

# Renforcement parasismique des constructions existantes

Journée technique sous l'égide de la CoTITA,  
organisée par la direction territoriale Méditerranée

## Le renforcement au séisme des ouvrages d'art

**Méthodologie générale du guide Cerema à paraître  
et exemples d'application**

Denis Davi - Direction territoriale Méditerranée du Cerema

**Judi 27 novembre 2014**

**Aix-en-Provence**

# Plan de l'exposé

- Contexte général et obligations réglementaires
- 1<sup>ère</sup> phase : identification rapide des ouvrages les plus sensibles et exposés
- 2<sup>ème</sup> phase : diagnostic détaillé des OA prioritaires et projet de renforcement (le cas échéant)
- Exemples d'application

# Contexte général et obligations réglementaires

PS92 : 1<sup>ères</sup> règles de conception parasismique « modernes » en France

- ➔ **Vulnérabilité potentielle des constructions conçues avant 1995**
- ➔ **Question des ouvrages situés dans des zones considérées « non sismiques » dans l'ancien zonage, et qui le deviennent dans le nouveau**

Quelques documents officiels font référence (de manière assez vague) à cette problématique spécifique :

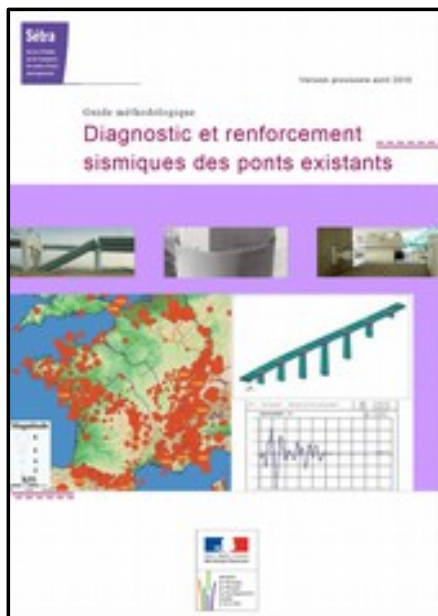
- « La circulaire du 26 avril 2002 relative à la prévention du risque sismique encourage les propriétaires publics ou privés de bâtiments, équipements et installations de classe C ou D à procéder à une démarche de diagnostic et éventuellement de renforcement de leurs ouvrages existants vis-à-vis de l'aléa sismique. »
- Certains PPRS fixent également des règles de principe pour les ponts existants à fort enjeu : prescription de renforcer à une échéance donnée pour un niveau correspondant à un coût de travaux forfaitairement fixé à 10% de la valeur de l'ouvrage...

**mais peu voire jamais appliqué dans les faits...**

# Contexte général et obligations réglementaires

**Aspect non-couvert par la nouvelle législation (nouvel arrêté « ponts »)**  
(mais qui n'interdit pas de s'en préoccuper !!)

➔ Rédaction d'un guide dédié spécifiquement à cette problématique  
(disponible sur demande en version provisoire)



- Problématiques et enjeux :
  - Quels ouvrages traiter en priorité ?
  - Quelles méthodes d'analyses pour les diagnostiquer ?
  - Quel niveau de performance à atteindre par leur renforcement ?
  - A quel coût ?
- Cible préférentiellement le renforcement des ouvrages situés dans des zones de sismicité forte ou modérée et présentant un fort enjeu socio-économique (itinéraires structurants ou desserte d'équipements stratégiques) en vue d'une réduction sensible et économiquement pertinente de leur niveau de vulnérabilité.

# 1<sup>ère</sup> phase : identification rapide des ouvrages les plus sensibles et exposés

- Évaluation sommaire de la vulnérabilité des ouvrages
- Évaluation du niveau d'exposition aux aléas sismiques
- Calcul des indices de risque de coupure de l'itinéraire par combinaison des indices d'aléas et de vulnérabilité
- Évaluation des enjeux

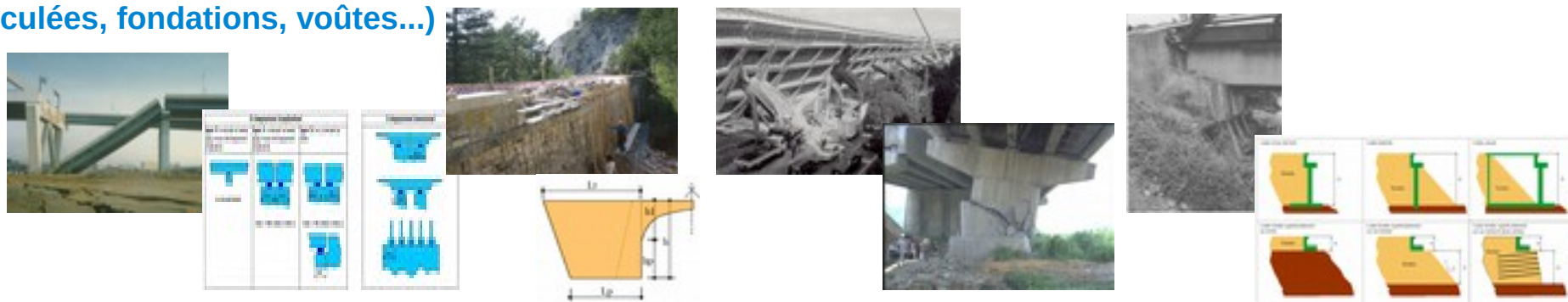
# 1<sup>ère</sup> phase : identification rapide des ouvrages les plus sensibles et exposés

- Évaluation sommaire de la vulnérabilité des ouvrages (méthode Sismoa validée et publiée sur le site internet du Cerema)

- Approche sommaire qualitative basée sur des critères typologiques et géométriques, reposant sur l'analyse des dégâts subis par les ponts lors des séismes passés (*modes de ruine les + fréquents*) :

*Forme et régularité des hauteurs d'appui, masse du tablier, conditions d'appui, nombre de travées, courbure, biais, âge et état de la construction, nature et profondeur des fondations, redondance structurale, présence de protections extérieures contre chutes de blocs (écrans, filets, merlons, fosses...) ...*

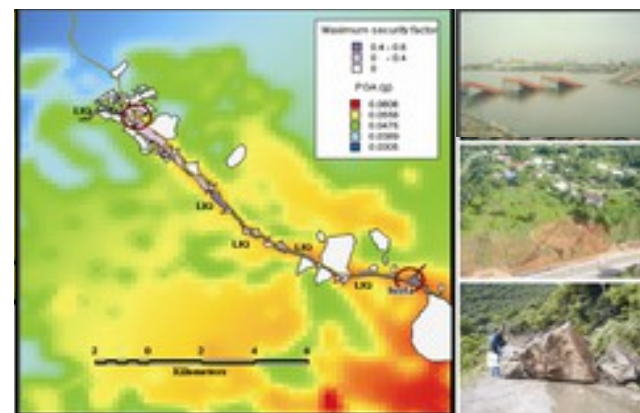
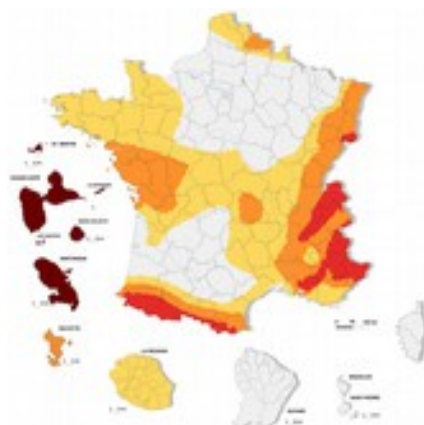
- Présomption de vulnérabilités intrinsèques des différents éléments de la structure (tablier, piles, culées, fondations, voûtes...)





# 1<sup>ère</sup> phase : identification rapide des ouvrages les plus sensibles et exposés

- Évaluation du niveau d'exposition aux aléas sismiques
  - Basé sur le nouveau zonage sismique national
  - Intégrant la prise en compte
    - Des éventuels effets de site géologiques ou topographiques
    - Des éventuels effets induits (liquéfaction des sols et instabilités de versants)



# 1<sup>ère</sup> phase : identification rapide des ouvrages les plus sensibles et exposés

- Calcul des indices de risque de coupure de l'itinéraire par combinaison des indices d'aléas et de vulnérabilité

$$R = f(A;V)$$

0 ≤ R < 0,4	Présomption de risque faible
0,4 ≤ R < 0,6	Présomption de risque moyenne
0,6 ≤ R ≤ 1	Présomption de risque élevée





# 1<sup>ère</sup> phase : identification rapide des ouvrages les plus sensibles et exposés

- Évaluation des enjeux

## Indice d'importance et classification

$$I_1 = I_{\text{int}1} + I_{\text{OA}1} = \dots / 100 \quad (\text{court terme, gestion crise})$$

$$I_2 = I_{\text{int}2} + I_{\text{OA}2} = \dots / 50 \quad (\text{long terme, reprise activité socio-éco.})$$

$$I = I_1 + I_2 = \dots / 150$$

- $(0 < I < 50 :$  Importance socio-économique faible) → **Catégorie ≤ II**
- $(50 < I < 100 :$  Importance socio-économique moyenne) → **Catégorie III**
- $(100 < I < 150 :$  Importance socio-économique élevée) → **Catégorie IV**

Ouvrages devant faire l'objet d'une analyse détaillé :

Ouvrages tels que :  **$R \times I > 50$**

(Exclut de fait les catégories ≤ II)

