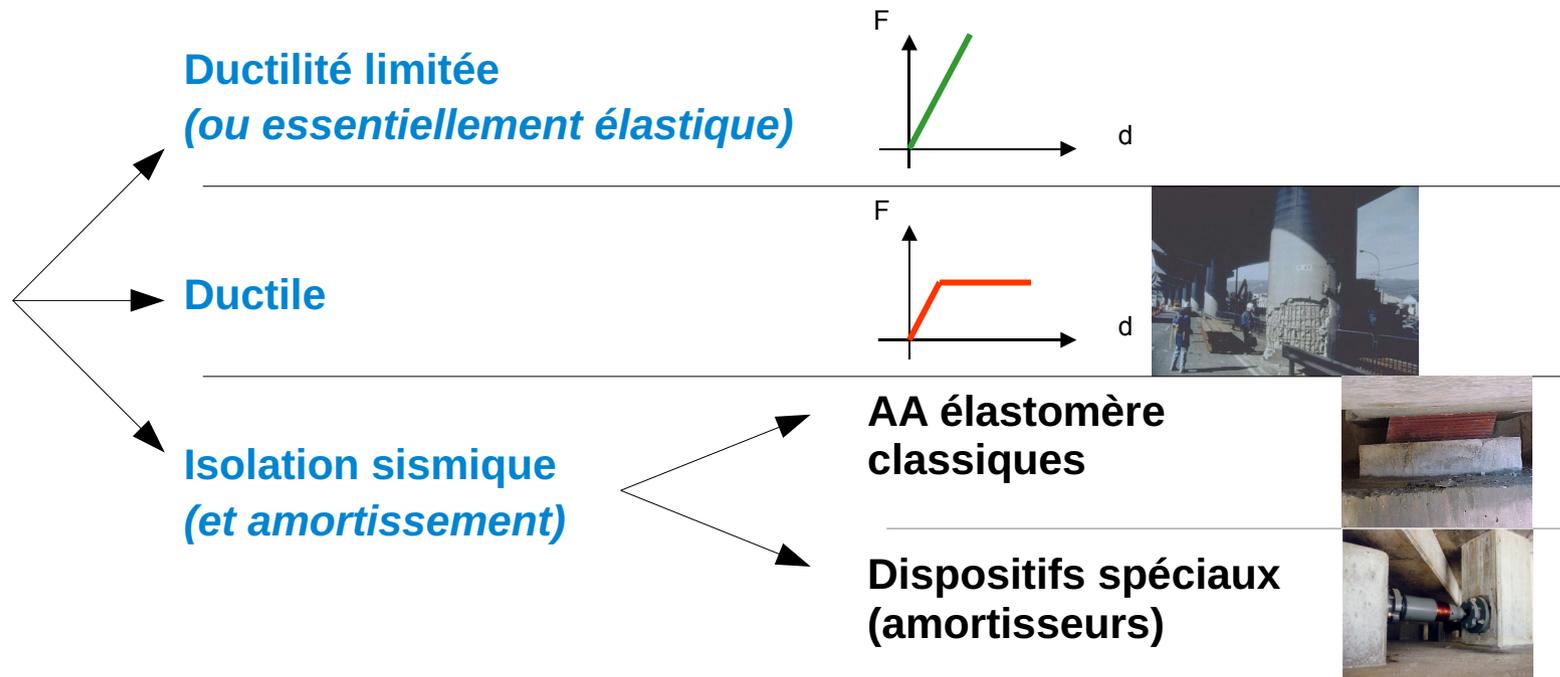


Conception parasismique des ponts (1/2)

Plan de l'exposé

(basé sur la structure de l'Eurocode 8-2)

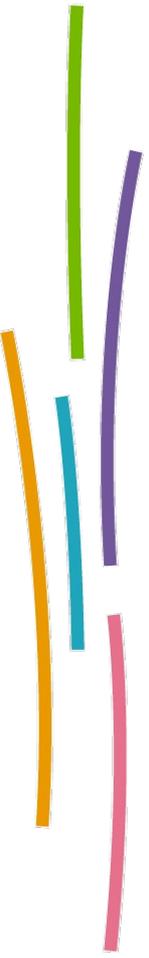
3 principes de conception parasismique des ponts :



Concepts, méthodes d'analyse
et principes de dimensionnement...

Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception en ductilité limitée
(ou essentiellement élastique)

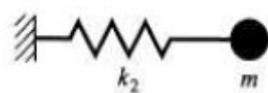
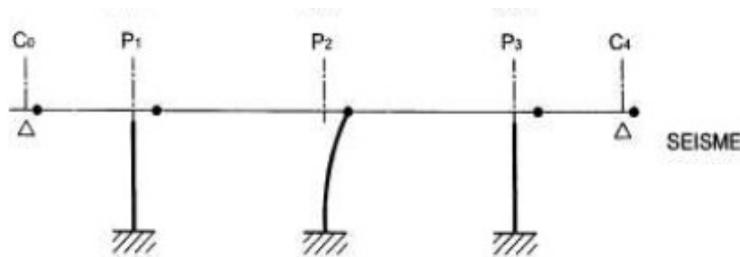


Conception parasismique des ponts (1/2)

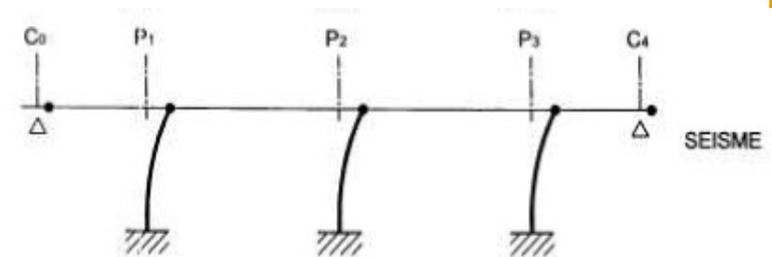
Conception en ductilité limitée (ou essentiellement élastique)

- 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

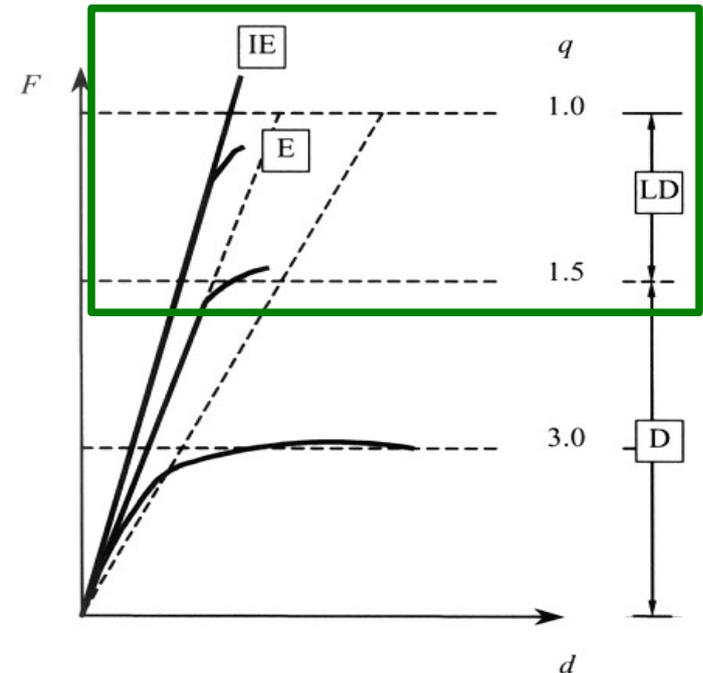


Figure 2.1 — Comportement sismique

Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception en ductilité limitée (ou essentiellement élastique)

- Concept

Tableau 4.1 — Valeurs maximales du coefficient de comportement q

Type d'éléments ductiles	Comportement sismique	
	Ductile limité	Ductile
Piles en béton armé :		
Piles verticales en flexion	1,5	3,5 $\lambda(\alpha_s)$
Béquilles inclinées fléchies	1,2	2,1 $\lambda(\alpha_s)$
Piles en acier :		
Piles verticales en flexion	1,5	3,5
Béquilles inclinées fléchies	1,2	2,0
Piles avec contreventement normal	1,5	2,5
Piles avec contreventement excentré	—	3,5
Assemblage rigide des culées au tablier :		
En générale	1,5	1,5
Structures bloquées (voir 4.1.6(9), (10))	1,0	1,0
Arcs	1,2	2,0



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

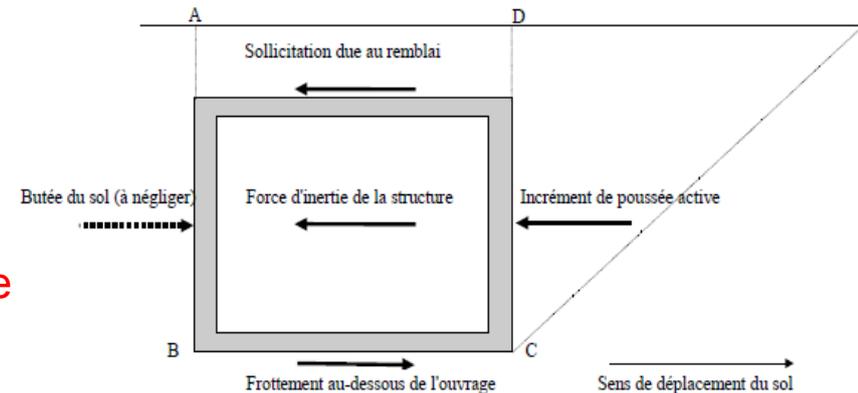
■ Domaine d'application :

- 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

- 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)

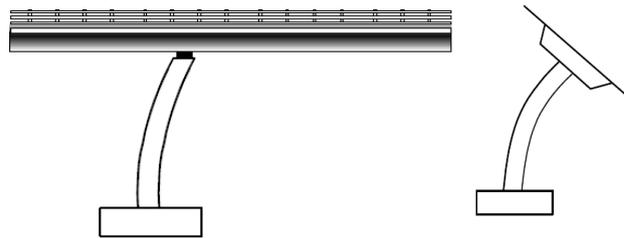
- Méthodes d'analyse

Méthodes monomodales

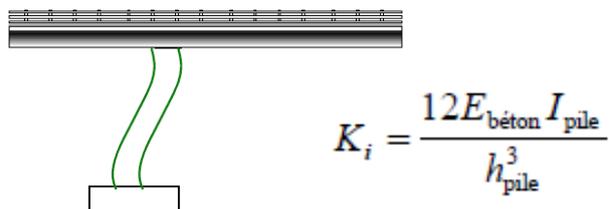
- Méthode du tablier rigide

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

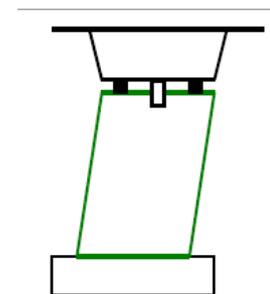
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M_{tab} + M_{piles_sup}}{\sum K_i}}$$



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



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



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



Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception en ductilité limitée (ou essentiellement élastique)

- Méthodes d'analyse

Méthodes monomodales

- 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 :

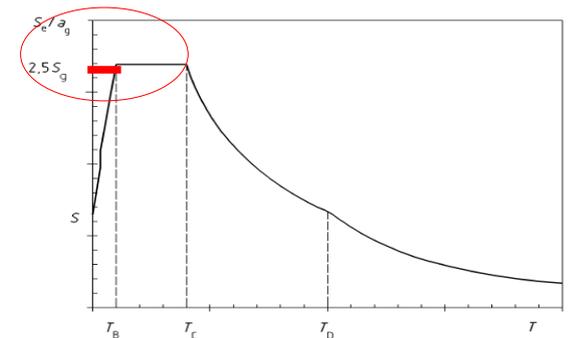
I_{brute} OU I_{fiss}

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 monomodales

- Méthode du tablier rigide

- **Prise en compte de la souplesse des fondations**
(valable pour l'ensemble des approches)

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

- Requête (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)

- Méthodes d'analyse

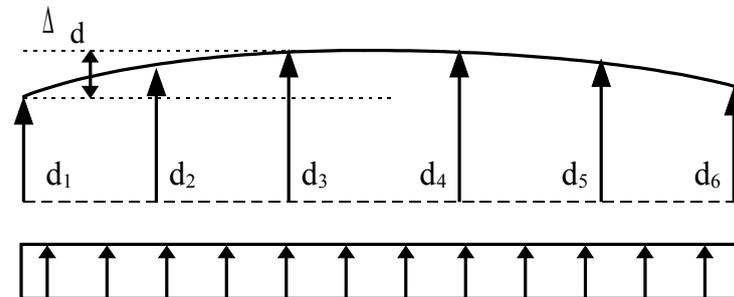
Méthodes monomodales

- Méthode du tablier rigide

- Critères de validité :

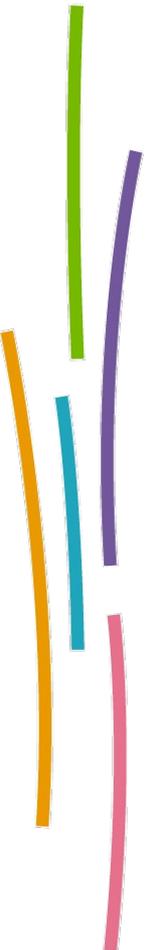
$$- L/B \leq 4$$

$$- \Delta_d / d_m \leq 0,20$$



chargement uniforme

$$d_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad \Delta_d = \max |d_i - d_j|$$



Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception en ductilité limitée (ou essentiellement élastique)

- Méthodes d'analyse

Méthodes monomodales

- Méthode de la pile indépendante

- **Domaine d'application :**

Composante de séisme transversale :

Cas de piles de hauteurs régulières, tabliers longs ou libres au niveau des culées

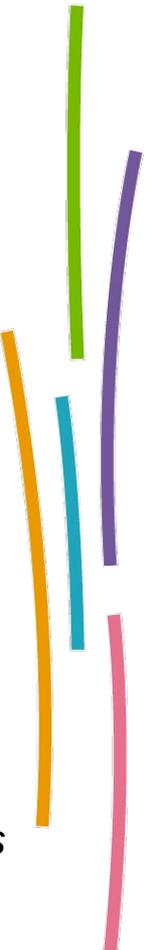
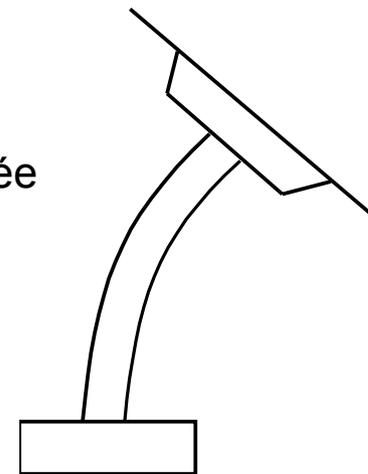
- **Principe :** $F_i = M_i \times S_d(T_i)$

M_i : masse de la moitié sup. de la pile i + portion de tablier rattachée

$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{M_i}{K_i}}$$

Idem précédemment :
 I_{brute} ou I_{fiss} , souplesse fondations...

