

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

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

- Reconnaissances et méthodes d'analyse pour le diagnostic
- Exemple d'étude de diagnostic/renforcement sismique

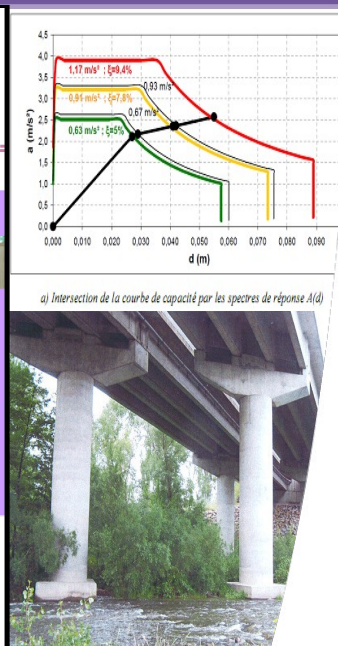
Sétra
Service Études
des Infrastructures
de Transport
et Logement

Version provisoire avril 2010

Guide méthodologique
Diagnostic et renforcement
sismiques des ponts existants

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère
de l'Écologie,
du Développement
durable,
des Transports
et du Logement



Denis DAVI
CETE Méditerranée

Ressources, territoires, habitats et logement
Énergies et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Plan de l'exposé

- Reconnaissances à mener pour le diagnostic sismique
 - Données d'entrées nécessaires à l'analyse sismique des structures
 - Recueil des données et investigations sur site
 - Coefficients de sécurité associés au niveau de connaissance des OA
- Méthodes d'analyse
 - Méthodologie générale
 - Représentation des aléas sismiques
 - Vulnérabilités relatives et points faibles par typologies d'ouvrages
 - Méthodes de calcul pour le diagnostic sismique et domaines d'emploi
 - Stratégies et techniques de renforcement
- Exemple d'étude de diagnostic/renforcement sismique



Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Reconnaitances à mener pour le diagnostic sismique

- Données d'entrées nécessaires à l'analyse sismique des ouvrages
 - **Géométrie générale de la structure et compréhension de son fonctionnement sous séisme :**
 - Répartition des masses et des rigidités
 - Schéma de reprise des efforts horizontaux
 - Modifications structurelles (travaux d'élargissement, réparations, confortements)
 - **Hypothèses sismiques prises en compte lors de la conception**
 - Niveau d'accélération
 - Coefficient de comportement
 - Présence d'éventuelles dispositions spécifiques (butées, amortisseurs...)
 - **Caractéristiques des sections et éléments structurels**
 - Dimensions de coffrage
 - Densité et disposition des armatures
 - Caractéristiques matériaux
 - Défauts de réalisation éventuels (qualité du béton, dispositions constructives mal exécutées...)

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Reconnaitances à mener pour le diagnostic sismique

- Données d'entrées nécessaires à l'analyse sismique des ouvrages
 - **Type de fondations**
 - *Superficielle ou profondes*
 - *Dimensions et profondeur*
 - **Conditions de sol**
 - *Classe de sol*
 - *Caractéristiques mécaniques*
 - *Traces d'affouillement / érosion*
 - *Susceptibilité à la liquéfaction*
 - **Conditions d'environnement**
 - *Effets induits (liquéfaction, chutes de blocs, glissements de terrain)*
 - *Effets de site (géologique ou topographique)*
 - *Présence de failles*



Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Reconnaitances à mener pour le diagnostic sismique

- Données d'entrées nécessaires à l'analyse sismique des ouvrages
 - **Etat de santé de la structure**
 - *Pathologies*
 - *Endommagements*
 - **Robustesse et historique de chargement**
 - *Séismes subis*
 - *Crues*
 - *Cyclones*
 - *Chocs accidentels...*
 - **Fonctionnalités passée, présente et future**
 - *Trafic supporté*
 - *Rôle dans la gestion de crise et l'organisation des secours*
 - *Classe ou catégorie d'importance*



Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Reconnaitances à mener pour le diagnostic sismique

- Recueil des données et investigations sur site

En fonction de la quantité et de la qualité des données disponibles, de l'importance de l'ouvrage et de la phase d'étude (avant-projet, projet, exécution...) :

- **Dossier d'ouvrage (récolement)**

- *Plans de coffrage et de ferrailage*
- *Notes d'hypothèses générales et géotechniques*
- *Notes de calcul des appuis*