I <sub>int</sub> (court terme)	<b>Victimes directes</b>				I <sub>OA</sub> *	
	Trafic sur l'ouvrage (en véh)	<1000 - 1	10k - 10k - 2	>10 000 - 3		
	Surface de tablier (m <sup>2</sup> )	< 200 - 1	200 - 4000 - 2	> 4000 - 3		
	Frq embouteillage sur ouvrage	nulle - 0	moyenne - 1,5	déjà - 3		
	Type de route	RD, 3 <sup>es</sup> 5 <sup>es</sup> - 1	BN, TER - 2	Autoute, TOV - 4		
	Traffic sous l'ouvrage (en véh)	<1000 - 1	10k - 10k - 2	>10 000 - 4		
	Frq embouteillages sous ouvrage	nulle - 0	2	déjà - 4		
	Réseaux vitaux franchis		oui - 2	non - 0		
	<b>Organisation des secours</b>					I <sub>OA</sub> *
	Franchissement d'un itinéraire vital au sens des PIS		oui - 4	non - 0		
Desserte immédiate de centre vital (caserne pompier, hôpital base militaire, préfecture...)				oui - 4	non - 0	
<b>Possibilités de rétablissement à court terme pour véhicules de secours</b>				I <sub>OA</sub> *		
Réparable (pont courant à typologie peu vulnérable)		oui - 2	non - 3			
Possib. de pont de secours (friche - 60 m)		oui - 3	non - 3			
Possib. de diversion locale (échangeur, noué urbain)		oui - 3	non - 3			
$I_{\text{int}} = \dots$ $(I_{\text{int}} = I_{\text{int}1} + I_{\text{int}2})$						
I <sub>OA</sub> (long terme)	<b>Rôle socio-économique voie franchie</b>				I <sub>OA</sub> *	
	Type voie	VC - 0	RD - 1	BN, 3 <sup>es</sup> , TER - 2		Autoute, TOV - 3
	Nb voies	1 voie - 0	2 voies - 0,5	3 ou 4 voies - 1		> 4 voies - 2
	Traffic (en véh)	<1000 - 0	10k - 0,5	>10 000 - 1		
	Traffic PI	faible - 0	normal - 0,5	atyp - 1		
	Rôle de desserte	village - 0	aggl. pôle d'act - 0,5	regional - 1		national - 2
	Réseaux franchis		oui - 1	non - 0		
	<b>Possibilités de reconstruction de l'ouvrage</b>					I <sub>OA</sub> *
	Coût de reconstruction		< 6 mois - 1	6m - 24 mois - 2		
	<b>Valeur intrinsèque de l'ouvrage</b>					I <sub>OA</sub> *
Coût		< 1 M€ - 0,5	1 - 15 M€ - 1	15 - 60 M€ - 2	> 60 - 4	
Valeur patrimoniale historique (ouvrage classé)				oui - 2	non - 0	
$I_{\text{OA}} = \dots$ $(I_{\text{OA}} = I_{\text{OA}1} + I_{\text{OA}2})$						

## Matrices d'importance

- échelles OA/itinéraire ;
- court terme/long terme

## 2<sup>ème</sup> phase : diagnostic détaillé des OA prioritaires et projet de renforcement (le cas échéant)

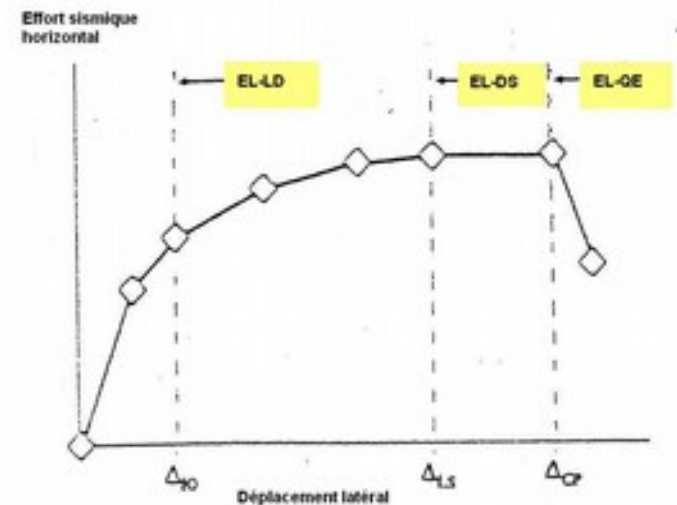
- Études de diagnostic
- Études de renforcement
- Problématique particulière des élargissements / remplacements de tabliers

## 2<sup>ème</sup> phase : diagnostic détaillé des OA prioritaires et projet de renforcement (le cas échéant)

- Études de diagnostic
  - États-limites pour le diagnostic sismique

Basés sur les spécifications de l'Eurocode 8-3 pour « l'évaluation et le renforcement sismique des bâtiments existants »

- État-limite de « Limitation des Dommages » (EL-LD)
- **État-limite de « Dommages Significatifs » (EL-DS)**
  - *Dommages plus ou moins étendus*
  - *Usage limité aux secours*
  - *Capacité à supporter des répliques modérées*
  - *Déformations résiduelles et réparations nécessaires*
- État-limite de « Quasi-Effondrement » (EL-QE)



## 2<sup>ème</sup> phase : diagnostic détaillé des OA prioritaires et projet de renforcement (le cas échéant)

- Études de diagnostic
  - Niveaux d'accélération de référence

Basés sur le nouveau zonage sismique national

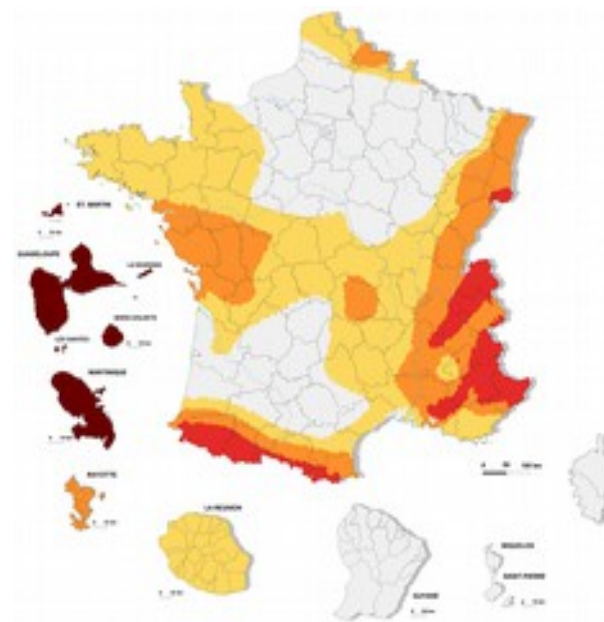
### ▪ Ouvrages de catégorie III

- $a_{ref\_DS} = 1,2 a_{gr}$

### ▪ Ouvrages de catégorie IV

- $a_{ref\_DS} = 1,4 a_{gr}$

- $a_{ref\_LD} = 0,4 \times 1,4 a_{gr}$  (le cas échéant)



Indice de performance ou « de conformité » :  $\alpha_{conf-EL} = \frac{a_{max adm-EL}}{a_{ref-EL}}$

## 2<sup>ème</sup> phase : diagnostic détaillé des OA prioritaires et projet de renforcement (le cas échéant)

- Méthodes de diagnostic
  - Quelques recommandations générales

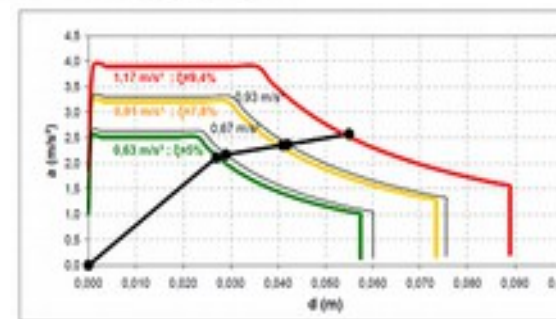
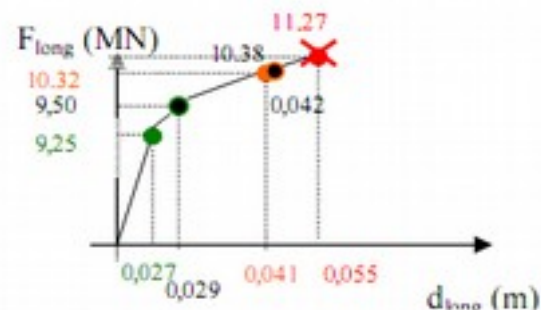
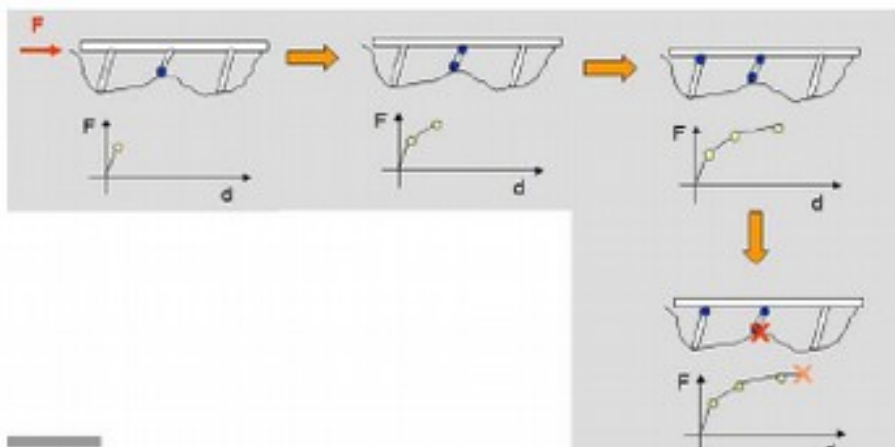
### Les études et modèles de diagnostic sismique doivent :