- **Critère de validité :** $0,9 \leq T_i / T_{i+1} \leq 1,10$



Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception en ductilité limitée (ou essentiellement élastique)

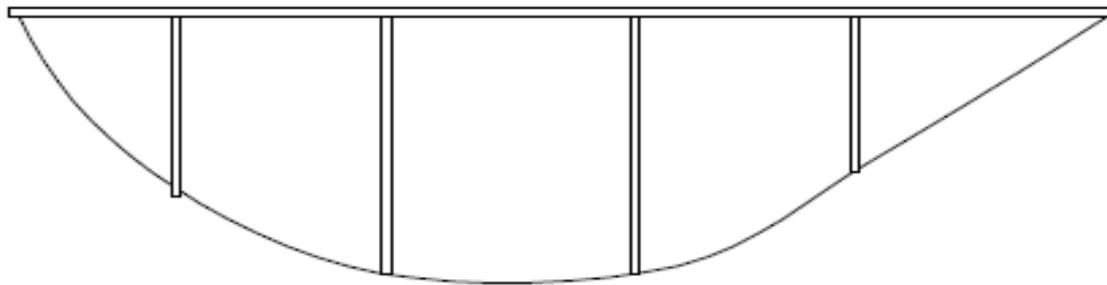
- Méthodes d'analyse

Méthodes monomodales

- Méthode de Rayleigh

■ Domaine d'application :

- Composante de séisme transversale si tablier souple et ouvrage régulier
(*variation uniforme des hauteurs, symétrie, biais et courbure limités...*)



- Composante de séisme verticale (*à considérer impérativement avec $q=1$*)



Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception en ductilité limitée (ou essentiellement élastique)

- Méthodes d'analyse

Méthodes monomodales - Méthode de Rayleigh

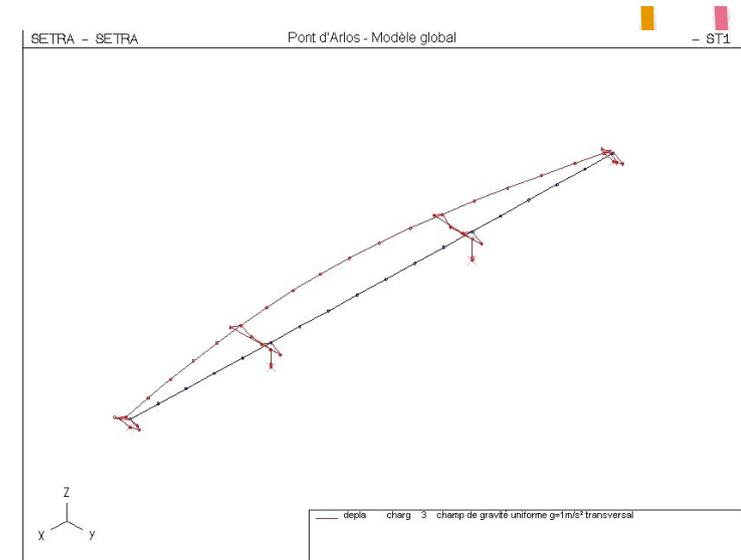
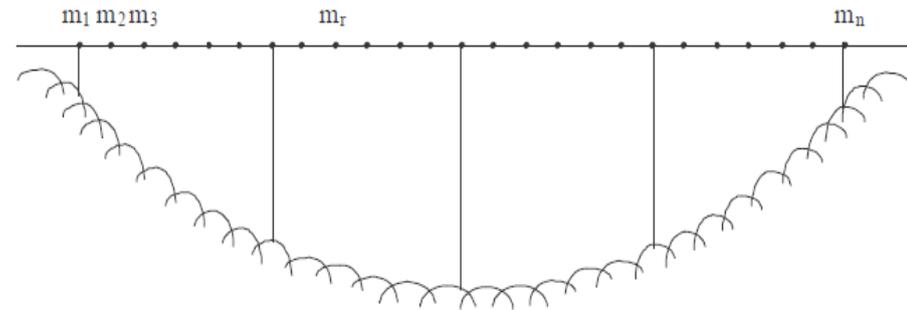
■ Principe :

$$T_{trans} = 2\pi \sqrt{\frac{\sum m_i \cdot u_i^2}{\sum m_i \cdot u_i}} ; M_{modale} = \frac{(\sum m_i \cdot u_i)^2}{\sum m_i \cdot u_i^2}$$

$$f_r = \frac{m_r \cdot u_r}{\sum m_i \cdot u_i} \cdot M_{tab} \cdot S_d(T)$$

■ Critères de validité :

- Rapport de la masse des piles sur la masse du tablier :
 $M_{piles} / M_{tab} = 470,2t / 2770,4t = 0,17 < 1/5$
- Distance entre centre de masse et centre de rigidité = $0 < 5\% \cdot L$
- Masse mise en mouvement $> 70\%$ x Masse totale de la structure
(critère à vérifier a posteriori)



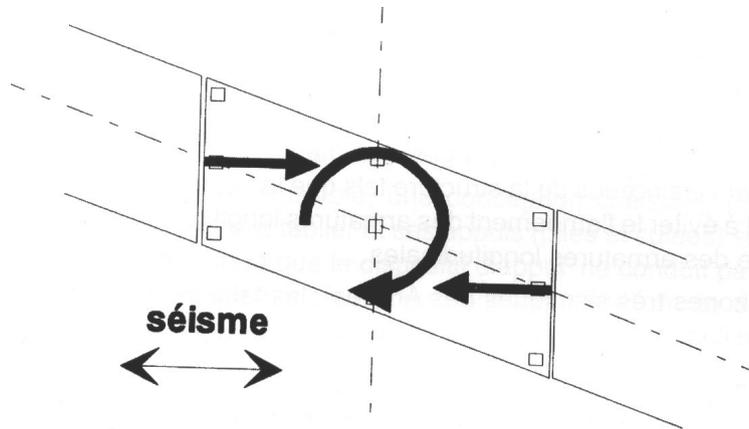
Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception en ductilité limitée (ou essentiellement élastique)

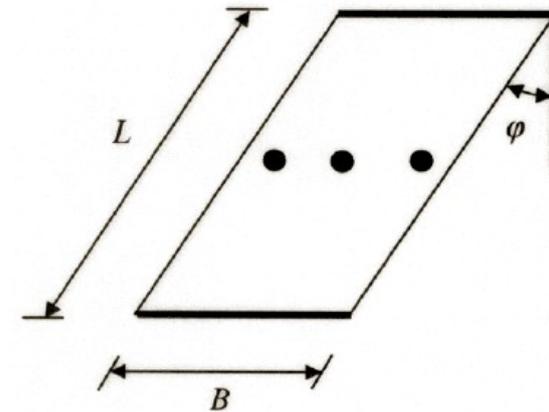
- Méthodes d'analyse

Méthodes monomodales

- Prise en compte forfaitaire du biais



Prise en compte si : $\varphi > 20^\circ$
et $B/L > 2,0$?? ...0,5



$$M_t = F.(e_a + e_d + e_p) \quad \text{où :}$$

Conception parasismique des ponts (1/2)

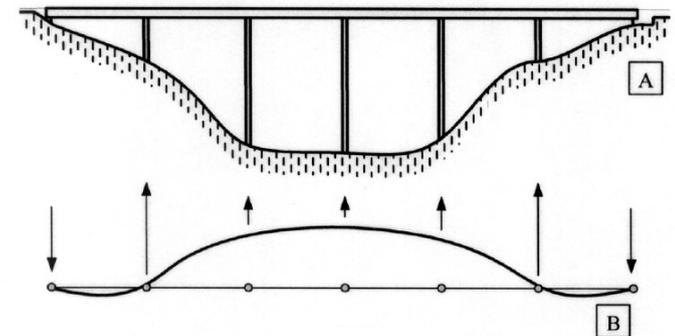
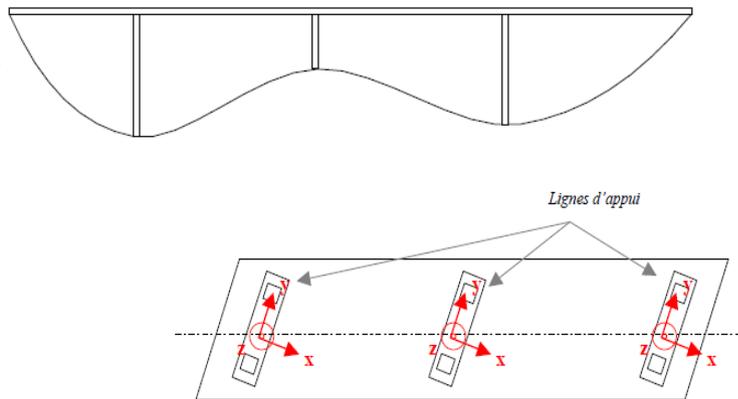
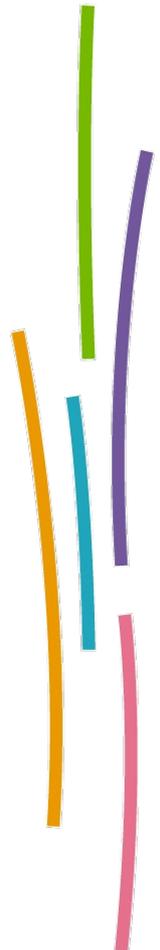
Conception en ductilité limitée (ou essentiellement élastique)

- Méthodes d'analyse

Méthodes multimodales

■ Domaine d'application :

- Composante longitudinale (*tablier souple et piles encastrées*)
- Composante de séisme transversale si tablier souple et ouvrage irrégulier (*hauteurs de piles très irrégulières, assymétrie, biais ou courbure prononcés...*)



Légende
A — Élévation
B — Vue en plan

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 spatiales 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 :

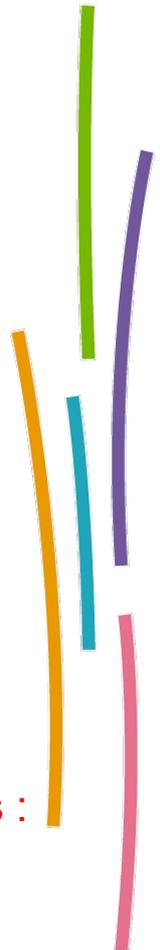
$\Psi_{21} = 0,2$ pour les ouvrages routiers urbains à trafic intense,

$\Psi_{21} = 0,3$ 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)

- Principes de dimensionnement

Dimensionnement des éléments de structure

- Coefficients de sécurité matériaux sous séisme : $\gamma_c = 1,3$; $\gamma_s = 1,0$

- Moments fléchissants

- Zones courantes : Directement à partir du spectre pré-divisé par q : $M_{Rd} \geq M_{Ed}$
- Fondations : Moments remultipliés par q : $M_{Rd} \geq q \cdot M_{Ed}$

- Efforts tranchants

Efforts remultipliés par q et γ_{Bd} : $V_{Rd} \geq q \cdot \gamma_{Bd} \cdot V_{Ed}$

Coefficient sécurité vis-à-vis des ruptures fragiles : $\gamma_{Bd} = 1,25$

- Déplacements

- Ré-évalués de manière itérative sur la base de I_{fiss_eq} (sous l'état de contraintes obtenu)
- Remultipliés par $\mu_d = f(q)$

Cf. Conception « ductile »

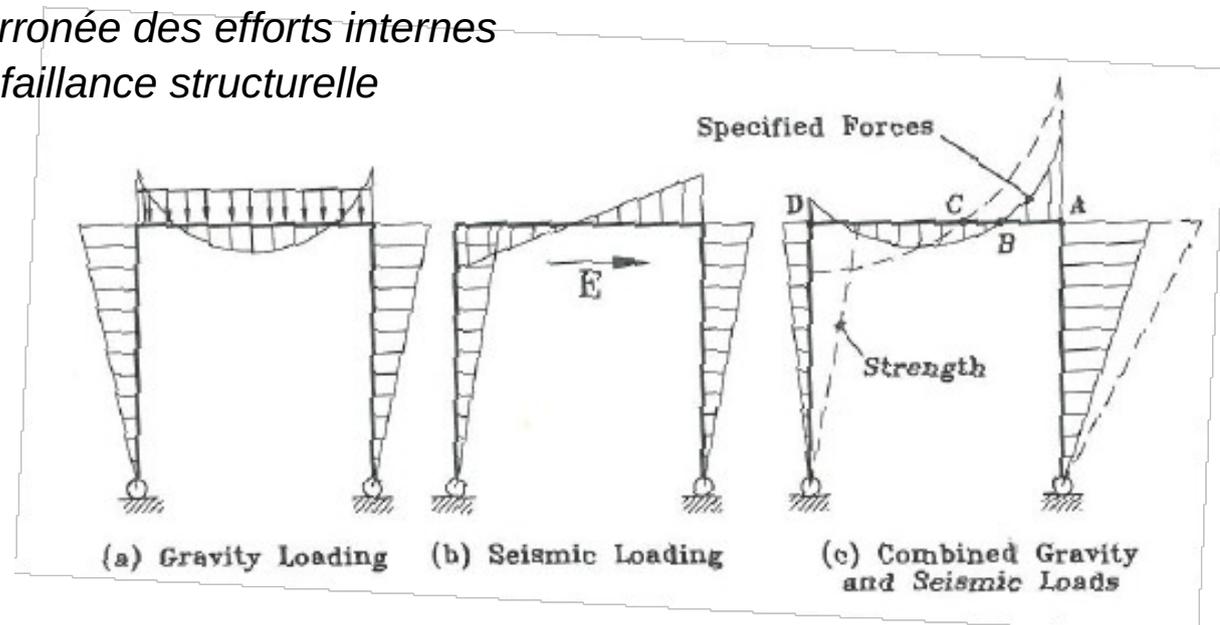
Conception parasismique des ponts (1/2)

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)

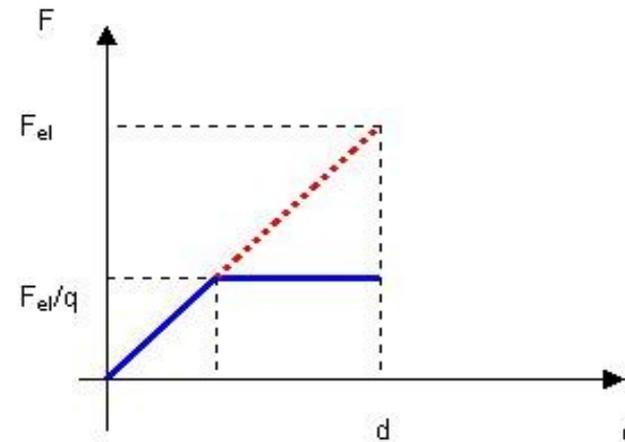
Conception en ductilité limitée (ou essentiellement élastique)

- Limites de l'approche strictement élastique

Proportionnalité entre sollicitations sismiques et niveau de résistance :

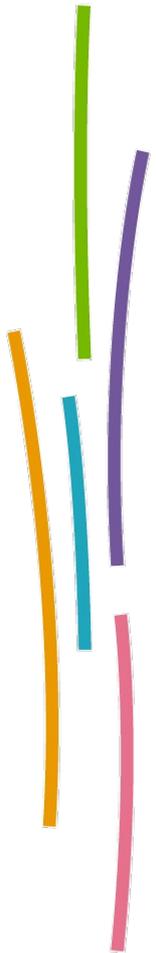
➔ A niveau de déplacement imposé par le séisme, plus on augmente la résistance structurelle et plus on augmente les efforts sismiques sollicitants

➔ Peu efficace et peu rentable



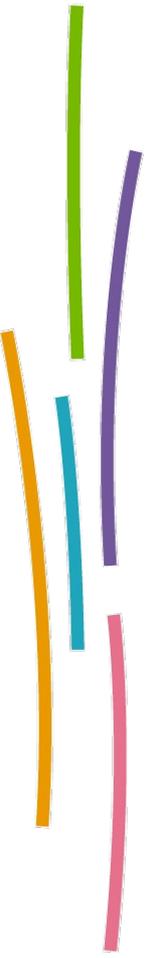
➔ **Point essentiel d'évolution entre les règlements parasismiques de 1^{ère} génération (PS69) et ceux de 2^{ème} génération (PS92) :**

**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...)

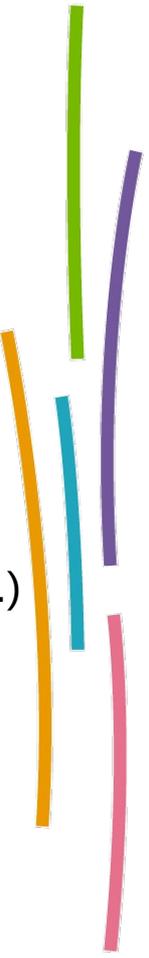
- Incursions **prononcées** dans le domaine post-élastique des matériaux :