- **Dossier de suivi**

- *Relevés d'inspections détaillées*
- *Interventions sur l'ouvrage (rechargements, réparations...)*

A défaut ou en complément :

- **Relevés géométriques contradictoires**
- **Données statistiques sur les pratiques constructives d'époques**
(caractéristiques matériaux et dispositions constructives)

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Reconnaisances à mener pour le diagnostic sismique

- Recueil des données et investigations sur site

A défaut ou en complément (suite...) :

- Radar, gammagraphie, ferroskan...
- Prélèvements matériaux et essais de laboratoire
- Investigations et reconnaissances géotechniques

- Instrumentations dynamiques
 - « *Bruit de fond* »
 - *Lâcher de câble, choc ou impulsion*
 - *Machines à balourds*
 - ...



Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Reconnaitances à mener pour le diagnostic sismique

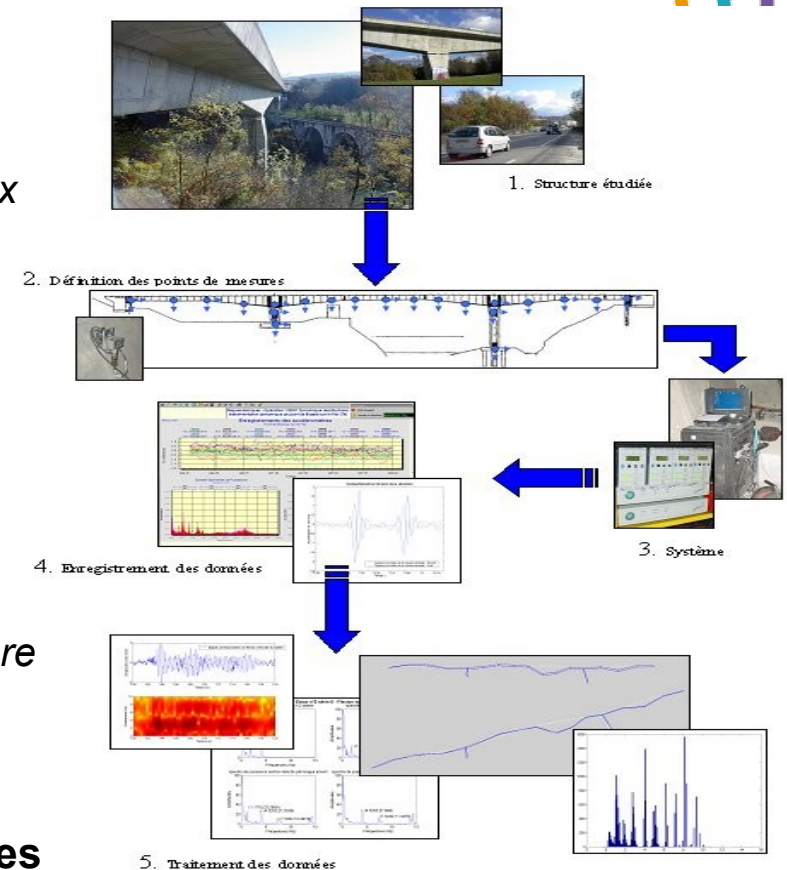
- Recueil des données et investigations sur site

Instrumentations dynamiques

▪ Paramètres accessibles

- *Comportements dynamiques globaux et locaux*
- *Fréquences propres*
- *Allure des déformées modales*
- *Contribution éléments secondaires (bâtiment)*
- *Identification d'anomalies structurelles*
(défaut de rigidité, fissuration...)
- *Etat fonctionnement AA, jdc...*
- *Modules des matériaux constitutifs*
(béton ancien, maçonnerie...)
- *Souplesse fondations et interaction sol/structure*
- *Amplifications de site géologique*

- **Permet une validation des modèles numériques de calcul par extrapolation aux très petites déformations**
(pas toujours aisé!)



Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Reconnaisances à mener pour le diagnostic sismique

- Coefficients de sécurité associés au niveau de connaissance des ouvrages

- **NC1** : Connaissance limitée
- **NC2** : Connaissance normale
- **NC3** : Connaissance intégrale

CF pondère directement les coefficients de sécurité matériaux γ_m pour les vérif de résistance

Niveau de connaissance	Géométrie	Dispositions constructives	Matériaux	Coefficients de confiance « CF »
NC1 (limitée)		Simulation basée sur l'état des pratiques de l'époque de construction et investigations in situ limitées (méthodes électromagnétique, radar, gammagraphie, sondages carottés...)	Valeurs par défaut issues des standards de l'époque de construction et essais in situ limités	1,35
NC2 (normale)	A partir des plans d'ensemble avec examen visuel contradictoire d'un nombre représentatif d'échantillons ou à partir d'un examen intégral (relevé sur site)	Plans d'exécution ou de récolement d'origine détaillés mais incomplets avec investigations in situ limitées ou investigations in situ étendues	Notes de calcul d'exécution et spécifications d'origine avec essais in situ limités ou essais in situ étendus	1,20
NC3 (intégrale)		Plans d'exécution ou de récolement d'origine détaillés complets avec investigations in situ limitées ou investigations in situ complètes	Spécifications d'origine avec essais de vérification in situ ou rapports d'essais d'origine avec essais in situ limités ou essais in situ complets	1,00

Tableau 26 : Niveaux de connaissance des ouvrages et coefficients de sécurité associés [3]

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Reconnaisances à mener pour le diagnostic sismique

- Coefficients de sécurité associés au niveau de connaissance des ouvrages

Niveaux d'investigations et d'essais	Investigations (des dispositions constructives)	Essais (des matériaux)
	Pour chaque type d'élément primaire (pieu, semelle, fût de pile, nœud d'encastrement pile/tablier, murs de culées...)	
	Pourcentage d'éléments soumis à une vérification des dispositions constructives	Echantillons de matériaux par appui
Limité	20%	1
Étendu	50%	2
Complet	80%	3

Tableau 27 : Exigences minimales recommandées pour différents niveaux d'investigations et d'essais dans le cas des ouvrages d'art

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Méthodes d'analyse

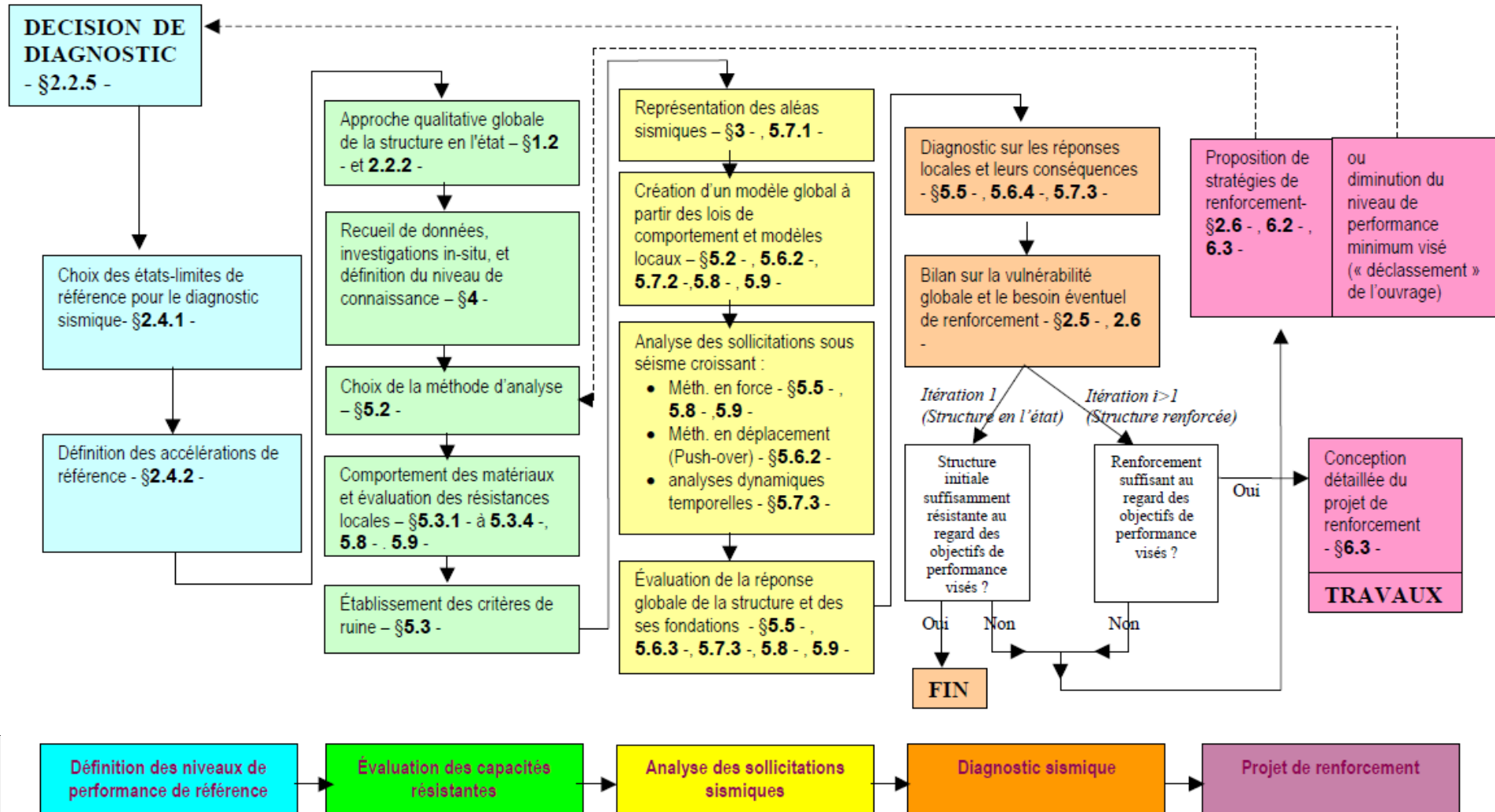
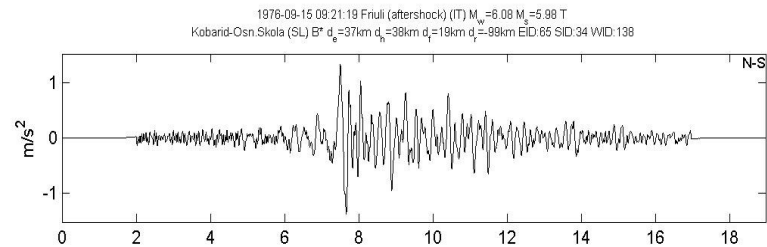