- **Caractériser correctement les aléas sismiques au droit de l'ouvrage**  
*Sismicité locale, amplifications liées aux effets de site, effets induits...*
- **Être cohérents avec le niveau de connaissance de l'ouvrage et les données disponibles**  
*Plans, notes de calculs, investigations in-situ...*
- **Être adaptés à la typologie de l'ouvrage et « points faibles sismiques » associés**
- **Intégrer les éventuelles défaillances de dispositions constructives**
- **Évaluer au plus juste le niveau de résistance réel de la structure et les conséquences de telle ou telle défaillance**  
*Abaissement de certains coefficients de sécurité, prise en compte des possibles redistributions d'efforts internes...*



# 2<sup>ème</sup> phase : diagnostic détaillé des OA prioritaires et projet de renforcement (le cas échéant)

- Études de diagnostic
  - Approche privilégiée

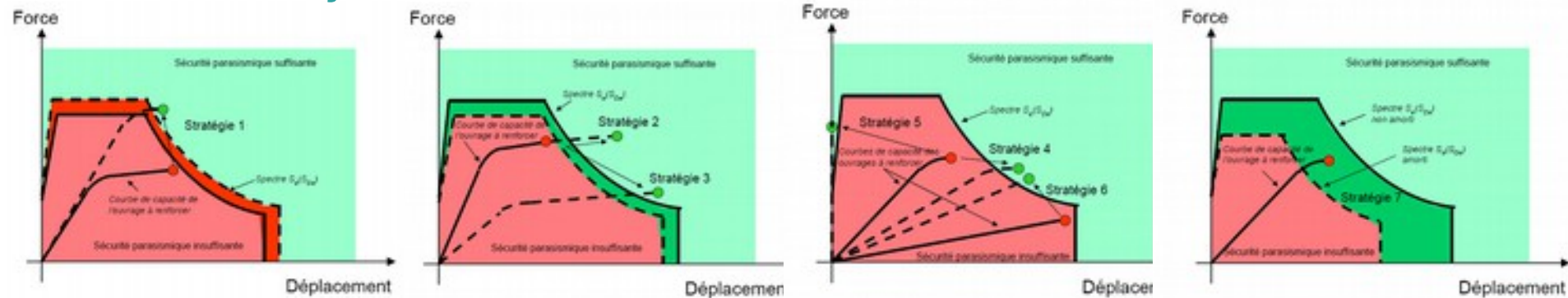


a) Intersection de la courbe de capacité par les spectres de réponse A(d)

**Méthodes incrémentales « en poussée progressive » ou « push-over »**

# 2<sup>ème</sup> phase : diagnostic détaillé des OA prioritaires et projet de renforcement (le cas échéant)

- Études de renforcement
  - Stratégies et techniques à adapter aux typologies et contexte français de sismicité « modérée »



1 : Augmentation résistance (**attention**)

2 : Augmentation ductilité - chemisage

3 : Augmentation ductilité - suppression élé. fragile

4 : Assouplissement - modif. AA

5 : Rigidification (**déconseillé**)

6 : Rigidification struct. souples – ponts suspendus

7 : Augmentation amortissement (disp. spéciaux)

## 2<sup>ème</sup> phase : diagnostic détaillé des OA prioritaires et projet de renforcement (le cas échéant)

- Études de renforcement
  - Stratégies et techniques à adapter aux typologies et contexte français de sismicité « modérée »

### Du plus simple au plus complexe et coûteux...

- **Remplacement des appareils d'appui**  
*Assouplissement global, harmonisation des contributions des appuis*
- **Ajouts de butées parasismiques et attelages de travées**  
*Contre les chutes de tabliers...*
- **Installation de dispositifs amortisseurs**  
*Réduction efficace et simultanée des efforts et des déplacements*
- **Renforts de piles (ductilité et éventuellement résistance)**  
*Fibres composites, chemisage béton...*
- **Renforts des fondations**  
*Traitement de sol, élargissements de semelles, ajouts de pieux...*

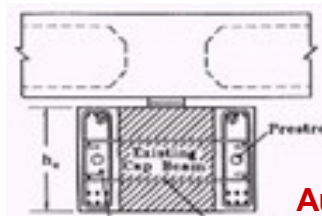


# 2<sup>ème</sup> phase : diagnostic détaillé des OA prioritaires et projet de renforcement (le cas échéant)

- Études de renforcement
  - Stratégies et techniques à adapter aux typologies et contexte français de sismicité « modérée »



**Attelage des travées**



**Augmentation des repos d'appui**

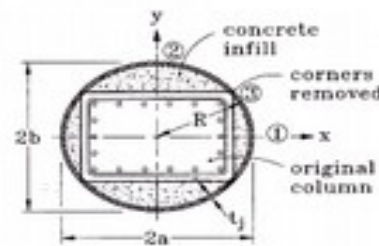
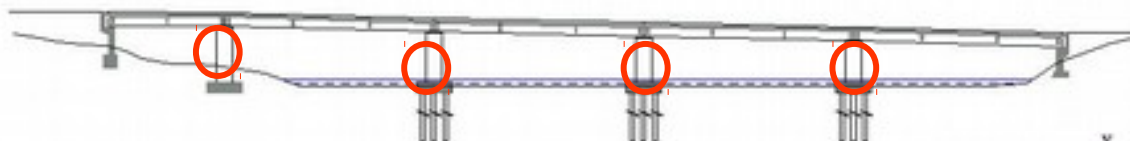


**Installation d'amortisseurs**



# 2<sup>ème</sup> phase : diagnostic détaillé des OA prioritaires et projet de renforcement (le cas échéant)

- Études de renforcement
  - Stratégies et techniques à adapter aux typologies et contexte français de sismicité « modérée »



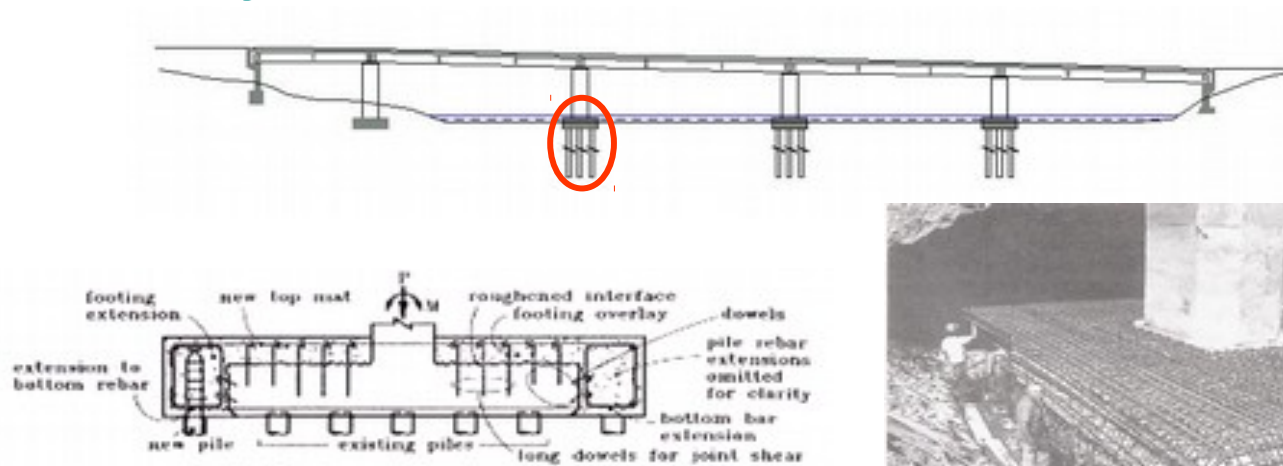
**Chemisage des piles**





## 2<sup>ème</sup> phase : diagnostic détaillé des OA prioritaires et projet de renforcement (le cas échéant)

- Études de renforcement
  - Stratégies et techniques à adapter aux typologies et contexte français de sismicité « modérée »



**Renforcement des fondations**



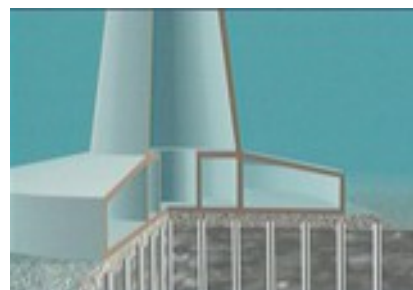
# 2<sup>ème</sup> phase : diagnostic détaillé des OA prioritaires et projet de renforcement (le cas échéant)

- Études de renforcement
  - Stratégies et techniques à adapter aux typologies et contexte français de sismicité « modérée »