- 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

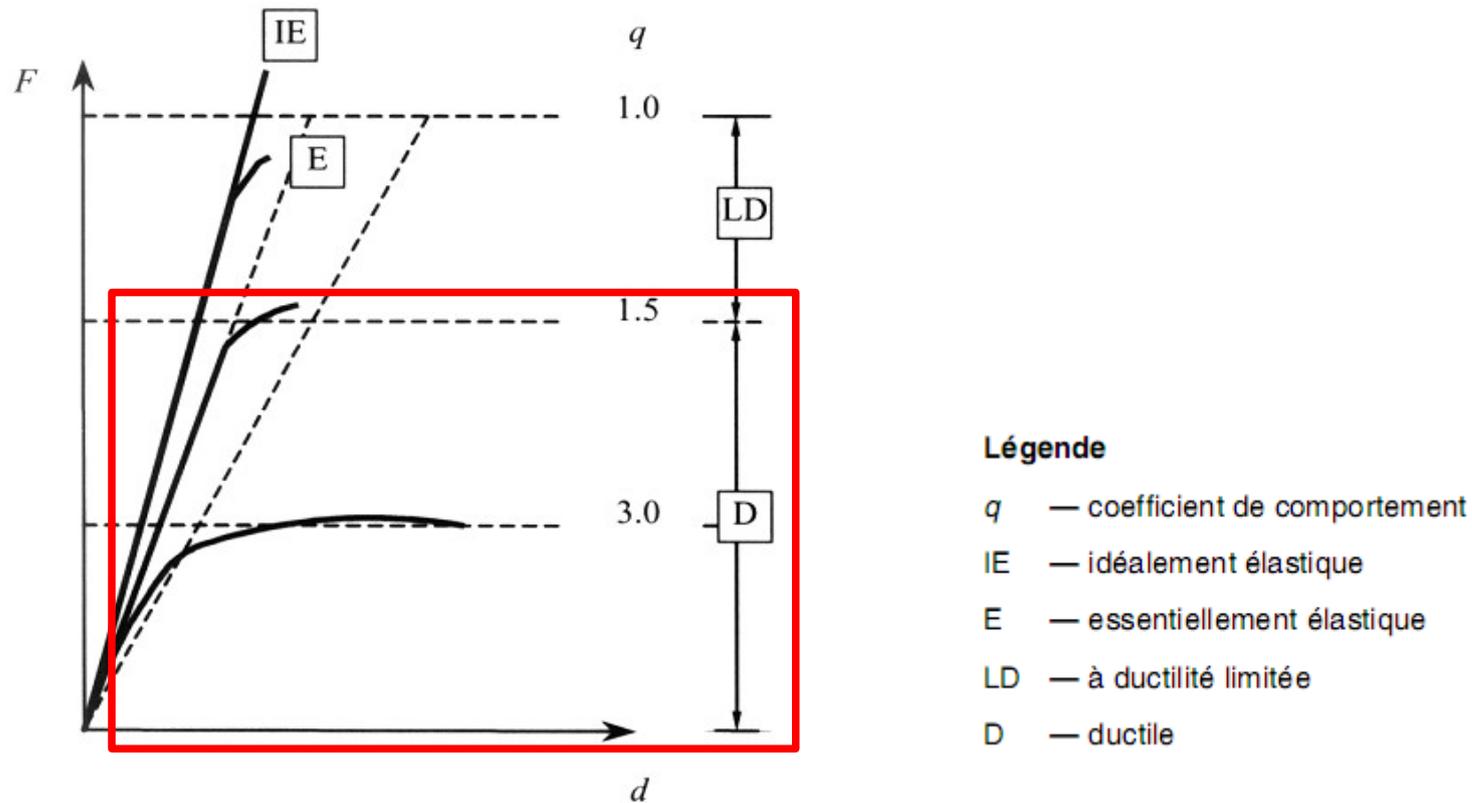


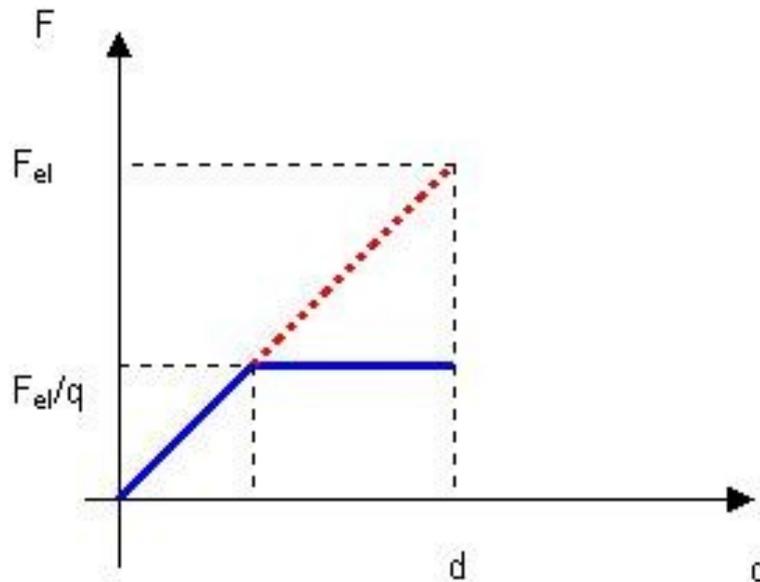
Figure 2.1 — Comportement sismique

Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception ductile

- Concept

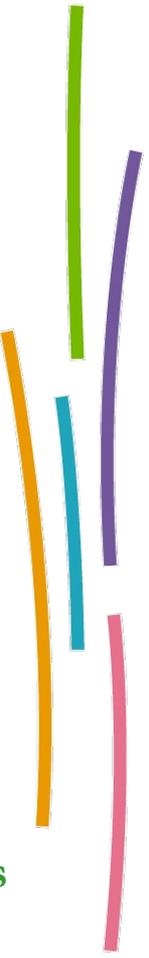
Principe du coefficient de comportement



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 (1/2)

Conception ductile

- Concept

Tableau 4.1 — Valeurs maximales du coefficient de comportement q

Type d'éléments ductiles	Comportement sismique	
	Ductile limité	Ductile
Piles en béton armé :		
Piles verticales en flexion	1,5	3,5 $\lambda(\alpha_s)$
Béquilles inclinées fléchies	1,2	2,1 $\lambda(\alpha_s)$
Piles en acier :		
Piles verticales en flexion	1,5	3,5
Béquilles inclinées fléchies	1,2	2,0
Piles avec contreventement normal	1,5	2,5
Piles avec contreventement excentré	—	3,5
Assemblage rigide des culées au tablier :		
En générale	1,5	1,5
Structures bloquées (voir 4.1.6(9), (10))	1,0	1,0
Arcs	1,2	2,0

* $\alpha_s = L_s/h$ est le rapport de portée d'effort tranchant de la pile, où L_s est la distance entre la rotule plastique et le point de moment nul et h est la hauteur de la section transversale dans la direction de flexion de la rotule plastique.

Pour $\alpha_s \geq 3$ $\lambda(\alpha_s) = 1,0$

$3 > \alpha_s \geq 1,0$ $\lambda(\alpha_s) = \sqrt{\frac{\alpha_s}{3}}$



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

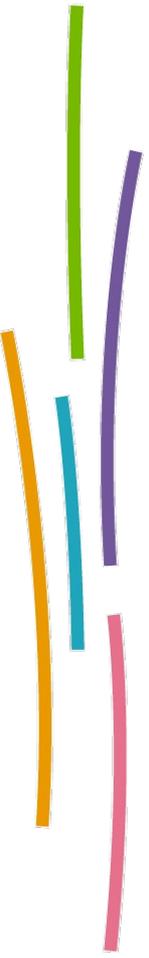
Ouvrages de géométrie relativement régulière

- **Mêmes approches générales que dans le cas de la ductilité limitée et mêmes domaines d'application**
 - *Méthodes monomodales : tablier rigide, pile indépendante, Rayleigh...*
 - *Méthodes multimodales*

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 :

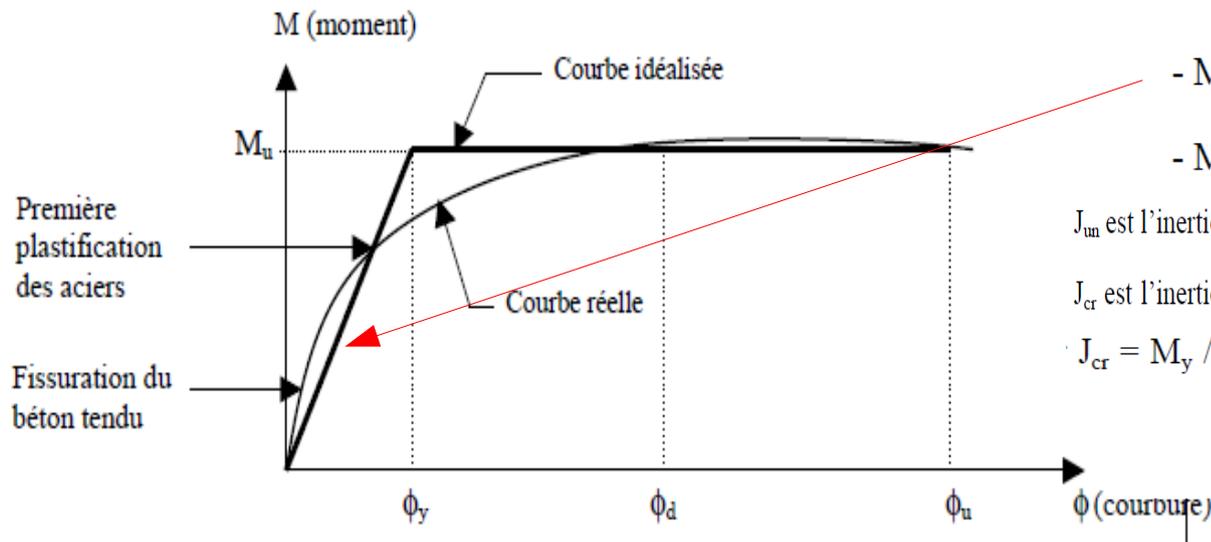
- Méthode 1 : $J_{eff} = 0,08 J_{un} + J_{cr}$

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

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 :

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

$\phi_y = 2,4 \varepsilon_{sy}/d$ 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

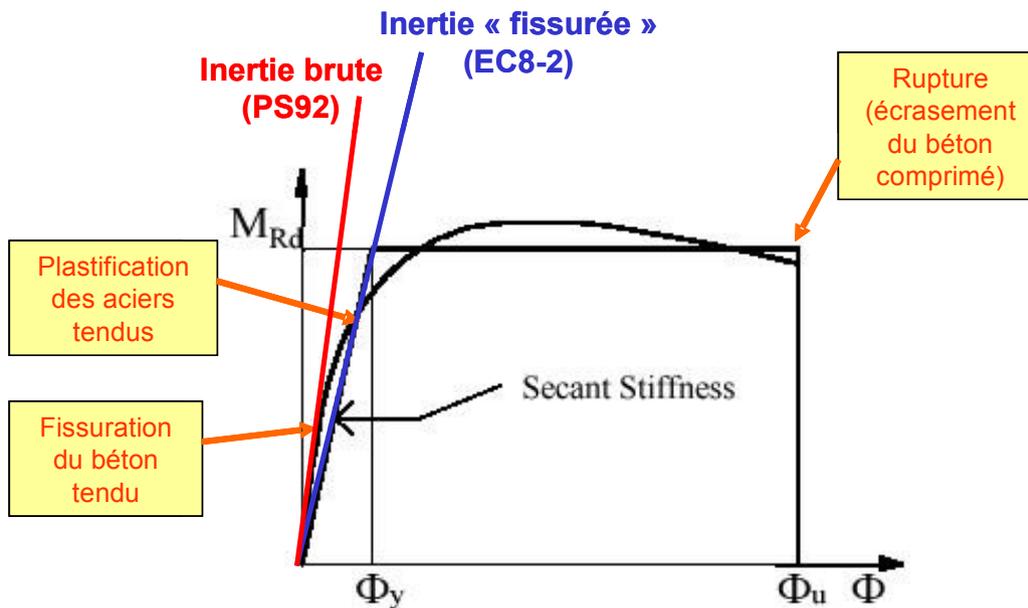
- Évaluation de l'inertie fissurée « I_{fiss} » ou « J_{eff} »

EC8-2 Annexe C :

- Méthode 1 : $J_{eff} = 0,08 J_{un} + J_{cr}$
- Méthode 2 : $E_c J_{eff} = 1,2 M_{Rd} / \phi_y$

Nécessite de pré-évaluer le moment résistant des sections

➔ Approche itérative



En 1^{ère} approche : prendre $I_{fiss} = 0,4 I_{brute}$

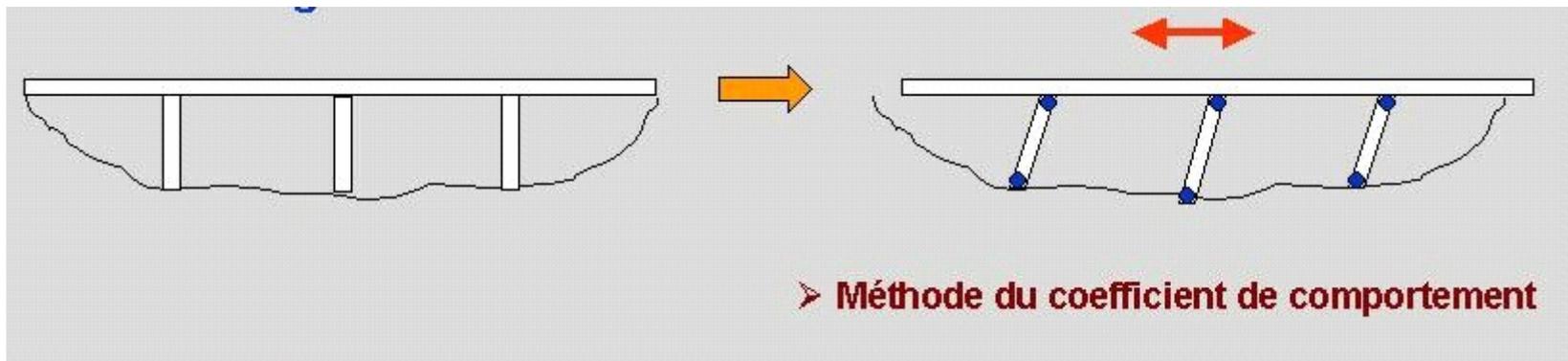
Conception parasismique des ponts (1/2)

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 :

$$\rho = \frac{r_{\max}}{r_{\min}} \leq 2 \quad \text{avec} \quad r_i = \frac{q \cdot M_{Ed}}{M_{Rd}}$$

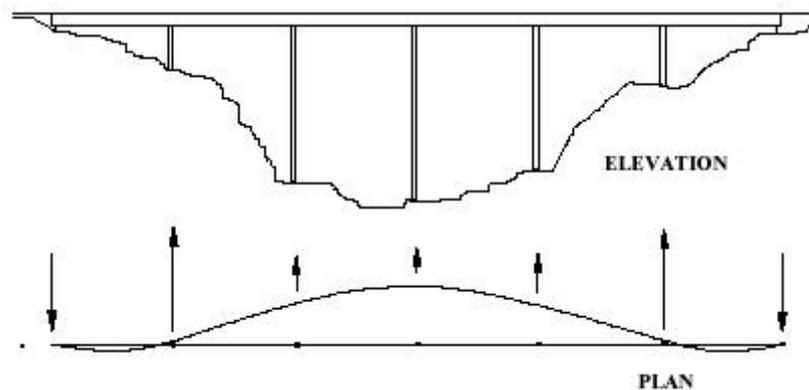
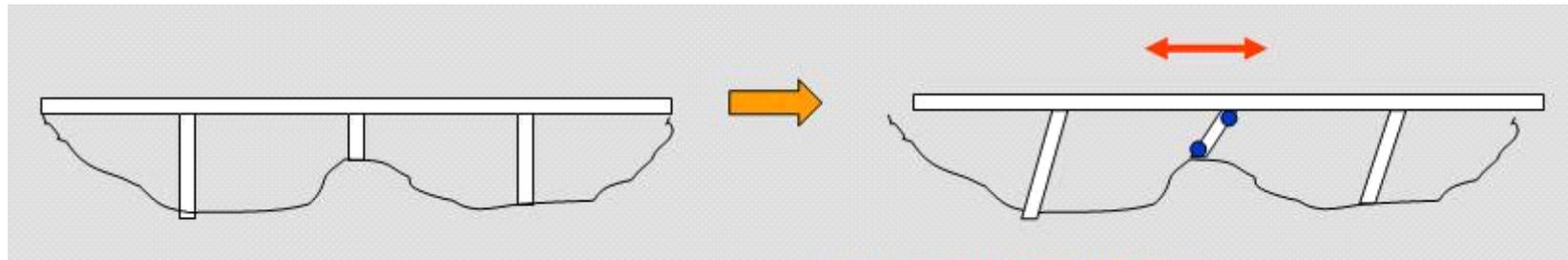
EC 8-2 § 4.1.8

Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception ductile

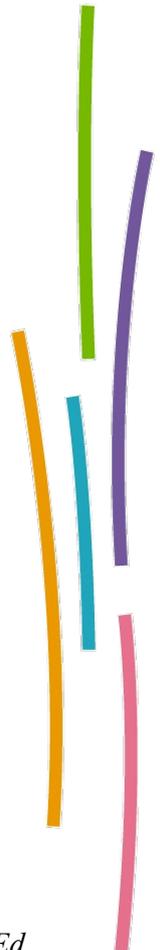
- Méthodes d'analyse

Analyse des structures irrégulières



$$\rho = \frac{r_{\max}}{r_{\min}} > 2 \quad \text{avec} \quad r_i = \frac{q \cdot M_{Ed}}{M_{Rd}}$$

⇒ Méthode push-over



Conception parasismique des ponts (1/2)