Figure 23 : Méthodologie générale des études de diagnostic et renforcement sismique

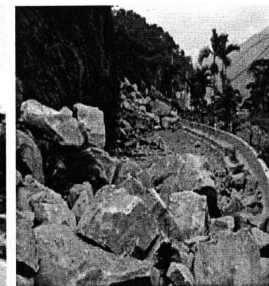
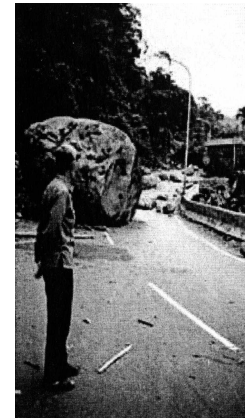
Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Méthodes d'analyse

- Représentation des aléas sismiques
 - Spectres réglementaires (projet d'arrêté sismique)
 - Accélérogrammes (base accélérométrique établie par ERA 06 – LR Nice)



- Effets induits (évalués de façon + ou – sophistiquée selon les enjeux et les spécificité locales)
 - Essais tri-axiaux pour la liquéfaction,
 - Calculs de trajectoires de chutes de blocs...



Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Méthodes d'analyse

Types d'ouvrages	Vulnérabilité pressentie vis-à-vis du phénomène sismique vibratoire	Points faibles potentiels identifiés
« Buses », ponts-cadres et portiques	Très Faible	Murs-voiles, fondations
Ponts en maçonnerie	Faible à moyenne	Fondations, tympans
Ponts à travée unique	Faible	Culées, échappement transversal
Ponts à travées indépendantes (VIPP, PRAD...)	Forte	Échappement longitudinal, appareils d'appui
Ponts à travées continues bloqués sur appuis - Tabliers en béton - Tabliers à ossature métal. ou mixte	Moyenne à forte Faible à moyenne	Piles, fondations
Ponts à travées continues libres sur appuis - Tabliers de type dalle ou caisson - Tabliers à poutrelles enrobées - Tabliers à poutres	Faible Moyenne	Échappement longitudinal sur culées Échappement transversal
Ponts à béquille	Faible à moyenne	Piles, fondations
Ponts en arc	Moyenne	Pilettes
Ponts suspendus et à haubans	Faible à moyenne	Échappement d'appui, pylônes, risque de chocs entre tablier et pylônes
Passerelles et ponts en bois	Faible	Appareils d'appui
Ponts courbes ou biais	Moyenne à forte	Échappement d'appui