## Vis-à-vis des effets induits

### ▪ Liquéfaction

- Compactages
- Colonnes ballastées
- Injections/traitements de sol



### ▪ Chutes de blocs

- Filets
- Clouages
- Purges
- Merlon / Fosses
- Ecrans

### ▪ Glissements de terrain

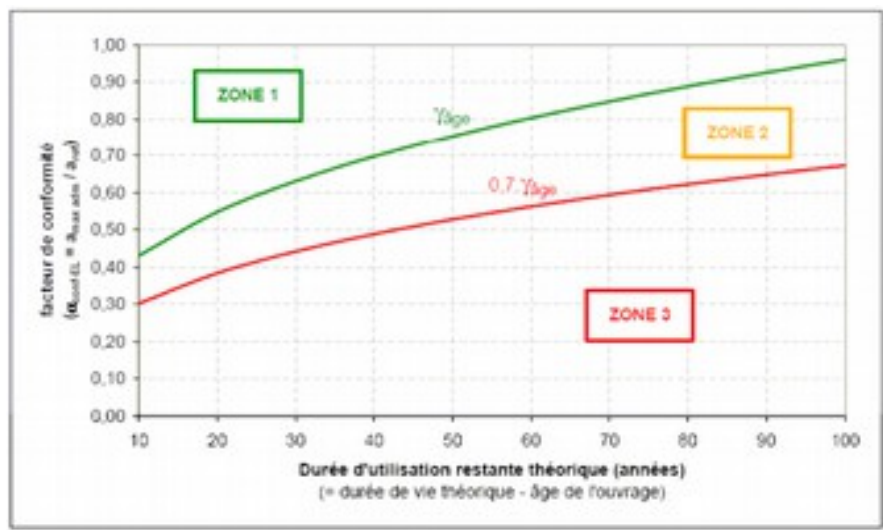
- Clouages
- Purges



## 2<sup>ème</sup> phase : diagnostic détaillé des OA prioritaires et projet de renforcement (le cas échéant)

- Études de renforcement
  - Définition du niveau de renforcement optimal ou performance visée

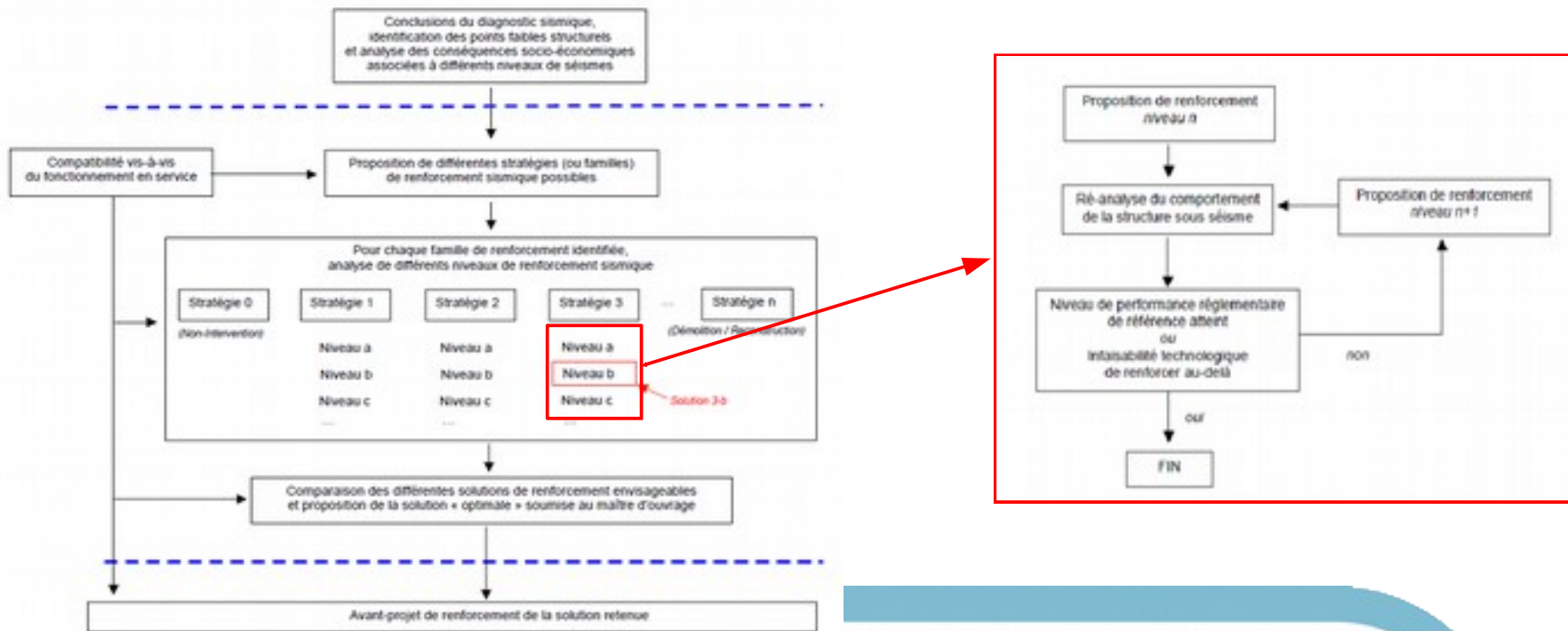
Inspirée des approches Suisse (SIA 2018) et américaine (ATC 40)



- Zone 1 : niveau de performance acceptable  
=> aucun renforcement préconisé
- Zone 3 : niveau de performance insuffisant  
=> renforcement nécessaire ou déclassement de l'ouvrage
- Zone 2 : renforcement à envisager sur la base du meilleur optimum « performance/coût/enjeux »

# 2<sup>ème</sup> phase : diagnostic détaillé des OA prioritaires et projet de renforcement (le cas échéant)

- Études de renforcement
  - Format général des études préliminaires de renforcement sismique



# 2<sup>ème</sup> phase : diagnostic détaillé des OA prioritaires et projet de renforcement (le cas échéant)

- Études de renforcement
  - Format général des études préliminaires de renforcement sismique

Solutions	0 (non-intervention)	1-a	1-b	2-b	2-c	2-d	2-e	...	3 (démolition /reconstruction)
Accélération admissible (max adm)	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Indice de conformité γ <sub>adm</sub>	...	...	...	...	...	...	...	...	100%
Coût	0 € (sauf déclassement associé à un renforcement ou création d'une infra. parallèle)	...	...	...	...	...	...	...	...
Faisabilité technique	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Niveau de confiance	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Compatibilité fonctionnement service	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Entretien éventuel	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Réparations post-sismiques prévisibles	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Conséquences en cas de dépassement de séisme (intégrité struct., étendue et type de dommages, sécurité usagers, durée d'interruption de trafic)	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Indice de rentabilité R	0	...	...	...	...	...	...	...	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Bilan des avantages	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Bilan des inconvénients	...	...	...	...	...	...	...	...	...

$$R = \gamma_{exjcu} \cdot \frac{\Delta a_{ref}}{\gamma_{age} \cdot a_{ref} - a_{max adm}} - \frac{C_{ref}}{C_{rempl}}$$



## 2<sup>ème</sup> phase : diagnostic détaillé des OA prioritaires et projet de renforcement (le cas échéant)

- Problématique particulière des élargissements / remplacements de tabliers

Rédaction de l'ancien arrêté supprimée car jugée trop pénalisante :

*Art. 1er. - ... Sont visés par le présent arrêté les ponts nouveaux définitifs, publics ou privés, ainsi que les murs de soutènement qui en sont solidaires.*

*Les ponts construits en utilisant tout ou partie des fondations d'un ouvrage antérieur sont considérés, pour l'application du présent arrêté, comme ponts nouveaux.*

**Commentaire ancien guide Sêtra** : Le réemploi d'appui (pile ou culée) n'est en général possible que si la liaison tablier / appui est réalisée à l'aide d'un appareil d'appui glissant. Il convient alors de créer un appui fixe pour l'ouvrage sur un appui qui sera alors soit renforcé, soit remplacé s'il s'agit d'un appui existant.

## 2<sup>ème</sup> phase : diagnostic détaillé des OA prioritaires et projet de renforcement (le cas échéant)

- Problématique particulière des élargissements / remplacements de tabliers

### Approche proposée :

Identique au cas général de renforcement sismique spécifique, visant à rechercher le meilleur optimum « coût/performance/enjeu » :

- Priorisation des OA selon exposition à l'aléa, importance stratégique et vulnérabilité pressentie (*configuration après travaux*)
- Étude préliminaire de renforcement sismique
- Choix de la solution de renforcement présentant le meilleur rapport « performance/coût », (*sans nécessairement viser 100% de l'accélération réglementaire de calcul des OA neufs*)

### **+ Exigence supplémentaire systématique inspirée de l'arrêté « bâtiments » :**

« S'assurer que les travaux envisagés ne conduisent pas à une aggravation (significative) de la vulnérabilité de l'ouvrage. »

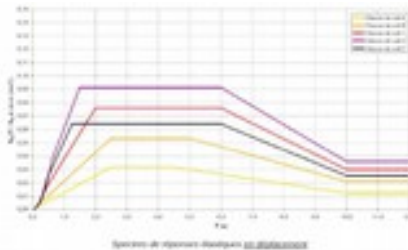
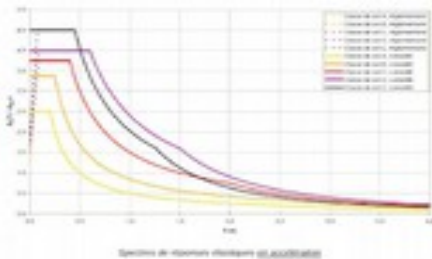
# 2<sup>ème</sup> phase : diagnostic détaillé des OA prioritaires et projet de renforcement (le cas échéant)

- Problématique particulière des élargissements / remplacements de tabliers

➔ Limites forfaitairement fixées de l'évolution des sollicitations sismiques  $+10\%$  sur  $\Delta F$  et  $+20\%$  sur  $\Delta d$ , à évaluer en fonction de :