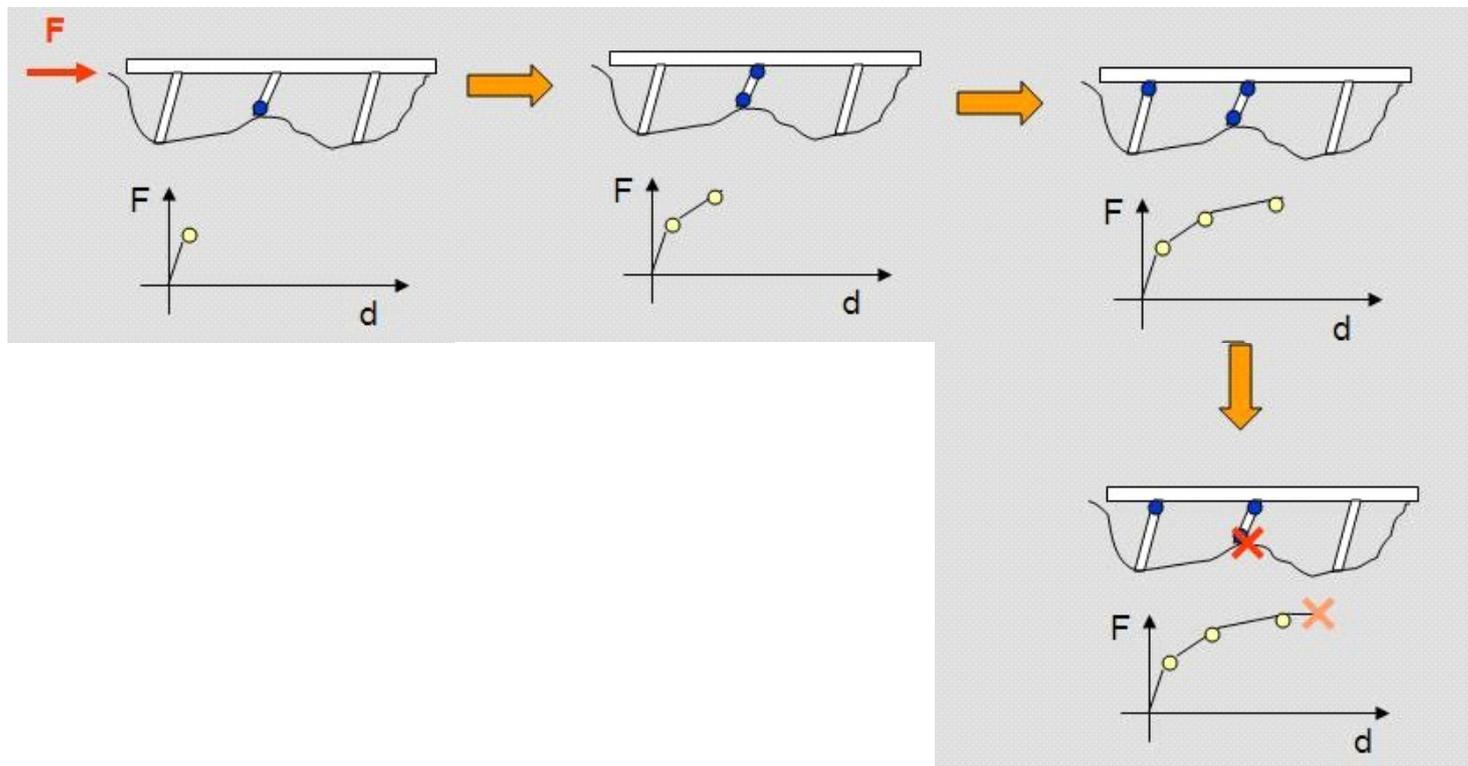
Conception ductile

- Méthodes d'analyse

Analyse des structures irrégulières

- Méthode push-over

(EC 8-2 Annexe H)



Conception parasismique des ponts (1/2)

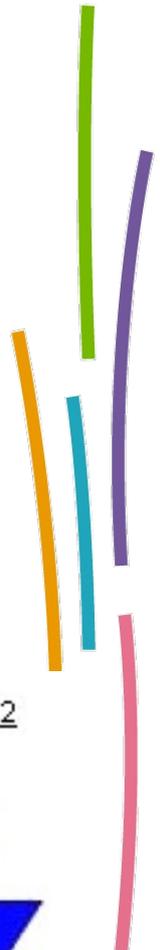
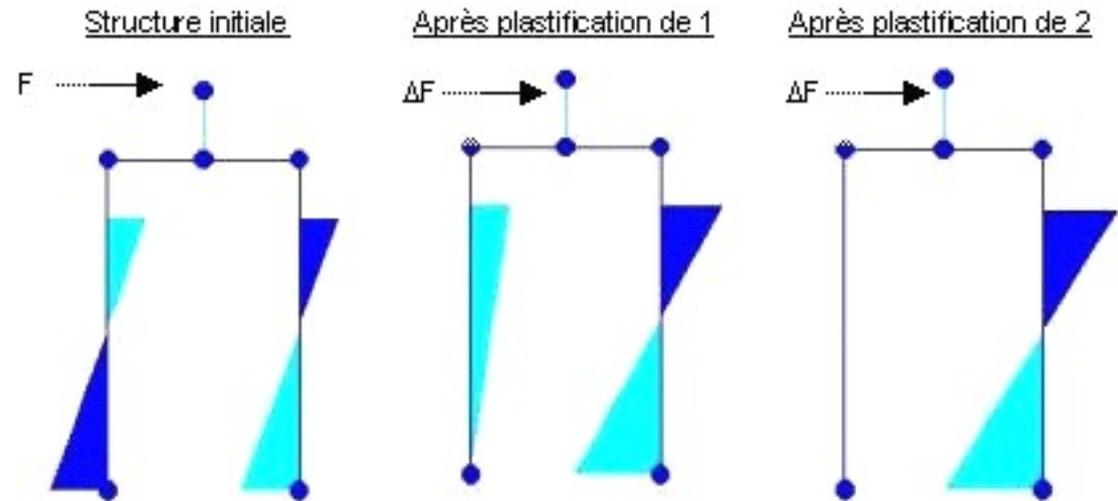
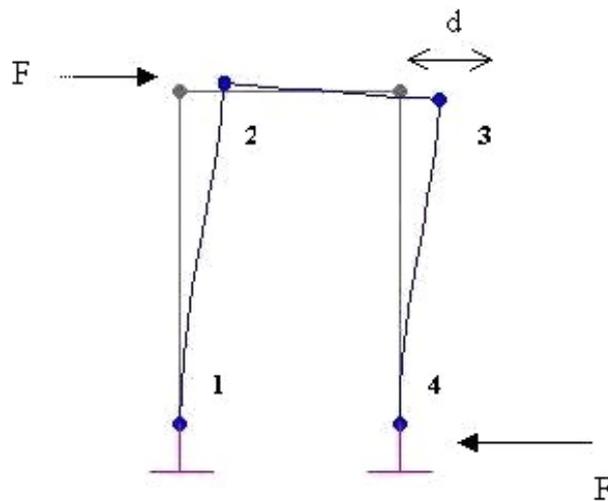
Conception ductile

- Méthodes d'analyse

Analyse des structures irrégulières

- Méthode push-over

(EC 8-2 Annexe H)



Conception parasismique des ponts (1/2)

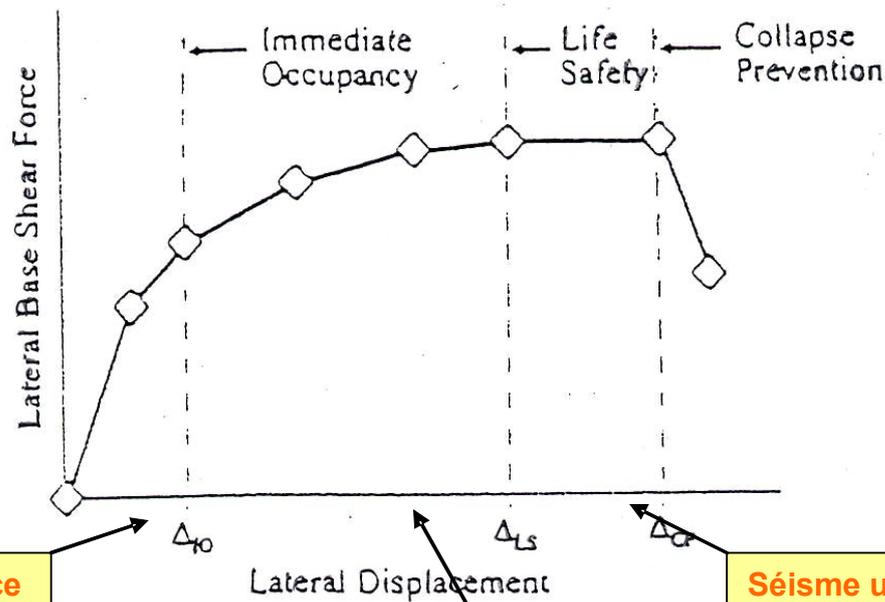
Conception ductile

- Méthodes d'analyse

Analyse des structures irrégulières

- Méthode push-over

(EC 8-2 Annexe H)



Remarque :

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

Séisme de service

Séisme réglementaire de calcul

Séisme ultime

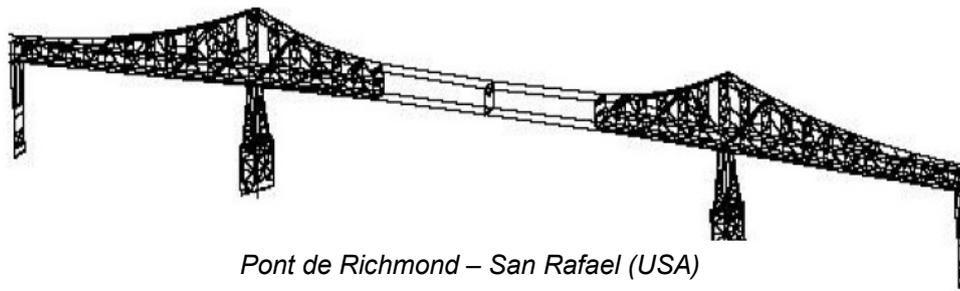
Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception ductile

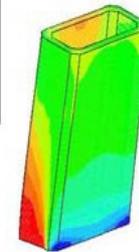
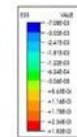
- Méthodes d'analyse

Analyse des structures très irrégulières avec modes supérieurs influents

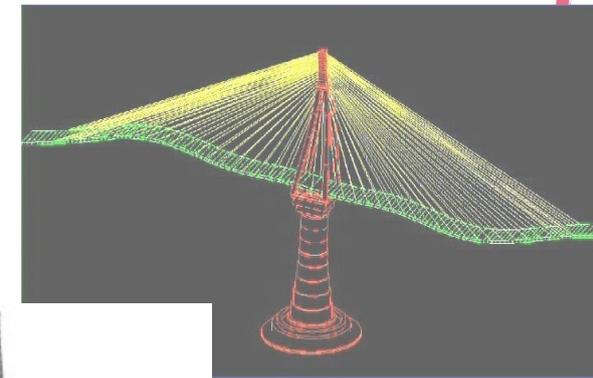
Dans ce cas, une analyse dynamique temporelle non-linéaire complète est nécessaire ...



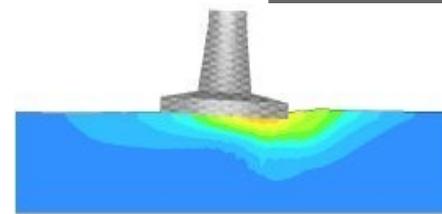
Pont de Richmond – San Rafael (USA)



Exemples de modèles dynamiques non-linéaires sophistiqués



Pont de Rion-Antirion (Grèce)



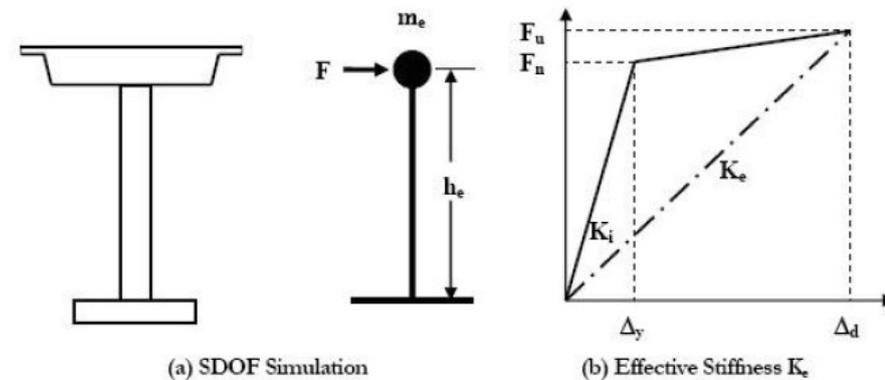
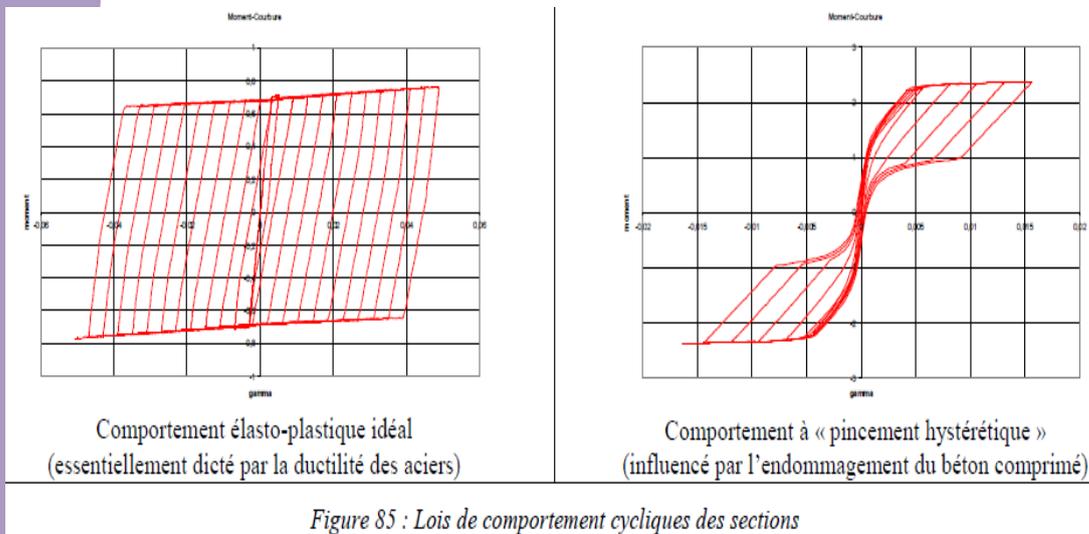
Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception ductile

- Méthodes d'analyse

Analyse des structures très irrégulières avec modes supérieurs influents

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



Méthode simplifiée du "dimensionnement en déplacement"

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



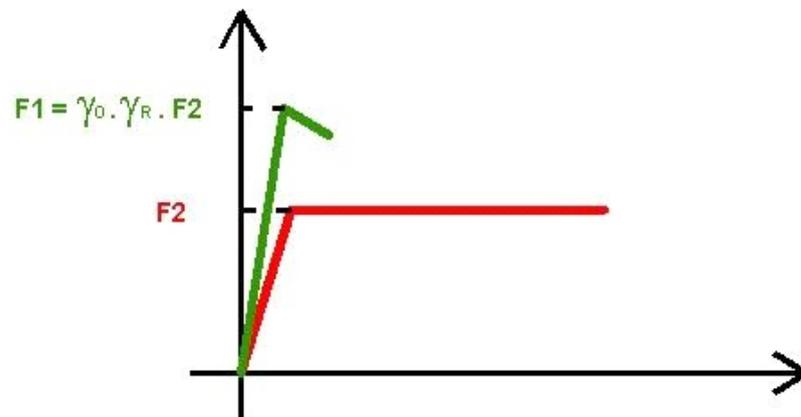
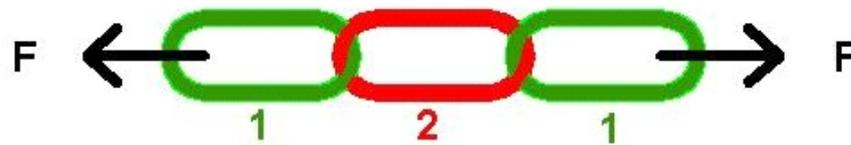
Conception parasismique des ponts (1/2)

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)