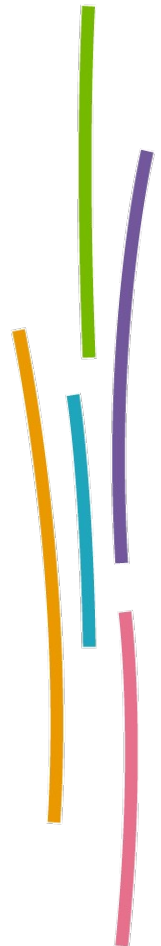
Tableau 1 : Vulnérabilités relatives et points faibles potentiels identifiés par typologies de ponts

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Méthodes d'analyse

- Méthodes de calcul pour le diagnostic sismique et domaines d'emploi

	Méthode en force monomodale	Méthode en force multimodale	Méthodes en déplacement (poussée progressive)	Analyse dynamique non linéaire
Cadres, buses, portiques	L, T			
Ponts en maçonnerie	L, T (struct. régulière)	L, T (struct. irrégulière)		
Ponts à travée unique	L, T			
Ponts à travées indépendantes	L, T			
Ponts à travées continues bloquées sur appuis (« tablier rigide par rapport aux appuis »)	L, T (enjeux faibles et struct. régulière)	T (enjeux faibles et struct. irrégulière)	L, T (enjeux moyens ou forts et struct. régulière)	L, T (enjeux moyens ou forts et struct. irrégulière)
Ponts à travées continues bloquées sur appuis (« tablier souple par rapport aux appuis »)	L (enjeux faibles ou moyens)	T (enjeux faibles ou moyens)	L, T (*) (enjeux forts et struct. régulière)	L, T (enjeux forts et struct. irrégulière)
Ponts à travées continues sur appareils d'appui souples (tablier rigide sur élastomère ou appuis glissants)	L, T		L (cas particuliers de piles très souples ou sous-dimensionnées)	



Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Méthodes d'analyse

- Méthodes de calcul pour le diagnostic sismique et domaines d'emploi

	Méthode en force monomodale	Méthode en force multimodale	Méthodes en déplacement (poussée progressive)	Analyse dynamique non linéaire
Ponts à travées continues sur appareils d'appui souples (tablier souple sur élastomères ou appuis glissants)	L, T (struct. régulière)	T (struct. irrégulière)		
Ponts à béquilles		L, T (enjeux faibles ou moyens)	L, T (*) (enjeux forts)	
Ponts suspendus et à haubans		L, T (enjeux faibles ou moyens)	L, T (*) (enjeux forts)	L, T (enjeux forts)
Passerelles	L, T (struct. régulière)	L, T (struct. irrégulière)		
Ponts courbes (angle balayé > 25°) ou biais (biais < 60°)		L, T (enjeux faibles ou moyens)		L, T (enjeux forts)
Ponts équipés de systèmes antisismiques	L, T (enjeux faibles ou moyens et struct. régulière)			L, T (enjeux forts ou struct. irrégulière)

L : direction longitudinale (les structures sont toujours considérées comme régulières selon cette direction)

T : direction transversale

() pushover multimodal à mettre en œuvre*

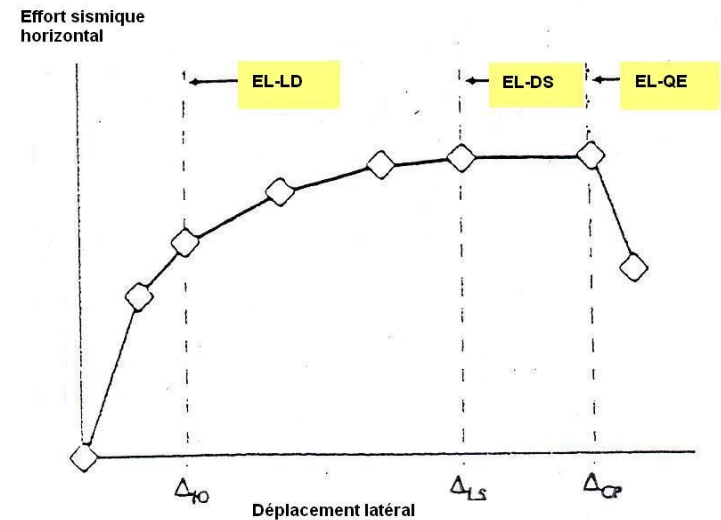
Tableau 29 : Méthodes d'analyses conseillées en fonction des typologies d'ouvrages et des enjeux