- La « gamme de période propre » initiale de l'ouvrage
- La classe de sol (A, B, C, D, E)
- La variation de masse ( $-40\% \leq \Delta M \leq +40\%$ )
- La variation de souplesse des conditions d'appui ( $-40\% \leq \Delta K \leq +40\%$ )

$$(-40\% \leq \Delta K \leq +40\%)$$






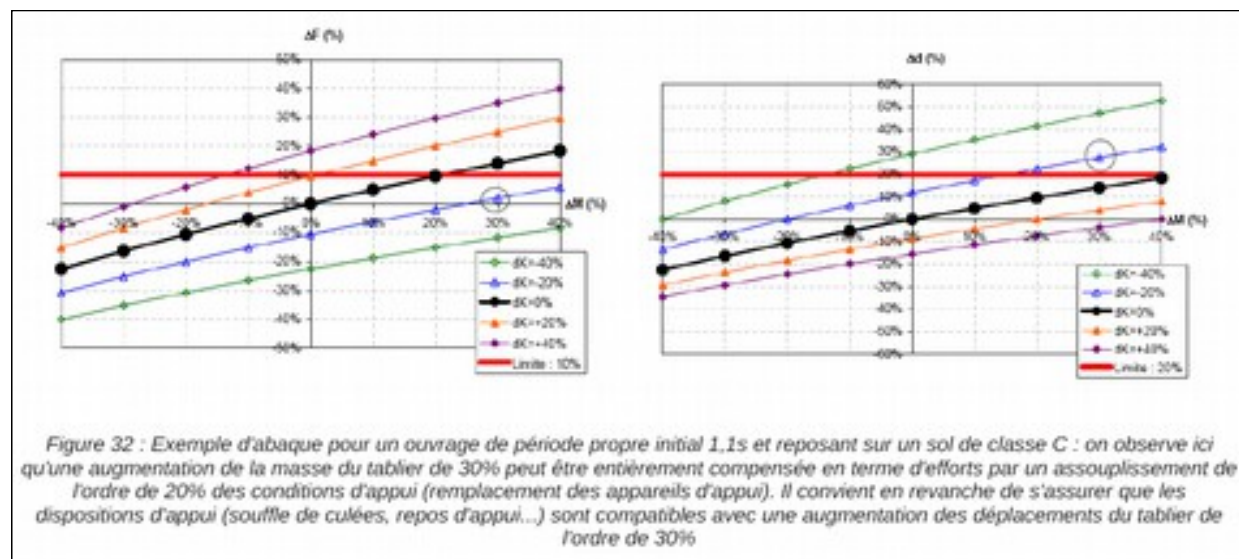
Rigidité des supports relative	Gamme de période propre fondamentale associée	Typologies et caractéristiques d'ouvrages associés	Illustrations	Valeurs de périodes propres retenues pour l'étude
Très rigide	$T < 0,125$ s	Ouvrages monolithiques ou encastres dans le sol (ponts, ponts caillots, pontons)		0,1 s
Rigidité à mouvement souple	$0,125$ s $\leq T < 0,5$ s	Ouvrages de petits dimensions, ponts métalliques ou de faible hauteur (pontons d'appareillage d'ouvrages, viaducs en maçonnerie)		0,3 s
Souple	$0,5$ s $\leq T < 2,5$ s	Viaducs à piles élancées, ouvrages souples d'appareillage d'ouvrages souples ou glissants		0,8 s ; 1,1 s ; 1,4 s ; 2 s
Très souple	$T \geq 2,5$ s	Ponts à haubans, ponts suspendus, passerelles pédonnelles		3 s

Figure 22 : Gamme de périodes propres d'ouvrage et typologies associées

## 2<sup>ème</sup> phase : diagnostic détaillé des OA prioritaires et projet de renforcement (le cas échéant)

- Problématique particulière des élargissements / remplacements de tabliers

➔ Construction d'abaques (35 = 7 périodes propres x 5 classes de sols) :



# Exemples d'applications opérationnelles

- Renforcement sismique des viaducs de l'A9 entre Perpignan et l'Espagne
- Diagnostic et renforcement du viaduc de Caronte (Martigues – A55)
- Principaux enseignements



# Exemples d'applications opérationnelles

- ➔ ● Renforcement sismique des viaducs de l'A9 entre Perpignan et l'Espagne
- Diagnostic et renforcement du viaduc de Caronte (Martigues – A55)
- Principaux enseignements

## ELEMENTS DE CONTEXTE

Décision ministérielle du 15 octobre 2008 :

Mettre à profit le projet d'élargissement du tronçon autoroutier pour :

« procéder au durcissement au séisme des parties anciennes et nouvelles des ouvrages selon le projet de guide Sétra relatif aux ouvrages existants ».

- Ouvrages concernés : les 6 viaducs non-courants d'Agly, Têt, Tech, Pox, Calcine et Rome (construits entre 1970 et 1976, soit 20 ans avant publication PS92)

## ELEMENTS DE CONTEXTE

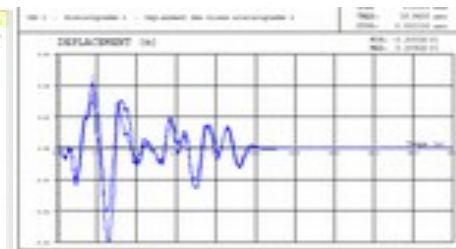
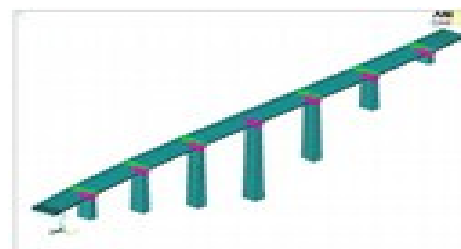
- OAs construits entre 1970 et 1976
- Risques identifiés :
  - \* souffles longitudinaux insuffisants
  - \* risques d'échappements d'appui
  - \* faiblesse de certains appuis (culées + certaines piles)



⇒ renforcements sismiques préconisés :

- \* Clouages culées
- \* Remplacement AA
- \* Attelages travées
- \* Amortisseurs

Avantages : *Réduction simultanée des efforts et des coûts*  
*Perturbation minimale du trafic*  
*Répétitivité*



Modèle de calcul et résultats de l'analyse dynamique temporelle  
 (Source : ASF/Setec TPI)

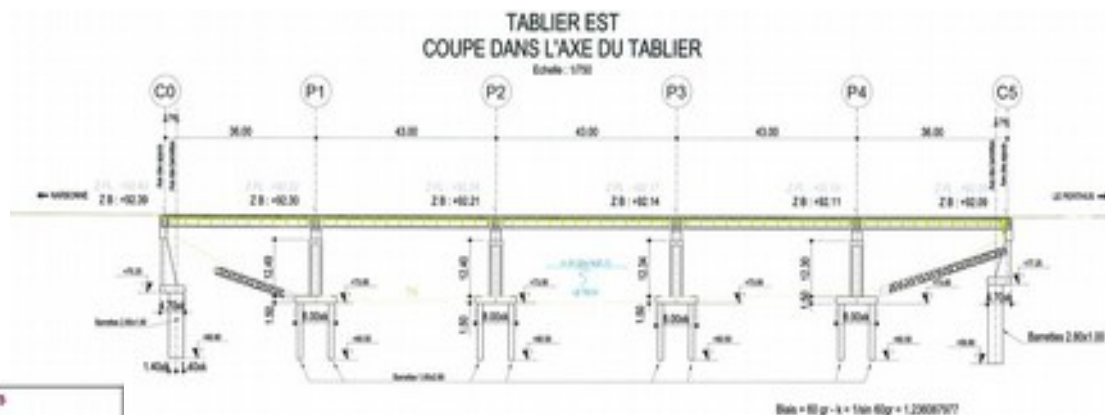
Inconvénients :

- *Nécessité de calculs dynamiques complexes*
- *Entretien / maintenance*

# Principaux résultats

OA	Zone sismicité	Amplif. Sol+topo	Cat. Imp.	$A_{ref}$ (m/s <sup>2</sup> )	$\alpha_{conf}$ avant	$\alpha_{conf}$ après	Technique renforc.	Coût	% coût reconstr.
Agly	Modérée ( $A_{Ek} = 1,1$ m/s <sup>2</sup> )	S = 1,8 $\tau = 1,0$	II ( $\gamma_I = 1,2$ )	2,38 m/s <sup>2</sup>	42%	100%	<u>amortisseurs</u>	0,7 M € HT	8%
Têt	Modérée ( $A_{Ek} = 1,1$ m/s <sup>2</sup> )	S = 1,35 $\tau = 1,0$	II ( $\gamma_I = 1,2$ )	1,49 m/s <sup>2</sup>	49%	100%	Remplacement AA <u>Amortisseurs</u>	1,4 M € HT	8%
Tech	Modérée ( $A_{Ek} = 1,1$ m/s <sup>2</sup> )	S = 1,6 $\tau = 1,0$	II ( $\gamma_I = 1,2$ )	2,11 m/s <sup>2</sup>	24%	≈ 100%	Augm. soufl. jdc, renforts piles + culées, amortisseurs	3,2 M € HT	13%
Pox	Modérée ( $A_{Ek} = 1,1$ m/s <sup>2</sup> )	S = 1,35 $\tau = 1,2$	II ( $\gamma_I = 1,2$ )	2,14 m/s <sup>2</sup>	10%	100%	<u>renforts culées,</u> Attelage tablier, amortisseurs	2,0 M € HT	5%
Calcine	Modérée ( $A_{Ek} = 1,1$ m/s <sup>2</sup> )	S = 1,35 $\tau = 1,15$	II ( $\gamma_I = 1,2$ )	2,05 m/s <sup>2</sup>	14%	100%	<u>renforts culées,</u> Attelage tablier, amortisseurs	2,3 M € HT	5%
Rome	Modérée ( $A_{Ek} = 1,1$ m/s <sup>2</sup> )	S = 1,35 $\tau = 1,3$	II ( $\gamma_I = 1,2$ )	2,32 m/s <sup>2</sup>	10%	100%	<u>renforts culées,</u> Attelage tablier, amortisseurs	2,0 M € HT	6%