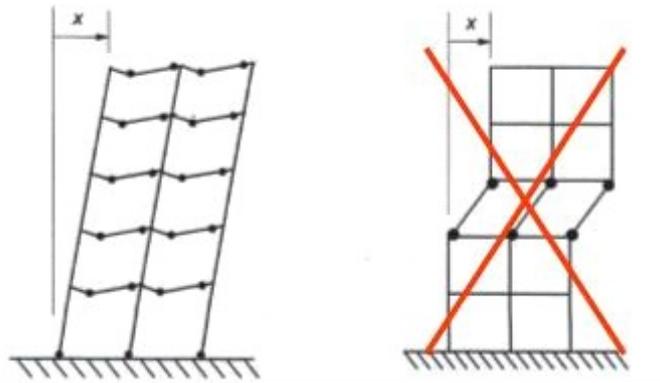
Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception ductile

- Principes de dimensionnement

Localisation des rotules plastiques

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



Cas des bâtiments



Cas des ponts
(EC8-2 § 2.3.2.1)



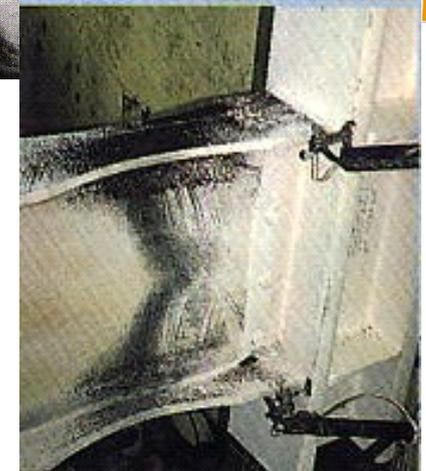
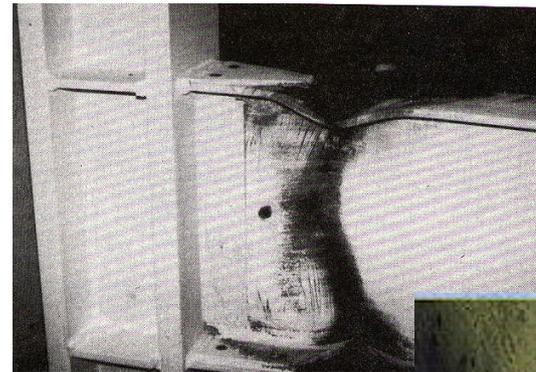
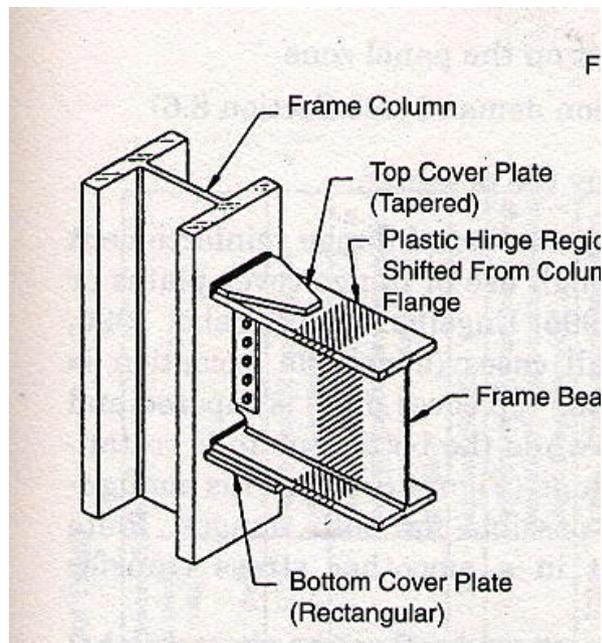
Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception ductile

- Principes de dimensionnement

Localisation des rotules plastiques

- Cas des constructions métalliques



Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception ductile

- Principes de dimensionnement

Règles générales

- **Combinaisons sismiques et coeffs matériaux : *idem ductilité limitée***

- **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

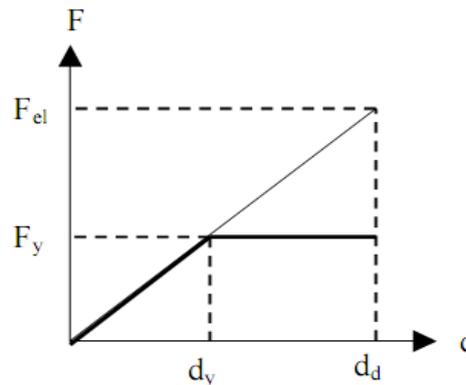
- Principes de dimensionnement

Règles générales

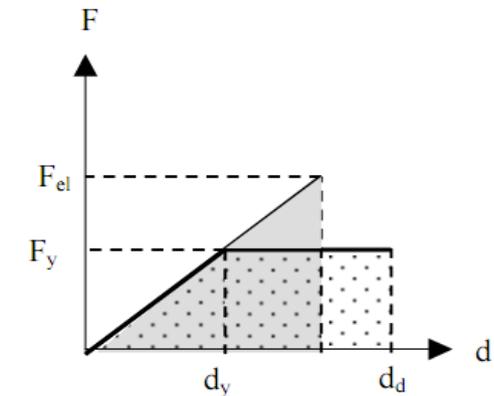
- Déplacements

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)

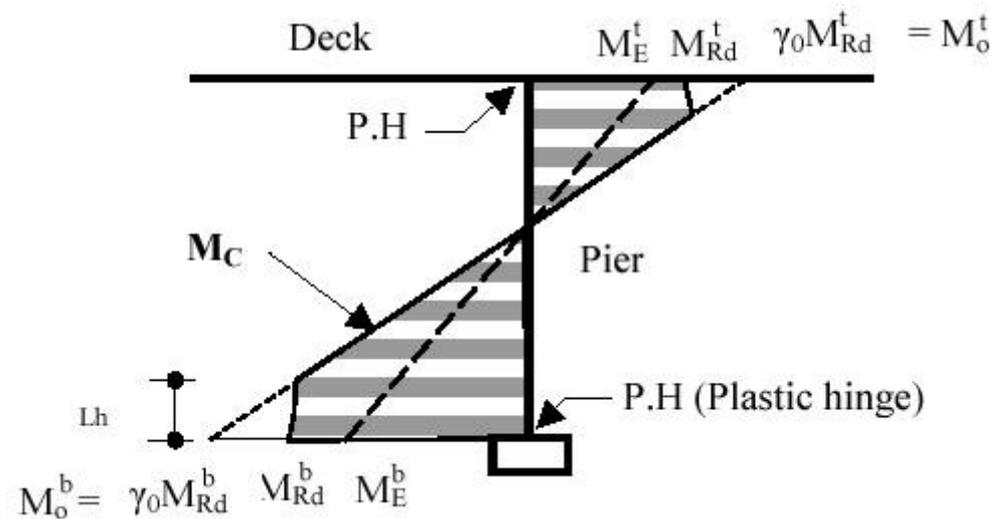
Conception ductile

- Principes de dimensionnement

Justification des sections

- En dehors des zones de rotules plastiques

⇒ Dimensionnement en capacité + EC2



EC8-2 fig. 5.1

Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception ductile

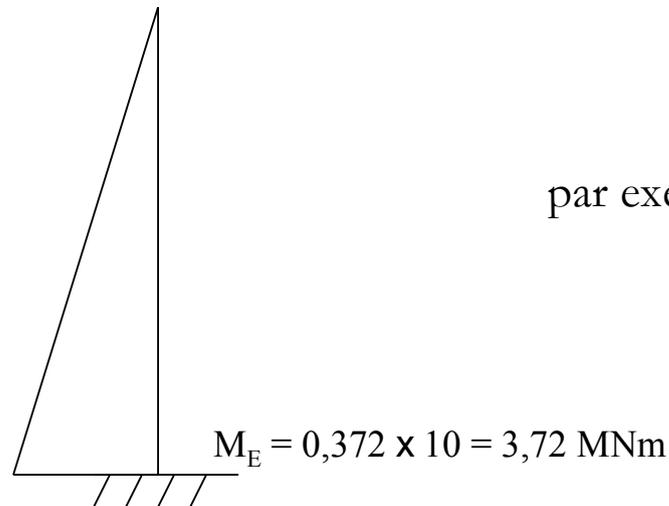
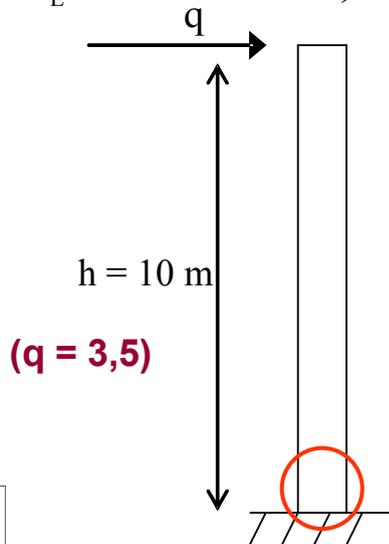
- Principes de dimensionnement

Justification des sections

- En dehors des zones de rotules plastiques

Exemple d'application

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



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)

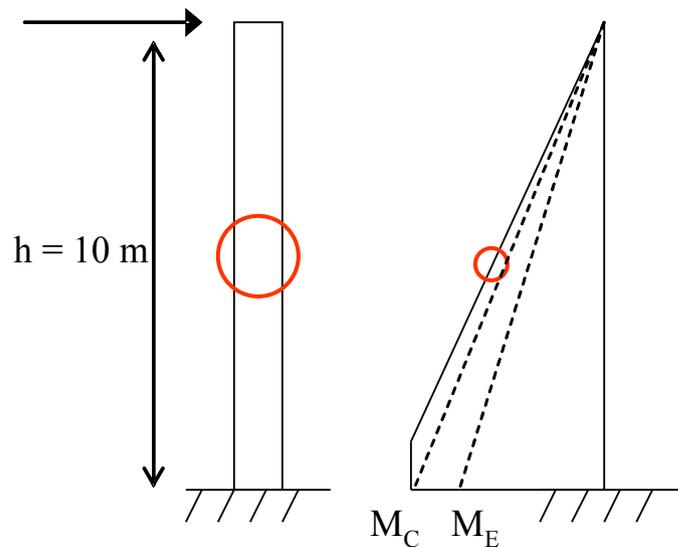
Conception ductile

- 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

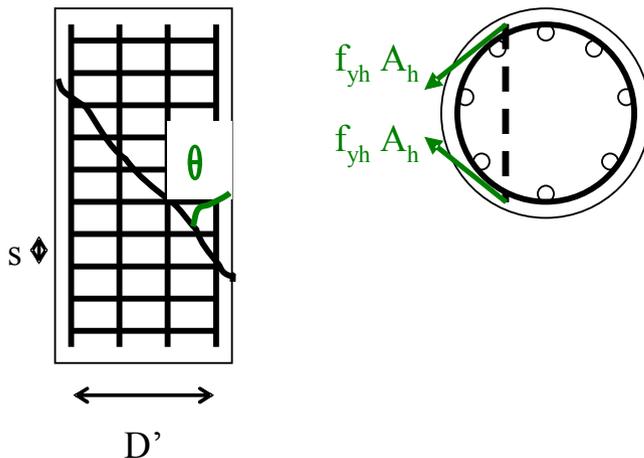
- Principes de dimensionnement

Justification des sections

- En dehors des zones de rotules plastiques

Exemple d'application

Effort tranchant dans la pile : $V_{Rd,s} \geq 0,675 \text{ MN}$



$$\text{avec } V_{Rd,s} = 0,8 \left(\frac{D' \cot \theta}{s} \right) \times 2 f_{yh} A_h$$

cf. EC2 ...

Conception parasismique des ponts (1/2)

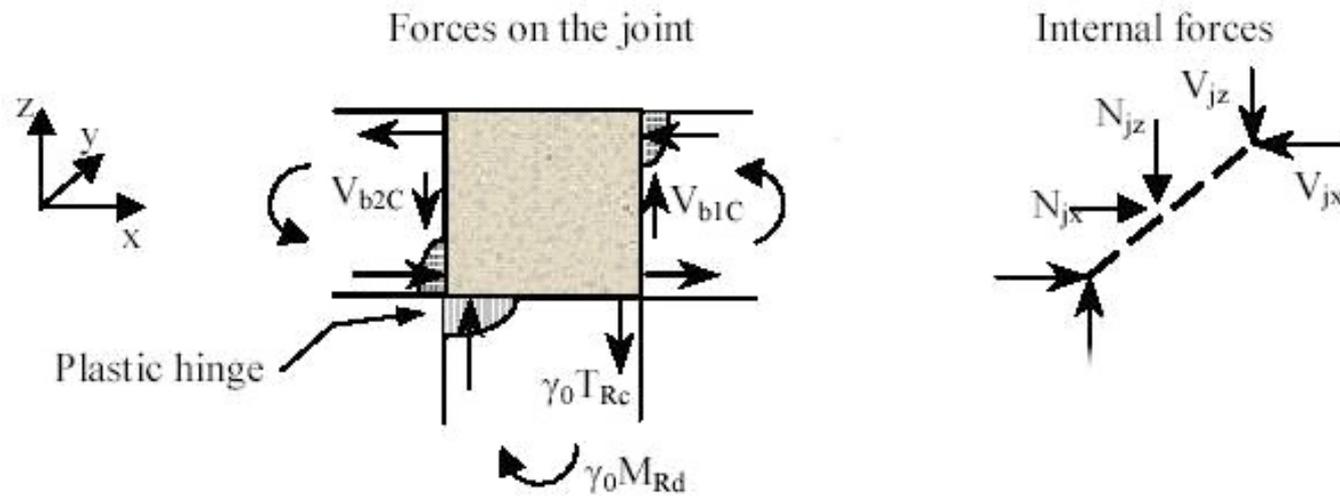
Conception ductile

- Principes de dimensionnement

Justification des sections

- En dehors des zones de rotules plastiques

Cas des zones nodales



EC8-2 fig. 5.2

$$V_{jz} = \gamma_0 T_{Rc} - V_{b1C}$$

Conception parasismique des ponts (1/2)

Conception ductile

- Principes de dimensionnement

Justification des sections

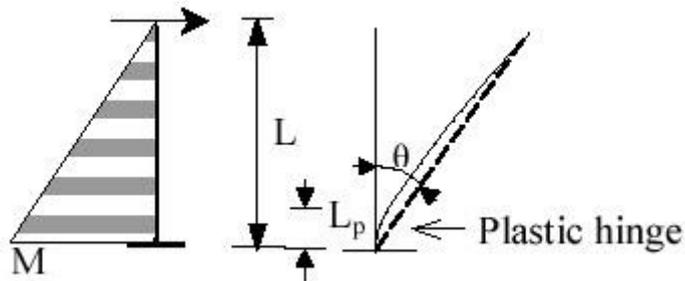
- Dans les zones de rotules plastiques

- 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)

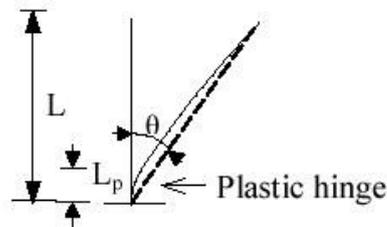
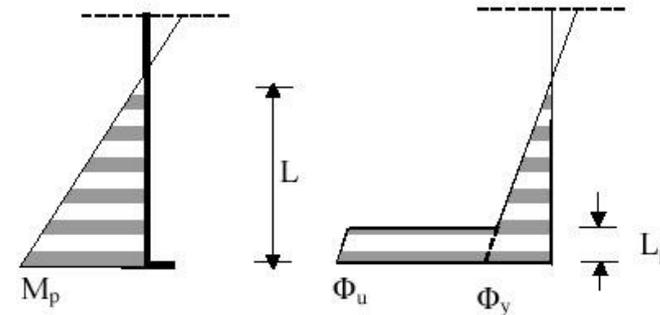
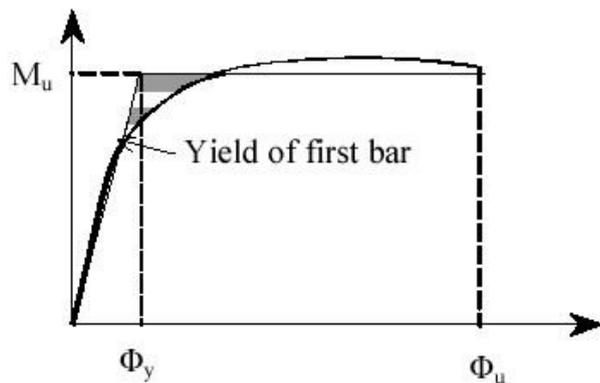
Conception ductile

- Principes de dimensionnement

Justification des sections

- Dans les zones de rotules plastiques

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



$$\theta_u = \theta_y + \theta_{p,u} = \frac{1}{L} (d_y + d_{p,u}) = \frac{1}{L} \left(\frac{\phi_y L^2}{3} + (\phi_u - \phi_y) \cdot L_p \cdot \left(L - \frac{L_p}{2} \right) \right)$$

$$\theta_{p,E} \leq \frac{\theta_{p,u}}{\gamma_{R,p}} \quad (\text{EC8-2 eq. 4.22 et 4.23})$$