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Méthodes d'analyse

- Méthodes de calcul pour le diagnostic sismique

Etats-limites pour le diagnostic sismique



Méthodes en force ($q < 1,5$)

- EL-LD : limites élasto-plastique des matériaux
- EL-DS : résistances ELU classiques

Méthodes en déplacement

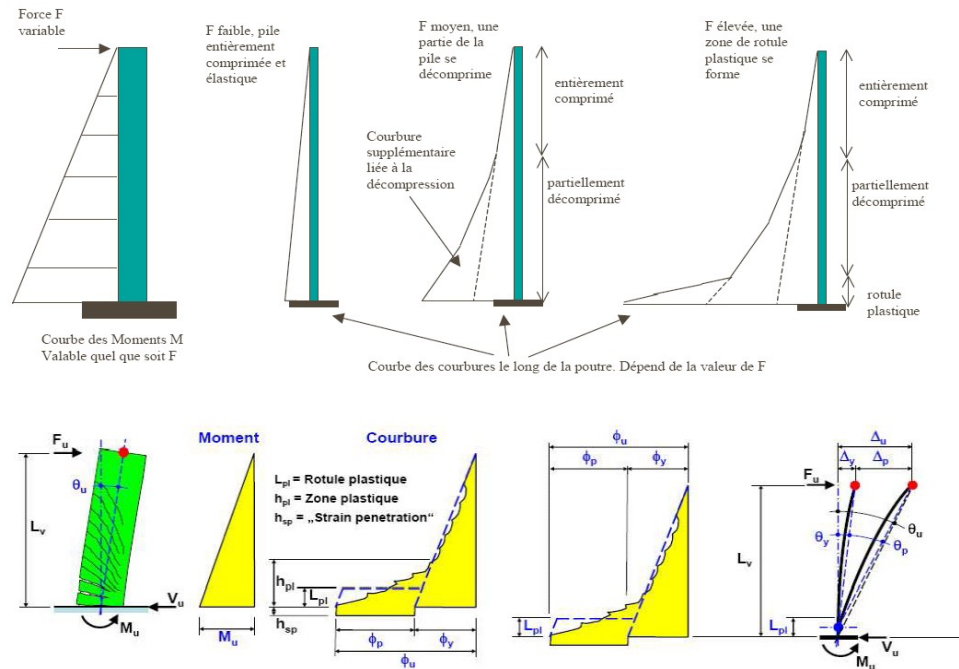
- EL-LD : limites élasto-plastique des matériaux
- EL-DS : 3/4 de EL-QE
- EL-QE : limites en déformations ultimes théoriques **réalistes** des matériaux

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Méthodes d'analyse

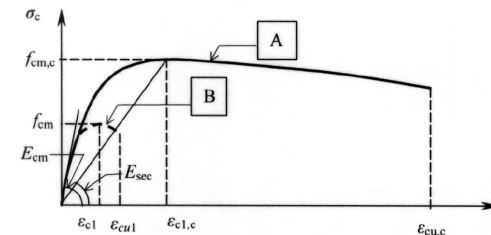
- Méthodes de calcul pour le diagnostic sismique

Évaluation des déformations ultimes des sections à partir des lois moment-courbure

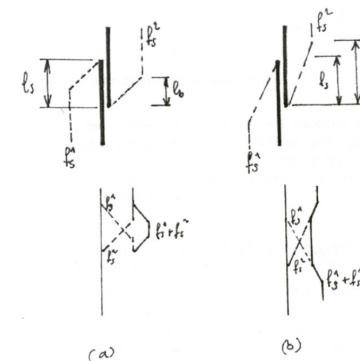


En intégrant :

- le degré de confinement du béton :



- d'éventuelles dispositions constructives défailiantes (recouvrement, flambement) :