# « Zoom » sur le viaduc du Tech



Parties d'ouvrage	Critères de défaillance	Acc. limite admissible	Conséquences prévisibles
<b>Tabliers</b>	- Souffle des joints de chaussée - Souffle des abouts de hourdis - Souffle des abouts de poutres VIPP	0,24 m/s <sup>2</sup> 0,51 m/s <sup>2</sup> 1,35 m/s <sup>2</sup>	- Risque de choc associé à un endommagement des culées - Risque de choc associé à un endommagement des culées - Risque de choc associé à un endommagement des culées et des ancrages de précontrainte
<b>Appareils d'appui</b>	- Distorsion des appareils d'appui	1,07 m/s <sup>2</sup>	- Endommagement ou rupture des élastomères associés à un tassement d'appui du tablier et un risque d'échappement d'appui
<b>Piles</b>	- Résistance au tranchant des fûts	0,32 m/s <sup>2</sup>	- Rupture de pile et effondrement de l'ouvrage
	- Résistance à la flexion des fûts P2 et P3 - Résistance à la flexion des fûts P1 et P4	0,39 m/s <sup>2</sup> 0,49 m/s <sup>2</sup>	- Endommagement ou rupture de pile
<b>Culées</b>	- Résistance des semelles - Résistance des barrettes	> 1,32 m/s <sup>2</sup> 0,40 m/s <sup>2</sup>	- Endommagement des semelles - Perte de portance de l'ouvrage
	- Résistance des poteaux - Résistance des barrettes	< 0,40 m/s <sup>2</sup> < 0,40 m/s <sup>2</sup>	- Basculement des culées et risque d'effondrement des travées de rive - Basculement ou perte de portance des culées et risque d'effondrement des travées de rive





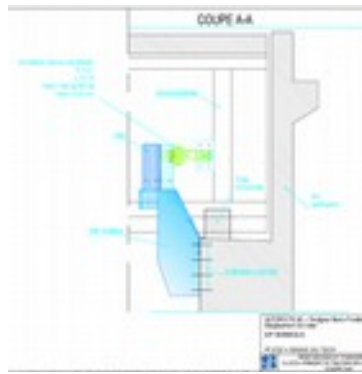
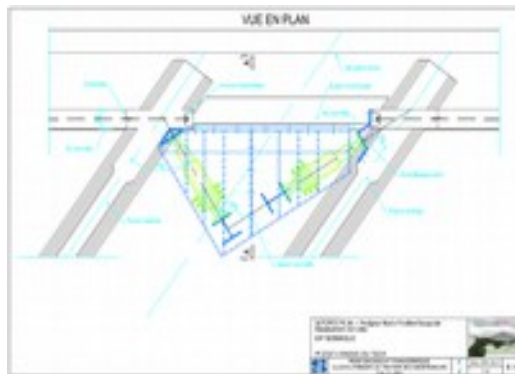
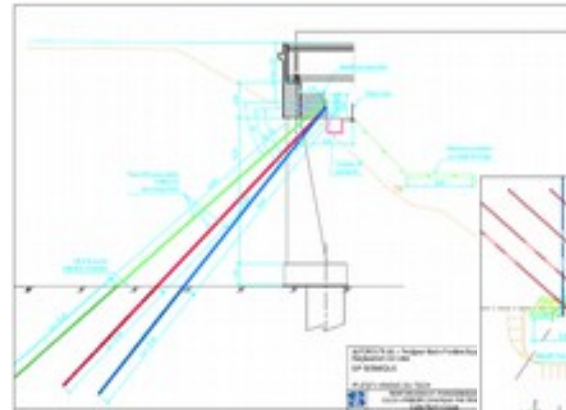
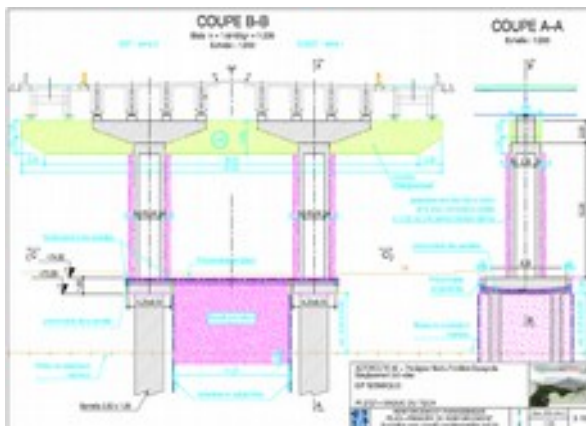
# « Zoom » sur le viaduc du Tech

Combinaisons de solutions	Accélération max admissible (m/s <sup>2</sup> )	A <sub>ser</sub> /A <sub>se</sub> (%)	Partie détaillante	Prix (k€HT) Valeur juin 2007	Indice de rentabilité R	Impact environnement (**)	Gêne à l'usager (**)	Classement
Borne inf.	< 0,24 m/s <sup>2</sup>	< 18 %	souffle	0 k€	-	0	0	Solution écartée.
Solution 0	0,32 m/s <sup>2</sup>	24 %	Fûts de piles	74 k€	0,11	0	1	Solution
Combinaison 0+E	< 0,40 m/s <sup>2</sup>	< 30 %	Barrettes de piles et culées	692 k€	0,21	0		
Combinaison 0+C+E	< 0,40 m/s <sup>2</sup>	< 30 %	Poteaux et barrettes culées	746 k€	0,219	0		
Combinaison 0+C+E+H	0,63 m/s <sup>2</sup>	48 %	Barrettes de piles	1423 k€	0,49	1		
Combinaison 0+C+E+H+I	0,66 m/s <sup>2</sup>	50 %	Appareils d'appui	1754 k€	0,51	1		
Combinaison 0+E+F+H	0,84 m/s <sup>2</sup>	64 %	Barrettes de piles	2804 k€	0,65	1		
Combinaison 0+E+G+H	1,07 m/s <sup>2</sup> (1) 1,13 m/s <sup>2</sup> (2)	81 % (1) 85 % (2)	App. d'appui (1) Barrettes piles (2)	2901 k€	0,95	1	1	4
Combinaison 0+C+E+F+H+I	1,25 m/s <sup>2</sup>	0,95 %	Barrettes de piles	3189 k€	1,04	1	1	3
Combinaison 0+E+G+H+I	# 1,32 m/s <sup>2</sup>	# 100 %	Barrettes piles	3232 k€	1,11	1	1	1
Combinaison 0+C+E+G+H+I	> 1,32 m/s <sup>2</sup>	> 100 %	ND	3286 k€	1,10	1	1	2
Borne sup	≥ 1,32 m/s <sup>2</sup>	≥ 100 %	ND	15 100 k€ (*)	-	3	0	6

### Légende :

- ND = non déterminé
- Ligne pochée = combinaison de solutions intégrant la modification du système d'appui (solution C)
- Borne inférieure : aucuns travaux
- Solution 0 : Aménagement garde grève fusible + remodelage butées transversales sur culées.
- Solution C : Modification du fonctionnement du système d'appui, appareils d'appuis glissants sur piles et non glissants sur culées.
- Solution E : Epaissement des fûts de piles en béton armé
- Solution F : Réalisation de pieux complémentaires pour fondations de piles
- Solution G : Réalisation d'un massif rigide complémentaire pour fondations de piles
- Solution H : Ancrage en tête des culées par tirants précontraints
- Solution I : Mise en œuvre d'amortisseurs au droit des culées
- Borne supérieure : démolition/reconstruction de l'ouvrage

# « Zoom » sur le viaduc du Tech



$\alpha_{\text{conf avant}}$	$\alpha_{\text{conf après}}$	Technique renforc.	Coût	% coût reconstr.
24%	≈ 100%	Augm. souffl jdc, renforts piles + culées, amortisseurs	3,2 M € HT	13%

# Exemples d'applications opérationnelles

- Renforcement sismique des viaducs de l'A9 entre Perpignan et l'Espagne
- ➔ ● Diagnostic et renforcement du viaduc de Caronte (Martigues – A55)
- Principaux enseignements