Conception parasismique des ponts (1/2)

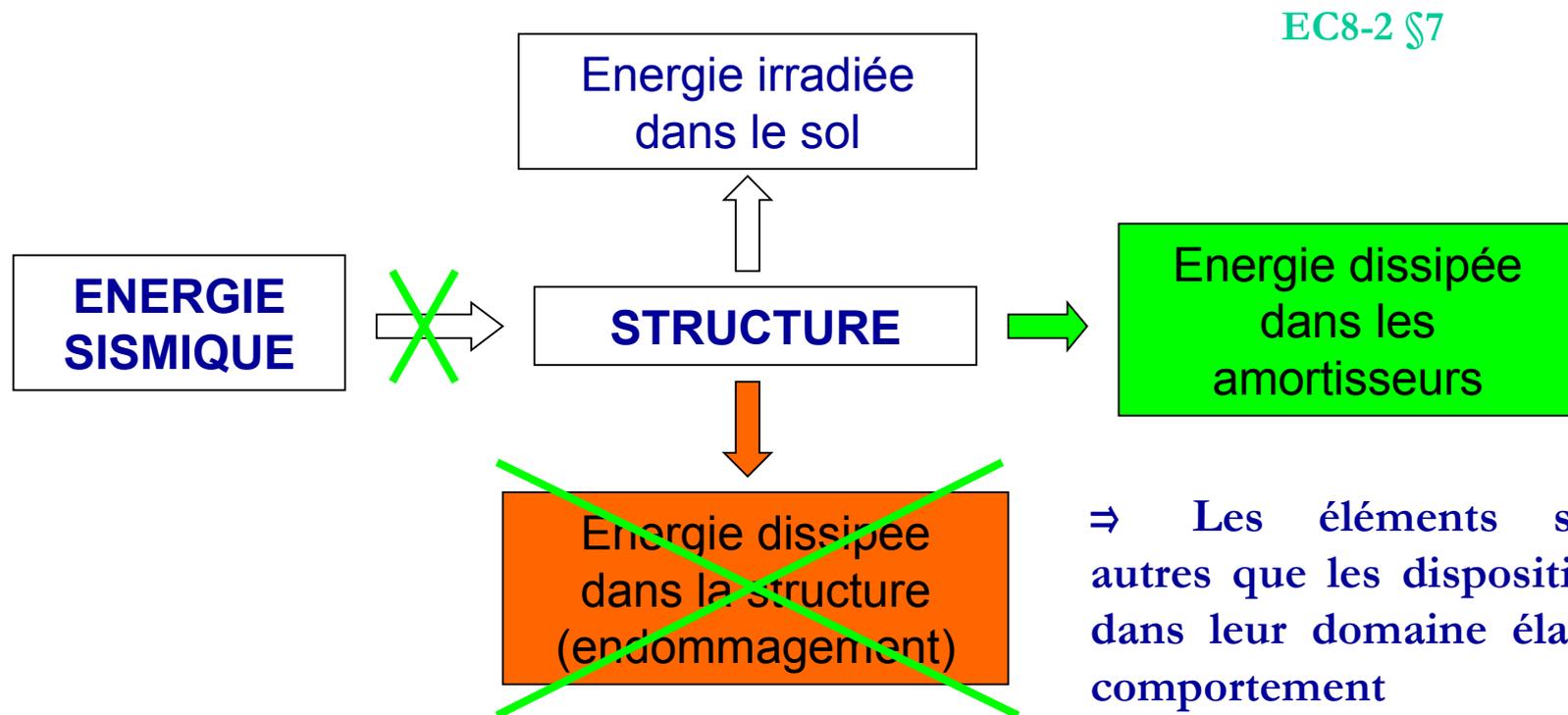
Isolation sismique et amortissement



Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement

- Concept



Conception parasismique des ponts (1/2)

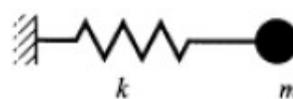
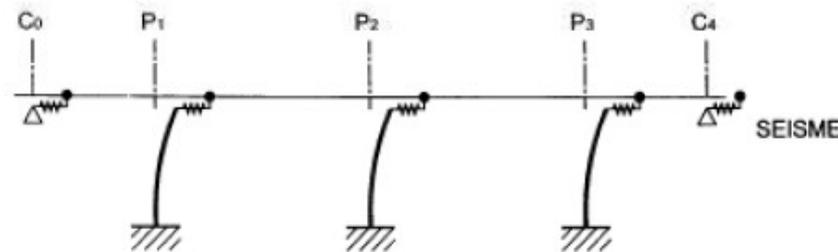
Isolation sismique et amortissement Appareils d'appui élastomère classiques



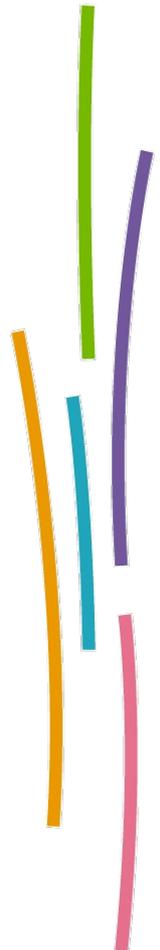
- Concept

- 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)

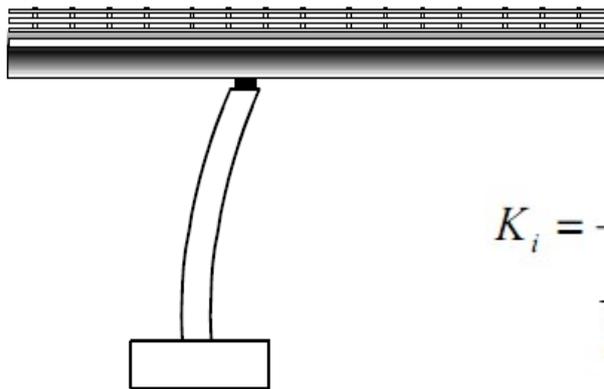
Isolation sismique et amortissement Appareils d'appui élastomère classiques



- Concept

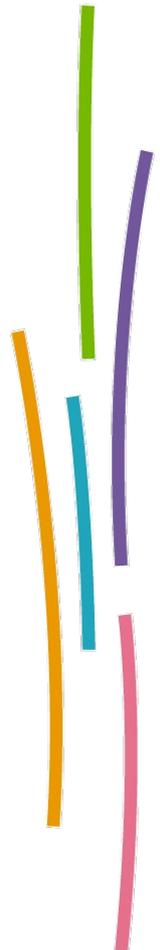
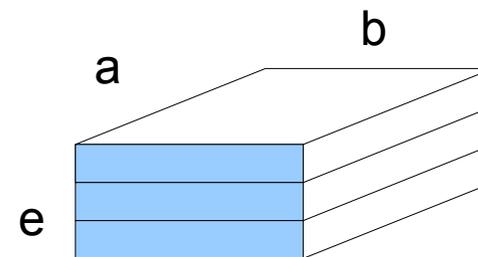
- Connexion souple entre appuis et tablier

➔ 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 : $q = 1$

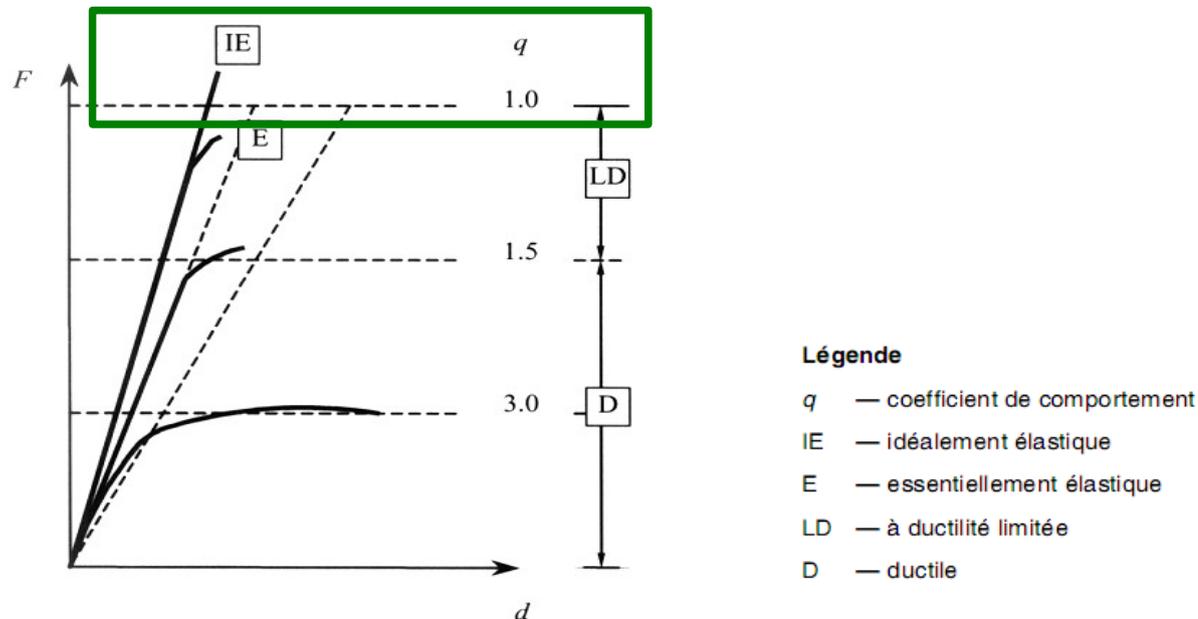


Figure 2.1 — Comportement sismique

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
 - **Séisme longitudinal** : *Méthode du tablier rigide*
 - **Séisme transversal** :
 - Tabliers rigides (larges et courts) : *Méthode du tablier rigide*
 - Tabliers souples et réguliers : *Méthode monomodale de Rayleigh*
 - Tabliers souples et irréguliers : *Analyse multimodale*

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

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

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

- de la période propre fondamentale de l'ouvrage T
- du coefficient d'amortissement critique des matériaux

- acier soudé : 2%
- acier boulonné : 4%
- béton armé : 5%
- béton précontraint : 2%
- élastomère fretté à faible amortissement : 5%

Conception parasismique des ponts (1/2)

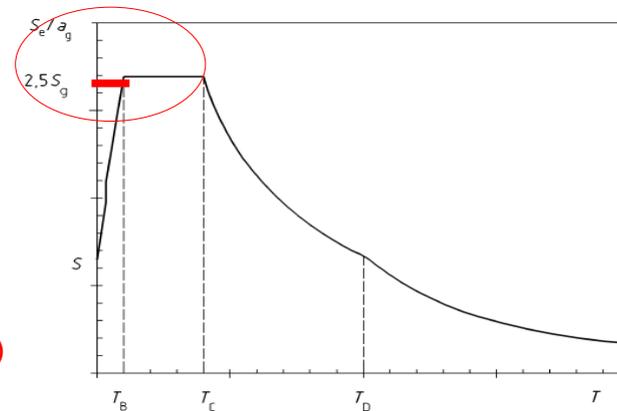
Isolation sismique et amortissement Appareils d'appui élastomère classiques

- 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)



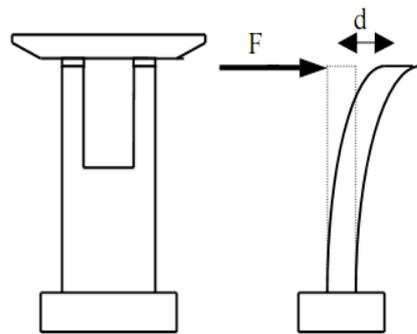
A cumuler avec les modes propres de piles...

Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement Appareils d'appui élastomère classiques

- Méthodes d'analyse

- Mode propre de pile :



Coffrage de l'appui



Console équivalente de caractéristiques constantes

ρ : masse volumique du matériau de l'appui (en kg/m^3)

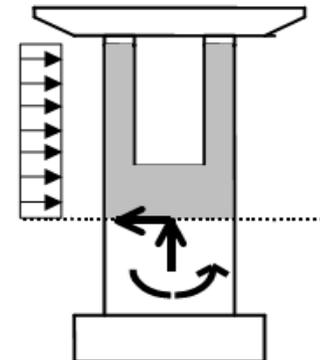
E : Module d'Young du matériau de l'appui (en Pa)

A : section équivalente (en m^2) de l'appui pour retrouver la masse totale de l'appui

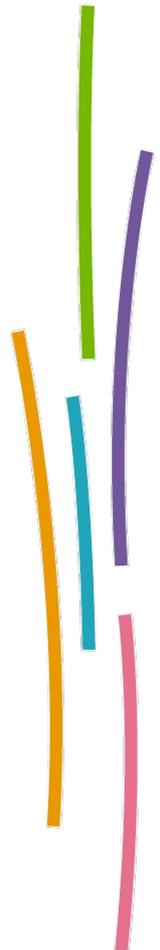
I : inertie (en m^4) à ajuster pour retrouver la même flèche « d » en tête sous l'action d'une charge « F » : $I = FL^3/3Ed$

L : hauteur de la pile

$$T = 1.784 \sqrt{\frac{\rho AL^4}{EI}}$$



$S_e(T)$



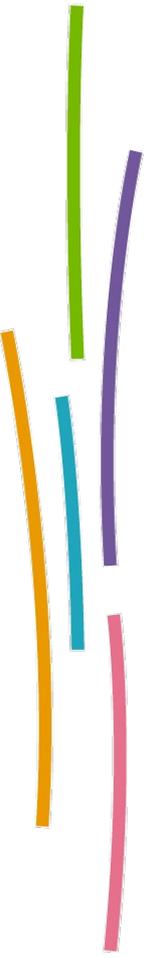
Conception parasismique des ponts (1/2)

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

- Principes de dimensionnement

Règles générales

- **Combinaisons sismiques** : idem ductilité limitée
- **Moments fléchissants** : *Directement à partir du spectre élastique* : $M_{Rd} \geq M_{Ed}$
- **Efforts tranchants** : *Efforts multipliés γ_{Bd}* : $V_{Rd} \geq \gamma_{Bd} \cdot V_{Ed}$
- **Déplacements** : *Directement à partir du spectre élastique* : $d_{Rd} \geq d_{Ed}$



Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement Appareils d'appui élastomère classiques

- Principes de dimensionnement

Dimensionnement des appareils d'appui

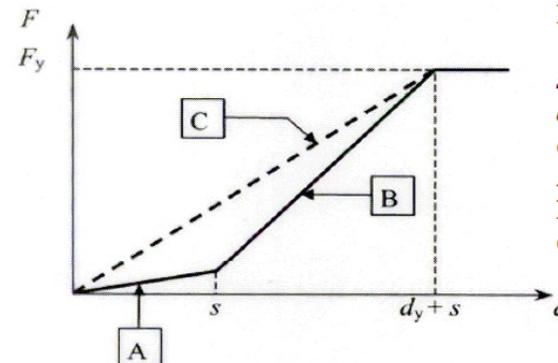
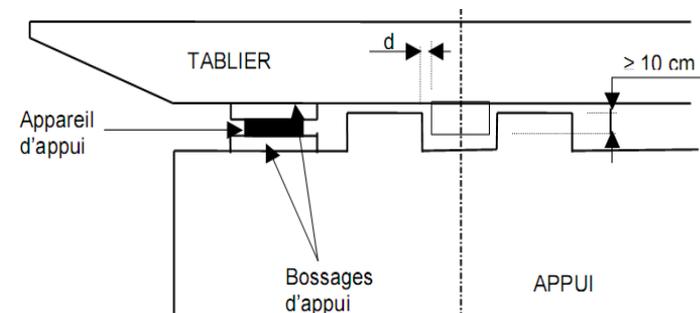
■ Distorsion :