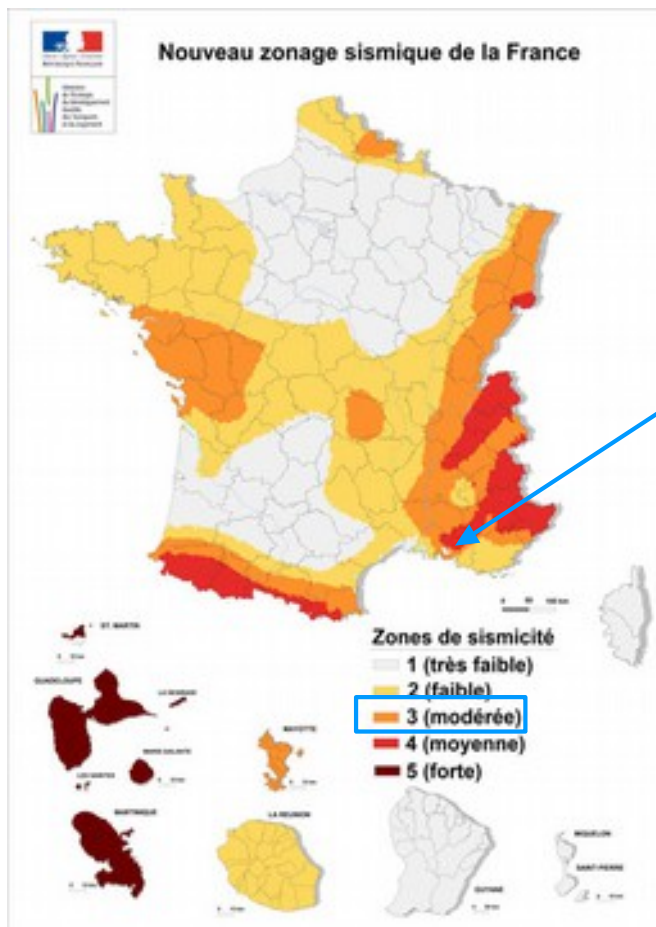
# Présentation générale de l'ouvrage

- Ouvrage principal de traverse de la ville de Martigues par l'A55
- Pont à béquilles (300m)
- 4 viaducs d'accès en béton précontraint (259,5m et 314,5m)





# Éléments de contexte





# Éléments de contexte

- Ouvrage souffrant de pathologie sévère
- Construit entre 1969 et 1972, selon les prescriptions des anciennes règles parasismiques PS69 (*1<sup>ères</sup> règles parasismiques françaises*)

⇒ Prise en compte d'une accélération statique forfaitaire de 0,1g

Pour comparaison, la nouvelle législation parasismique imposerait :

- 0,21g (1,1 m/s<sup>2</sup> x 1,2 x 1,6) au niveau du sol de fondation

$a_{gr}$  (Z3)

$\gamma_1$  (Cat. Imp. III)

S (classe de sol D)

Cf. Décret n°2010-1255  
(nouveau zonage)

Cf. Arrêté du 26 octobre 2011 : classification et règles  
de construction parasismique applicables aux ponts

- jusqu'à 0,53g au niveau de la structure

amplification dynamique (ou réponse spectrale) variable  
selon les périodes propres de vibration de l'ouvrage

Cf. Arrêté du 26 octobre 2011 et Eurocode 8-2

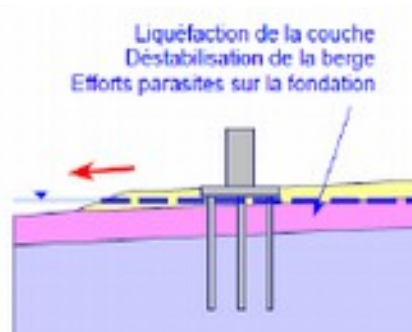
# Éléments de contexte

- Bloqueurs dynamiques sensés contribuer à la résistance sismique rompue → Risque d'échappement longitudinal



Conception (Chili, 2010)

- Forte présomption de risque de liquéfaction des sols au droit de l'ouvrage (présence de sables lâches saturés en eau)



Niigata (Japon, 1964)

# Éléments de contexte

- ➔ Décision d'une mise à profit des réparations pour diagnostiquer l'ouvrage au séisme et améliorer sa performance conformément aux recommandations du *projet de guide Sétra « Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants »*

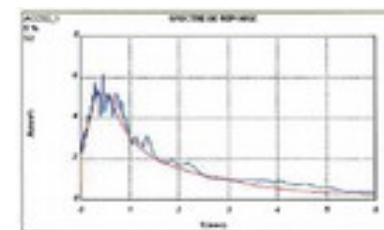
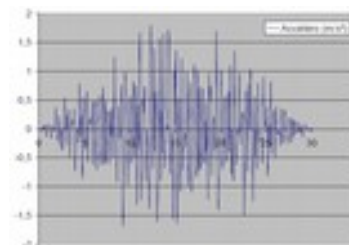
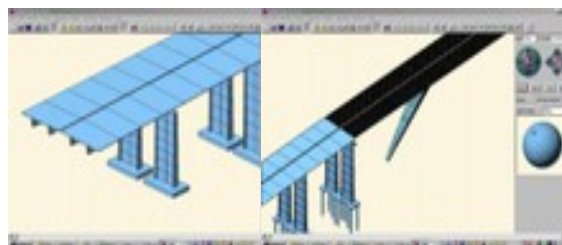


# Bilan du diagnostic sismique

(étude CETE Méditerranée/Sétra, 2006-2009)

- Vis-à-vis du phénomène vibratoire
- Analyse basée sur une modélisation dynamique 3D de la structure

(logiciel PCP du Sétra)



- Mise en évidence d'une mauvaise conception parasismique générale (mauvaise répartition des efforts entre appuis) pouvant entraîner :

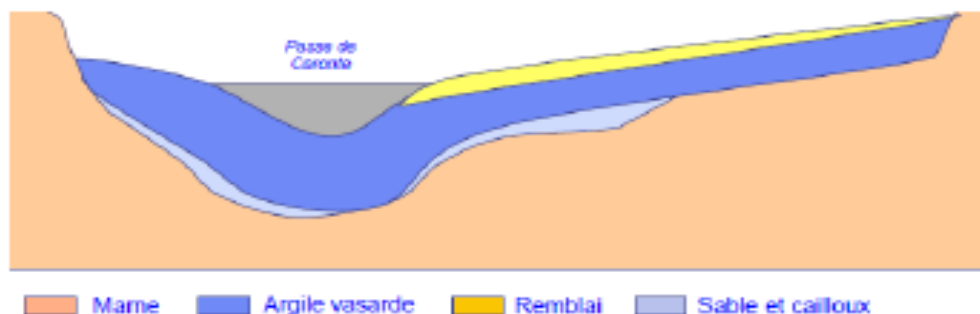
- Un défaut de résistance des fondations
- Un risque d'échappement et de chute du tablier

# Bilan du diagnostic sismique

(étude CETE Méditerranée/Sétra, 2006-2009)

- Vis-à-vis du risque de liquéfaction des sols

(source : J.-F. Serratrice, LRA/GMS-ERA02)



- Exploitation des reconnaissances du site menées en 1967 :

- 13 sondages carottés S1 à S13 et essais d'identification
- sondages SPT (Standard Penetration Test)

*L'analyse de ces données en 2006 montre que les dépôts argileux (vases et limons) sont exempts du risque de liquéfaction. Mais ce risque ne peut pas être écarté pour les fines couches de sable.*



# Bilan du diagnostic sismique

(étude CETE Méditerranée/Sétra, 2006-2009)

- Vis-à-vis du risque de liquéfaction des sols

(source : J.-F. Serratrice, LRA/GMS-ERA02)

- Recours à des analyses complémentaires plus sophistiquées

## Reconnaitances de 2009

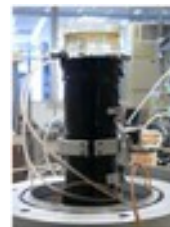
- 3 sondages carottés CPS1-1 CPS1-2 CPS2 et essais d'identification
- 2 essais triaxiaux cycliques
- 5 sondages au piézocône PS1 à PS5



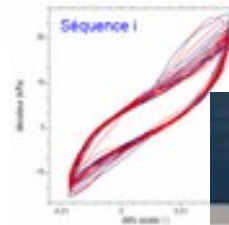
Pointe d'un piézocône



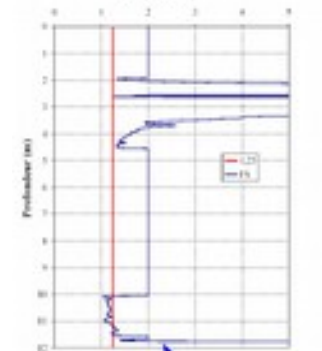
Coefficient de sécurité vis-à-vis du risque de liquéfaction  
PS1 à PS5 (0.1 à 0.5)



Diamètre 76 mm



Diamètre 76 mm



Coefficient de sécurité  $F_s$

➔ **Risque de liquéfaction écarté dans les conditions sismiques du site**

# Stratégies de renforcement sismique retenues (*direction transversale*)

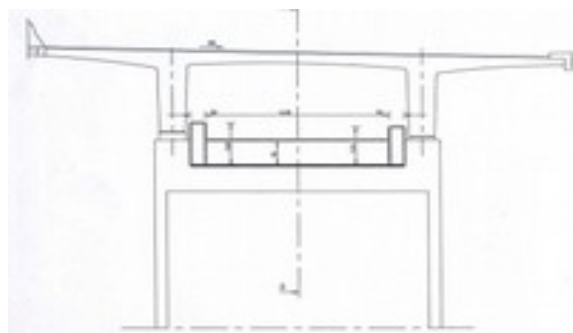
- Augmentation de la souplesse globale du système

➡ Remplacement des appareils d'appui

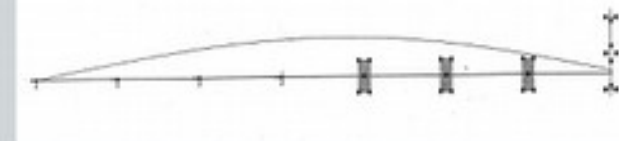


- Amélioration de la distribution des efforts entre appuis et suppression du risque de chute du tablier

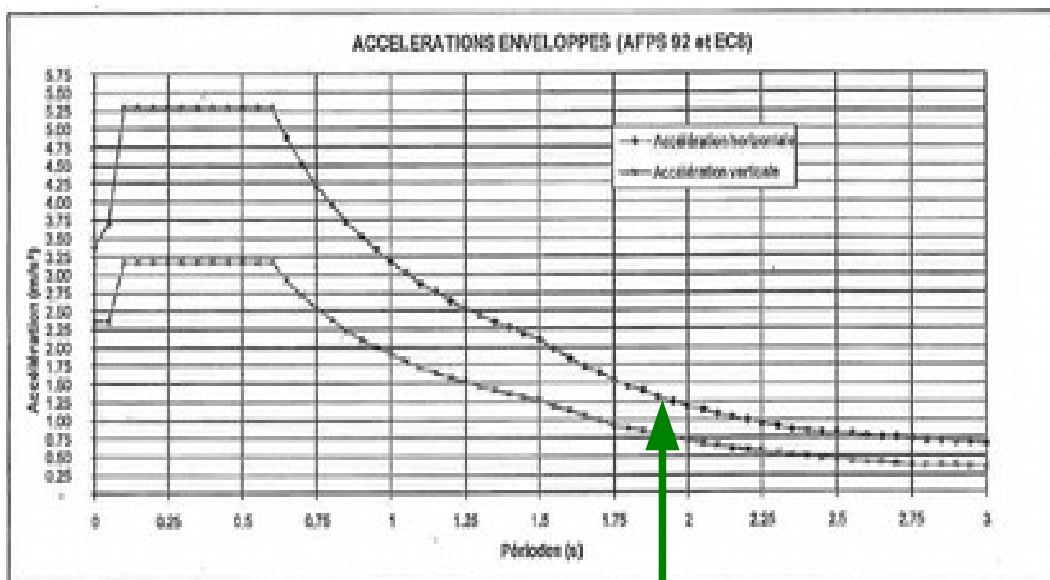
➡ Réalisation de butées parasismiques (*de blocage ou de sécurité*)



Mode 1 trans :  $T = 1,91s$  ; % masse modale = 65%



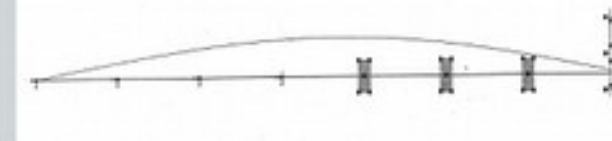
# Stratégies de renforcement sismique retenues (*direction transversale*)



**Mode 1**  
 **$Se(T) = 1,31 \text{ m/s}^2$**



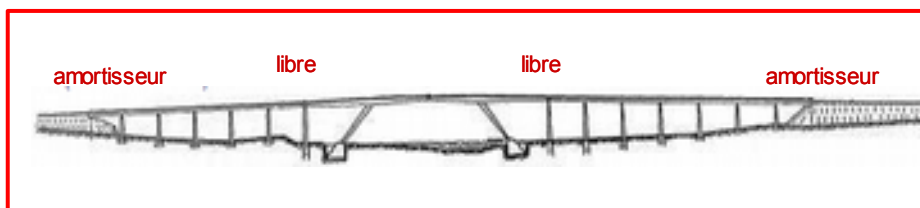
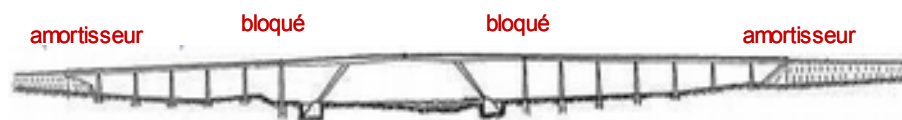
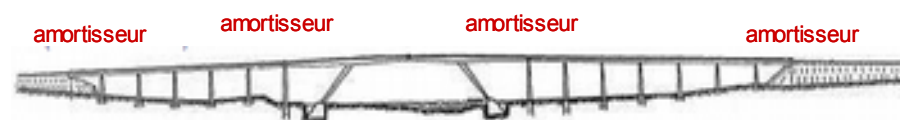
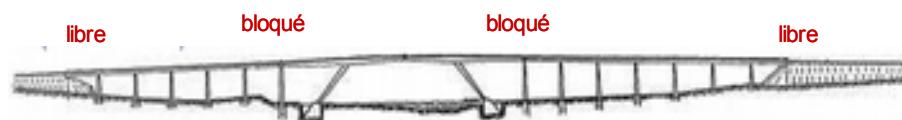
**Mode 1 trans :  $T = 1,91\text{s}$  ; % masse modale = 65%**



# Stratégies de renforcement sismique retenues (direction longitudinale)

- Abaissement des déplacements sismiques à 2 cm et des efforts sismiques horizontaux à 1200 t /culée (capacité maxi fondations = 1600 t)

➔ Plusieurs configurations testées

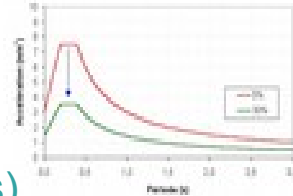


Solution retenue

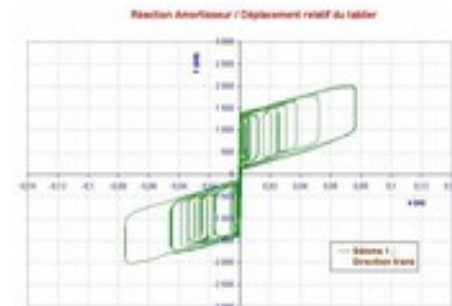
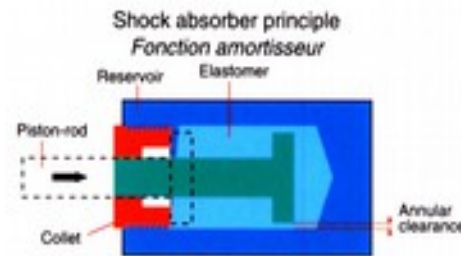
# Stratégies de renforcement sismique retenues *(direction longitudinale)*

- Abaissement des déplacements sismiques à 2 cm et des efforts sismiques horizontaux à 1200 t /culée (capacité maxi fondations = 1600 t)

➔ **Emploi de dispositifs amortisseurs dissipateurs d'énergie**  
(4 amortisseurs disposés longitudinalement sur chacune des 4 culées)



Technologie « RAP » (Ressort Amortisseur Précontraint)  
 - *Seuil de déclenchement (point fixe en service)*  
 - *Fonction « recentrage »*

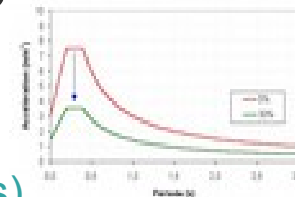




# Stratégies de renforcement sismique retenues (*direction longitudinale*)

- Abaissement des déplacements sismiques à 2 cm et des efforts sismiques horizontaux à 1200 t /culée (capacité maxi fondations = 1600 t)

➔ **Emploi de dispositifs amortisseurs dissipateurs d'énergie**  
(4 amortisseurs disposés longitudinalement sur chacune des 4 culées)



**Nécessitent une vigilance particulière**  
(dimensionnement, validation des caractéristiques techniques, installation...)

➔ **Norme NF EN 15129**

# Stratégies de renforcement sismique retenues

- Un bon compromis coûts / performance
  - ➔ **Ouvrage justifié pour 70% du niveau de séisme de calcul des OA neufs**
  - ➔ **Interventions limitées sur les éléments de structure**
  - ➔ **Pas d'impact sur le fonctionnement en service**
  - ➔ **Coût du renforcement sismique évalué à 15% environ du montant de l'opération de réparation**

# Exemples d'applications opérationnelles

- Renforcement sismique des viaducs de l'A9 entre Perpignan et l'Espagne
- Diagnostic et renforcement du viaduc de Caronte (Martigues – A55)



- Principaux enseignements

# Principaux enseignements

- Quelques (rares) exemples de renforcement sismique de ponts existants sur le territoire national  
(mises à profit d'opérations d'élargissement ou de réparation)
- Études basées sur le nouveau corpus législatif et réglementaire national ou européen relatif à la prise en compte du risque sismique sur les ponts (Décret « Nouveau zonage », Arrêté « Ponts », Eurocodes 8-2 et 8-5, norme NF EN 15129...) et sur les développements méthodologiques spécifiques à la problématique des ponts existants
  - Guide Cerema en cours de publication sur le diagnostic/renforcement sismiques des ponts existants
  - Cahier technique AFPS/Cerema sur les dispositifs parasismiques pour les ponts
- Approche « innovante » basée sur des objectifs calibrés  
(recherche du meilleur optimum performance/coûts/enjeux)

# Principaux enseignements

- A nécessité la mobilisation de compétences complémentaires :
  - Calcul dynamique des structures
  - Géotechnique sismique (notamment liquéfaction des sols)
  - Procédure de qualification et appui à la réception des dispositifs
- A permis de réduire très sensiblement la vulnérabilité sismique des ouvrages pour des coûts raisonnables
- L'emploi de dispositifs amortisseurs (*cumulée à d'autres techniques*) est apparu comme la technique la plus appropriée pour ce type d'ouvrages :
  - Réduction simultanée des efforts et des déplacements
  - Impact minimal sur la structure et sur l'exploitation



# Merci de votre attention

**Denis DAVI**

Cerema / Direction territoriale Méditerranée

Référent séisme PCI « Vulnérabilité des ouvrages de Génie Civil aux aléas sismiques et hydrauliques »

04 42 24 76 81 ou 04 72 14 32 25

denis.davi@cerema.fr