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

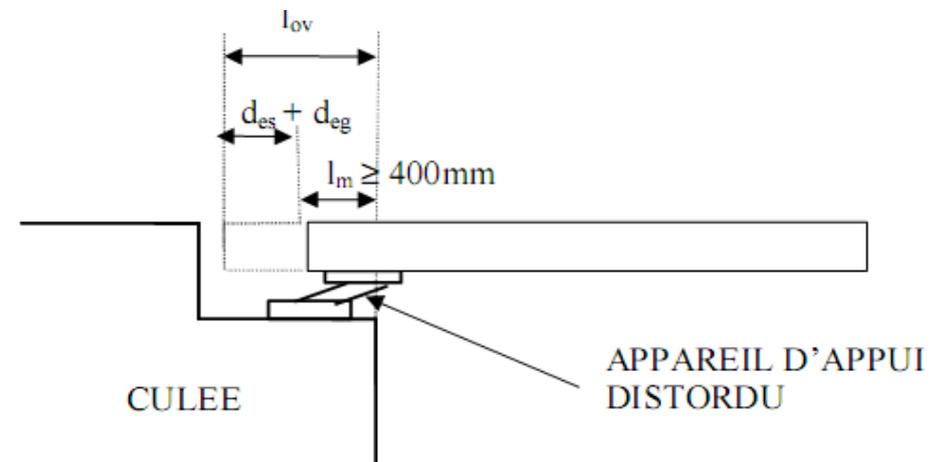
$\gamma_m = 1$

- 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



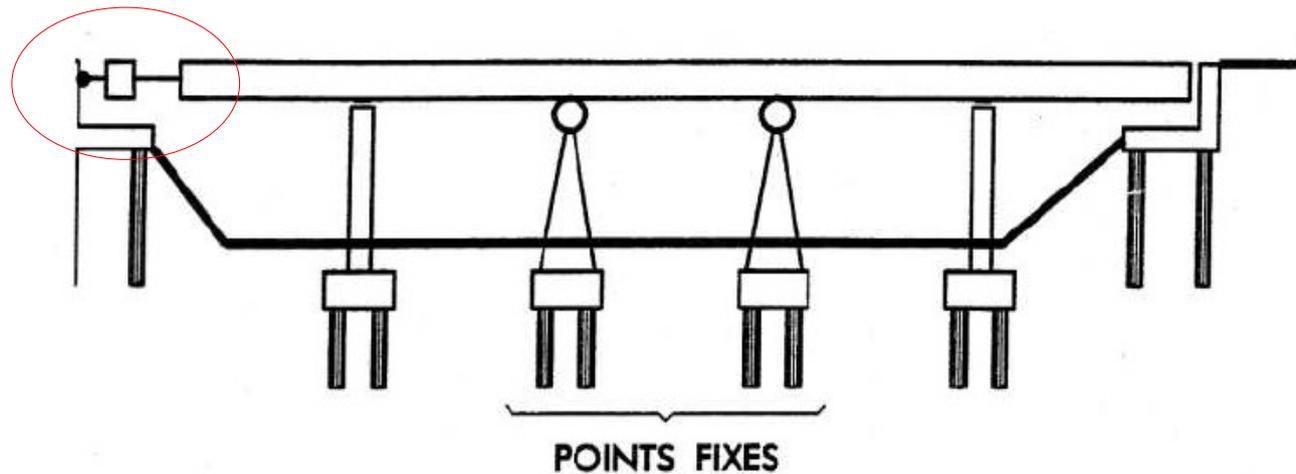
Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement *Dispositifs spéciaux (amortisseurs)*



- Concept

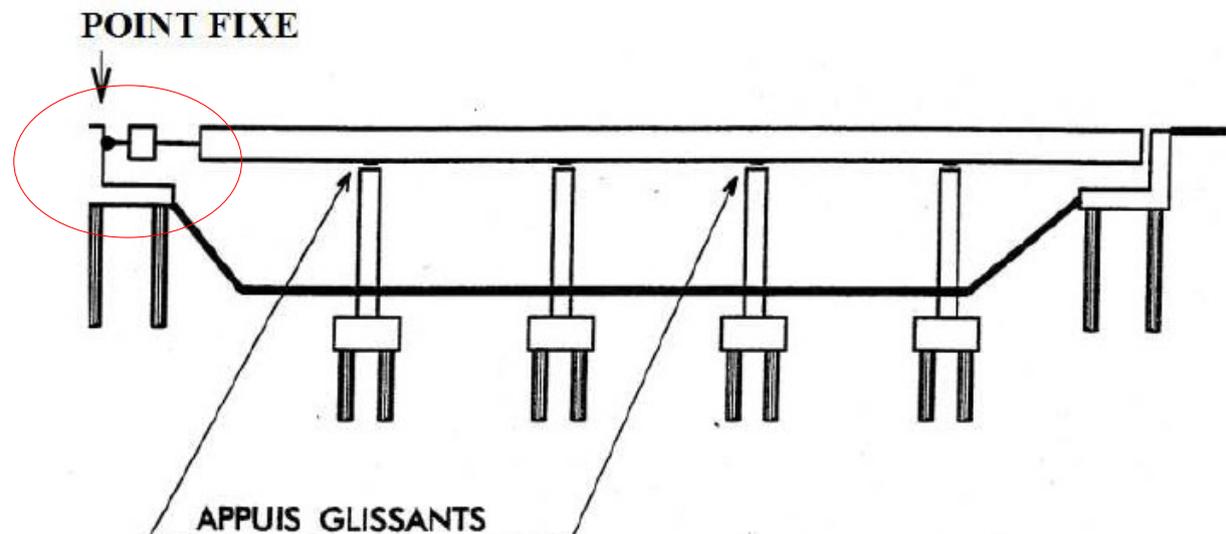
- Vient généralement en complément d'une configuration de type ductilité limitée ou appareils d'appui élastomère classiques :



Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement *Dispositifs spéciaux (amortisseurs)*

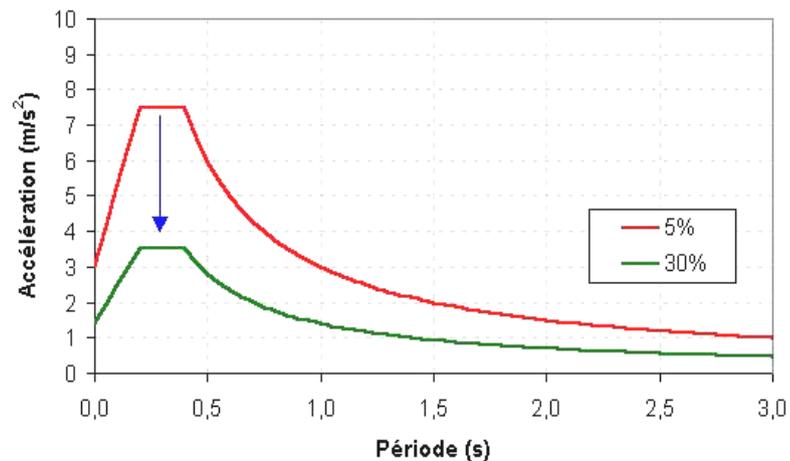
- Concept
 - Peut également être couplé à une isolation parfaite (AA glissants) mais nécessite dans ce cas un système spécifique pour assurer un point fixe en service :
 - Système fusible disposé en parallèle
 - Amortisseur précontraint (à seuil de déclenchement)...



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)



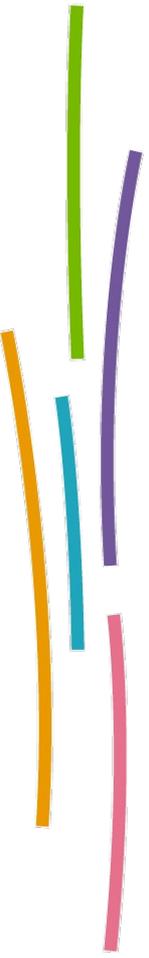
- Aucune incursion *en principe* dans le domaine post-élastique des matériaux des éléments structuraux (piles)

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

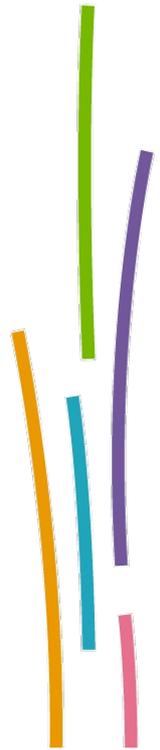
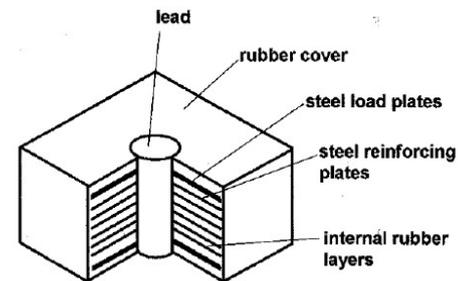
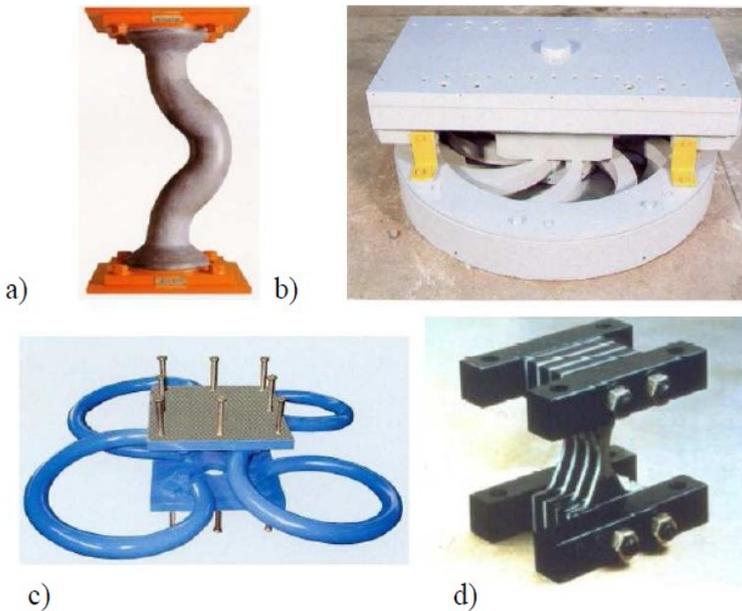


Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement *Dispositifs spéciaux (amortisseurs)*

- Exemples de dispositifs

Dispositifs métalliques élasto-plastiques

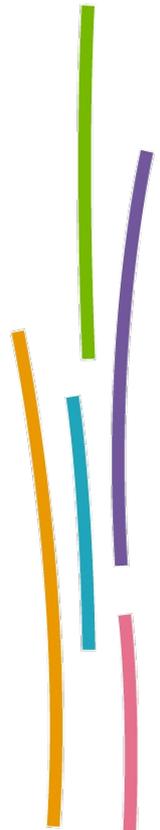
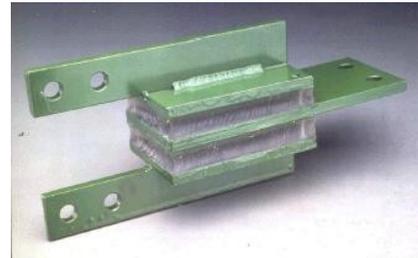


Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement *Dispositifs spéciaux (amortisseurs)*

- Exemples de dispositifs

Dispositifs visqueux

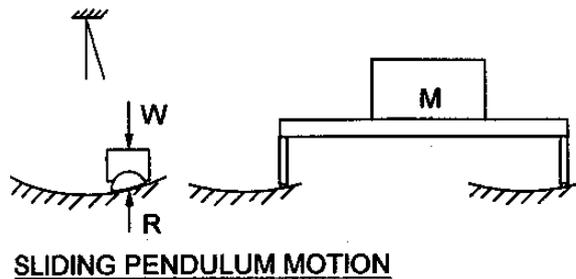
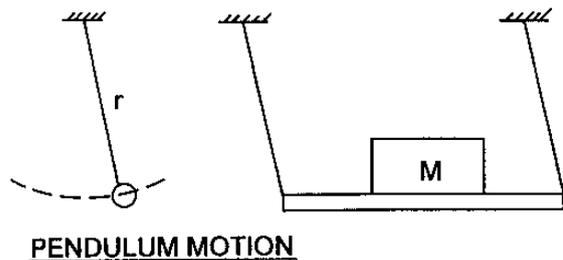


Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement Dispositifs spéciaux (amortisseurs)

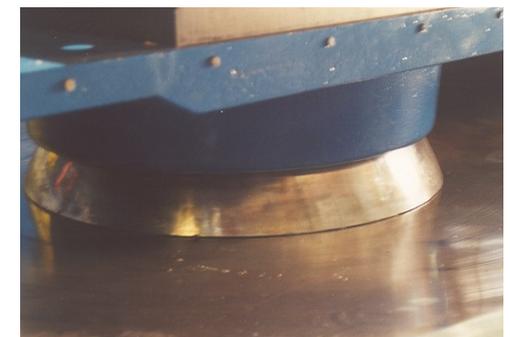
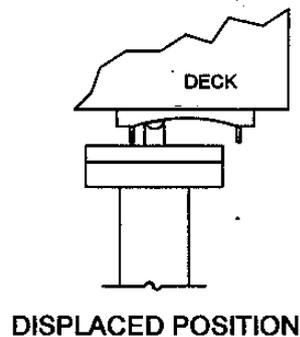
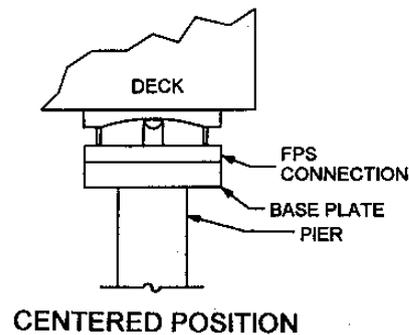
- Exemples de dispositifs

Systemes pendulaires



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

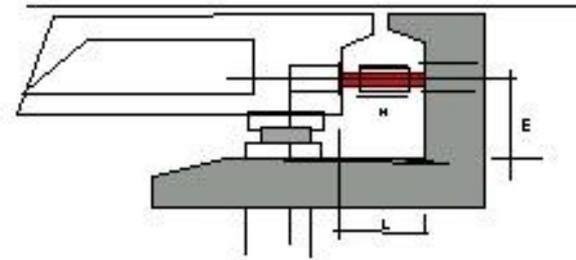
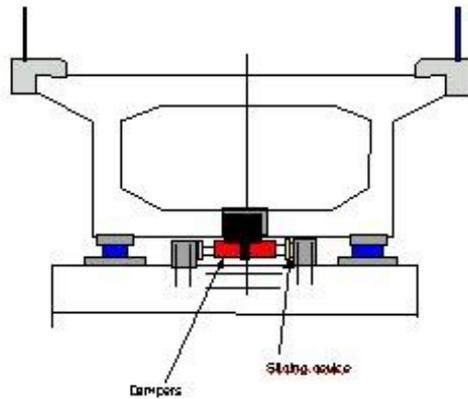
$$\text{STIFFNESS } k = W/r$$



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

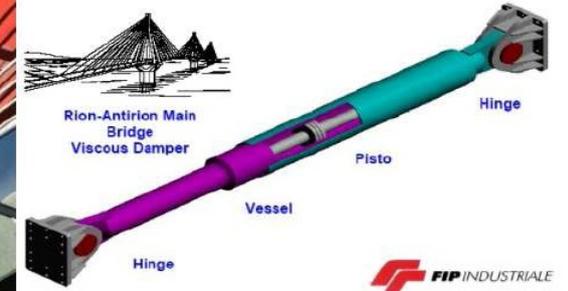
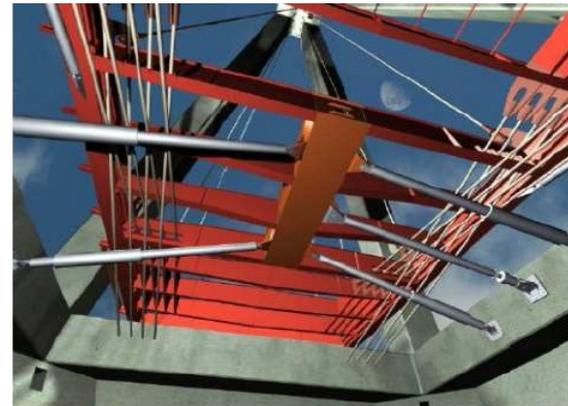
Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement *Dispositifs spéciaux (amortisseurs)*

- Exemples de mise en oeuvre sur des ponts



Pont Vasco de Gama, Portugal



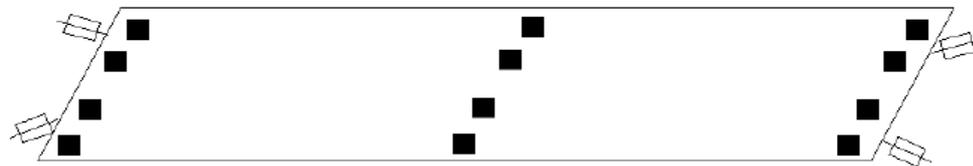
Pont de Rion-Antirion, Grèce



Conception parasismique des ponts (1/2)

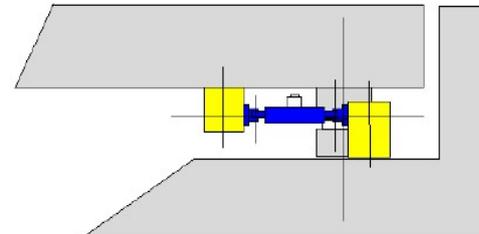
Isolation sismique et amortissement *Dispositifs spéciaux (amortisseurs)*

- Exemples de mise en oeuvre sur des ponts



- Appui élastomère 800 x 800
- ▭ Amortisseur dissipatif

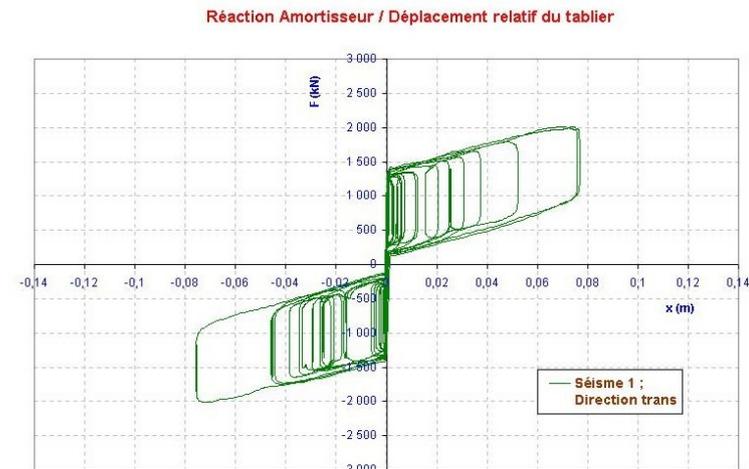
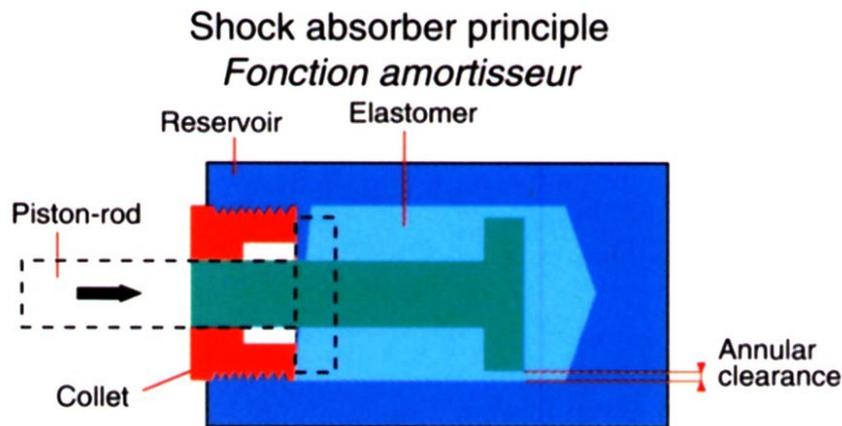
Ouvrages (PS) de l'A51, France



Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement Dispositifs spéciaux (amortisseurs)

- Principes de fonctionnement et lois de comportement



Ressort amortisseur précontraint

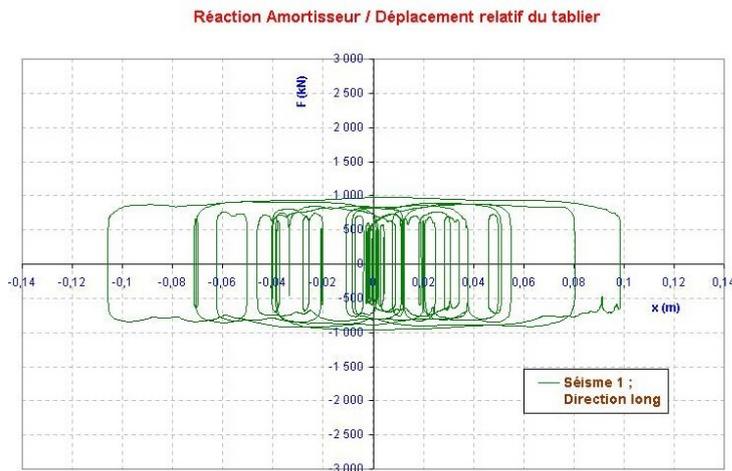
$$F = F_0 + K.X + C.V^\alpha$$

(effet fusible)

Conception parasismique des ponts (1/2)

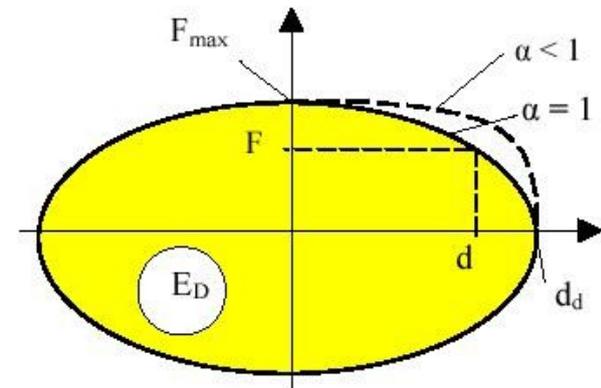
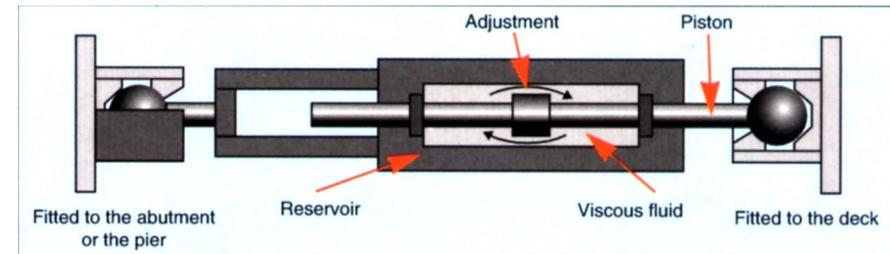
Isolation sismique et amortissement Dispositifs spéciaux (amortisseurs)

- Principes de fonctionnement et lois de comportement



Amortisseur pur

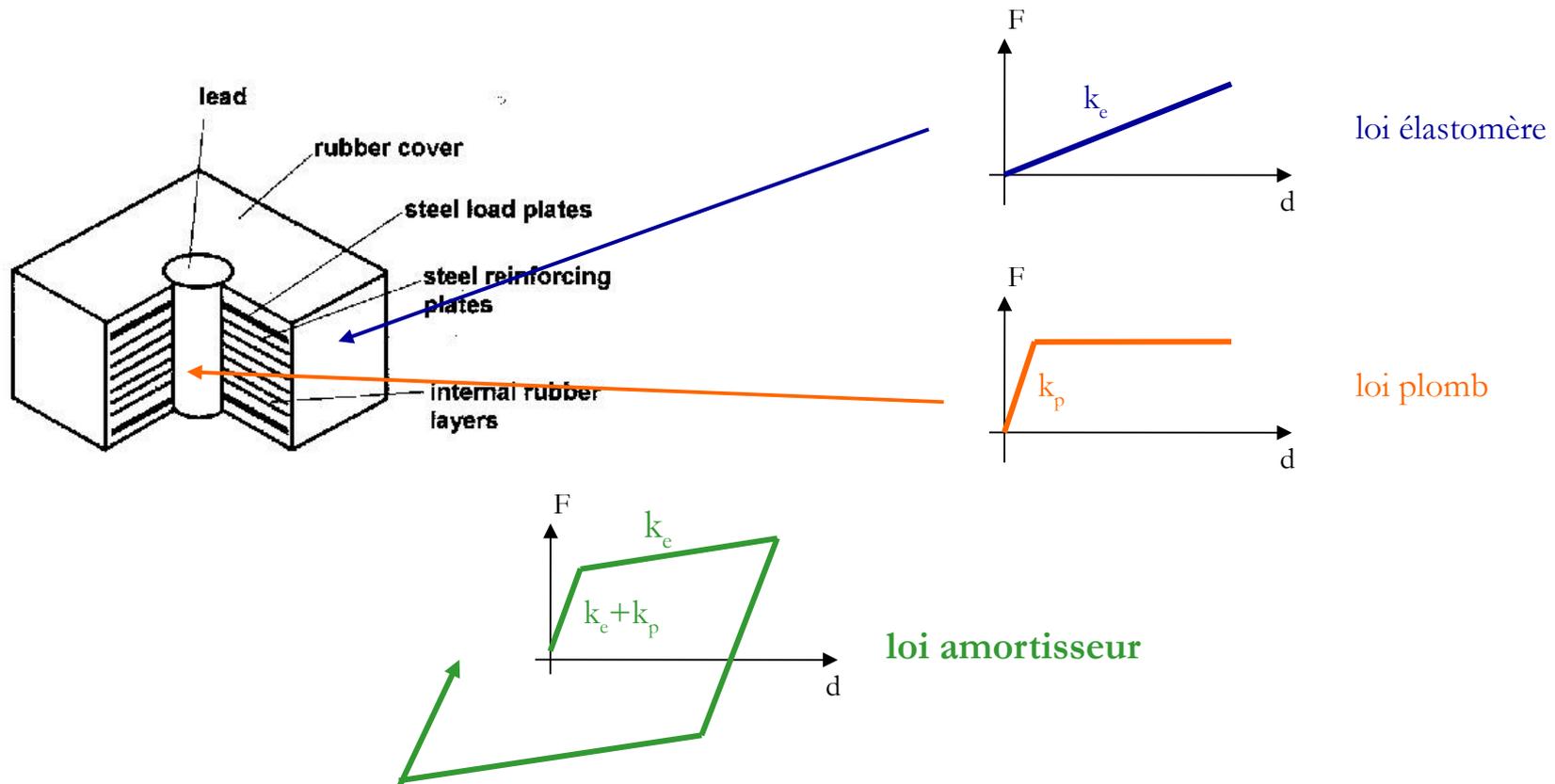
$$F = C.V^\alpha$$



Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement Dispositifs spéciaux (amortisseurs)

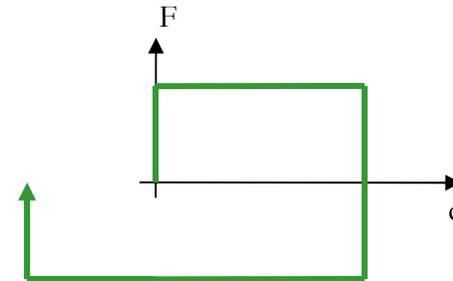
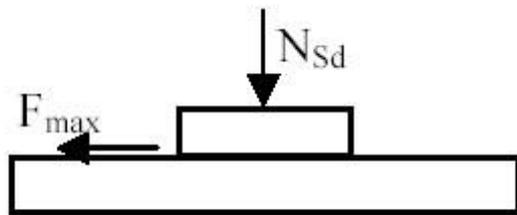
- Principes de fonctionnement et lois de comportement



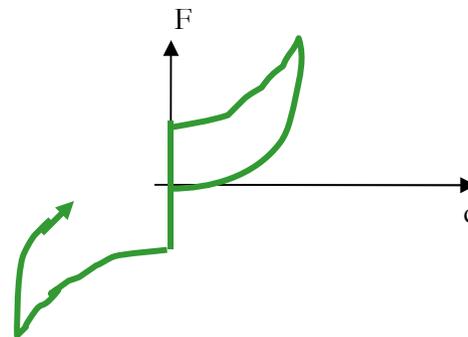
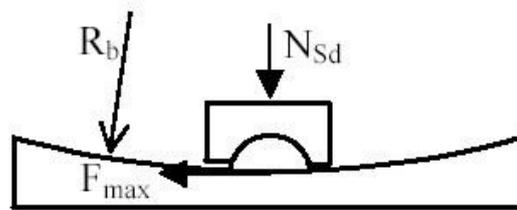
Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement Dispositifs spéciaux (amortisseurs)

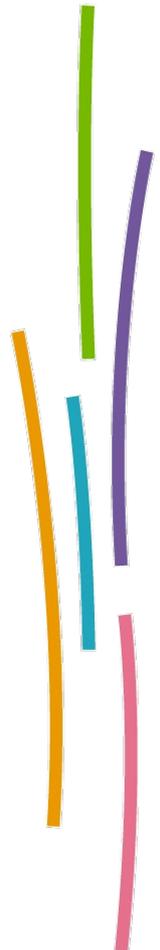
- Principes de fonctionnement et lois de comportement



loi amortisseur



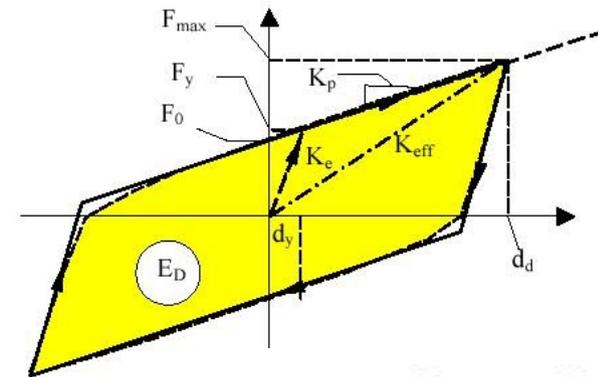
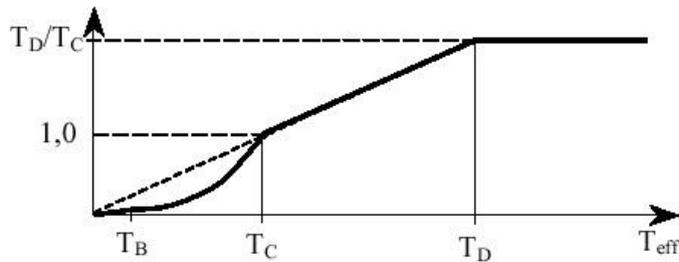
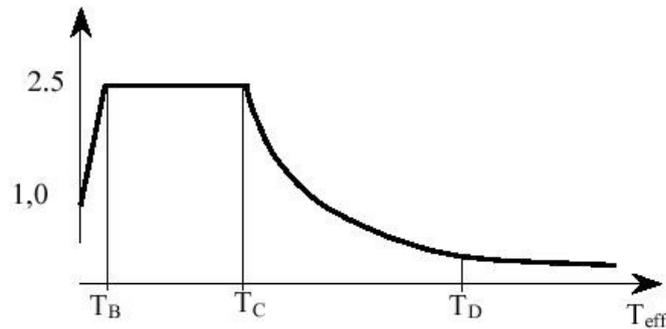
loi amortisseur



Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement Dispositifs spéciaux (amortisseurs)

- Méthodes d'analyse
 - analyse dynamique temporelle non-linéaire le plus souvent
 - analyse simplifiée à partir du spectre élastique et des caractéristiques linéaires équivalentes



$$K_{\text{eff}} = \sum K_{\text{eff},i} \quad \zeta_{\text{eff}} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\sum E_{D,i}}{K_{\text{eff}} d_{dc}^2} \right] \leq 30\%$$

$$T_{\text{eff}} = 2\pi \sqrt{\frac{W_d}{gK_{\text{eff}}}} \quad \eta_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{0,10}{0,05 + \zeta_{\text{eff}}}}$$

⇒ Calcul obligatoirement itératif

Conception parasismique des ponts (1/2)

Isolation sismique et amortissement *Dispositifs spéciaux (amortisseurs)*

- Principes de dimensionnement

Règles générales

- **Combinaisons sismiques et coeffs matériaux** : *idem précédemment*
- **Moments fléchissants** : *Résultent directement de l'analyse* : $M_{Rd} \geq M_{Ed}$
- **Efforts tranchants** : *Efforts multipliés* γ_{Bd} : $V_{Rd} \geq \gamma_{Bd} \cdot V_{Ed}$
- **Déplacements** : *Résultent directement de l'analyse* : $d_{Rd} \geq d_{Ed}$



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



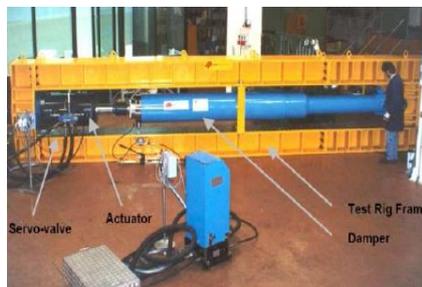
Conception parasismique des ponts (1/2)

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)

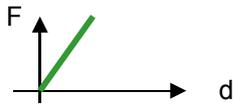
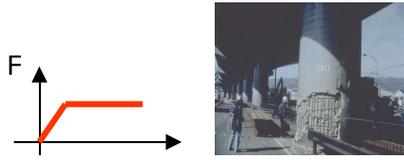
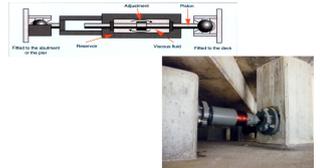
Récapitulatif



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