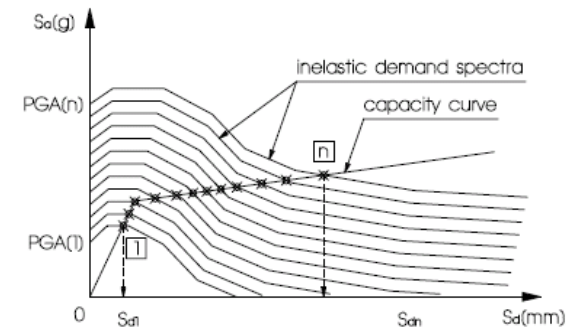
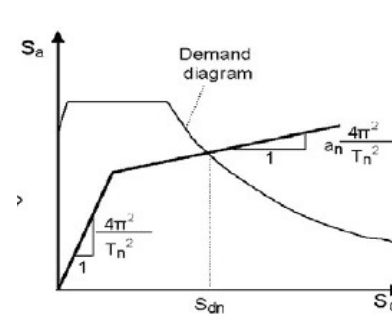
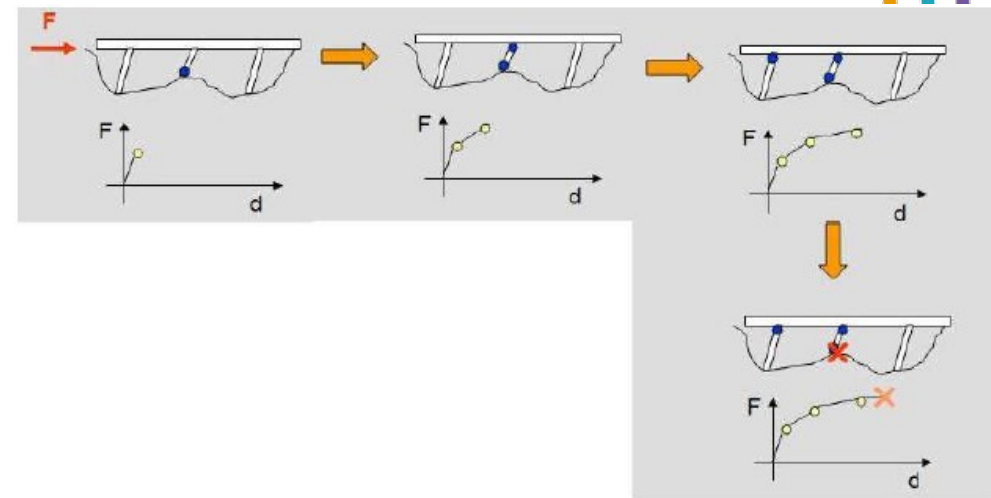
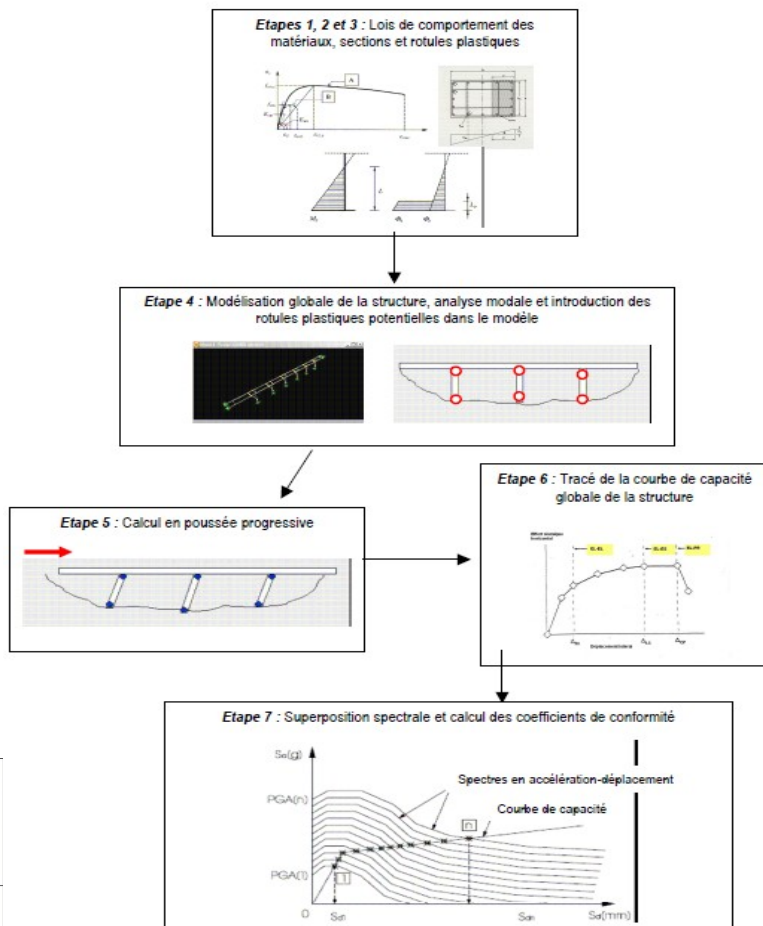


Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Méthodes d'analyse

- Méthodes de calcul pour le diagnostic sismique

Méthode en déplacement (« Push-over »)

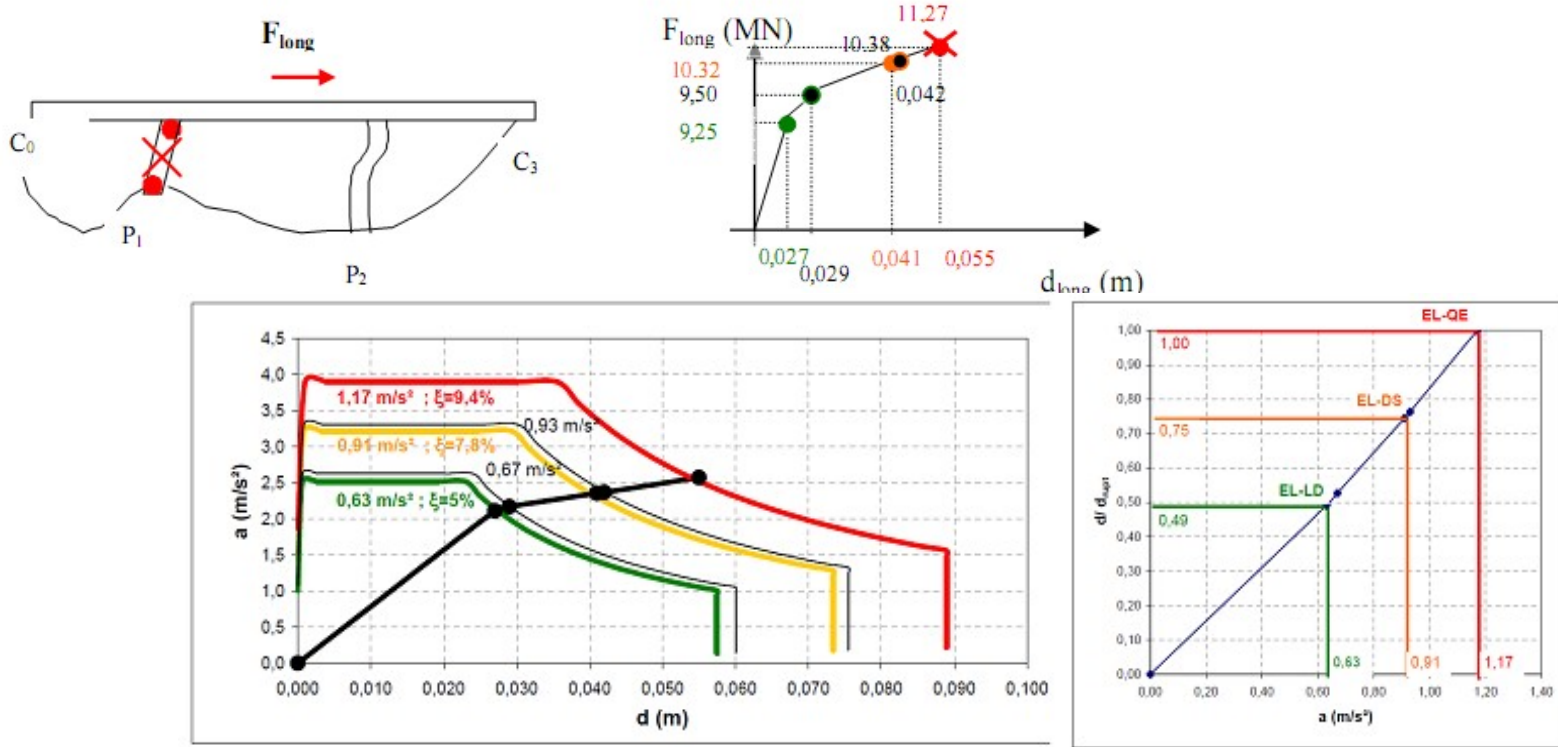


Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Méthodes d'analyse

- Méthodes de calcul pour le diagnostic sismique

Méthode en déplacement (« Push-over »)



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

b) Courbe d'endommagement

- $\alpha_{\text{conf EL-LD}} = a_{\text{max adm EL-LD}} / a_{\text{ref EL-LD}} = 0,63 / 0,90 = 0,70$
- $\alpha_{\text{conf EL-DS}} = a_{\text{max adm EL-DS}} / a_{\text{ref EL-DS}} = 0,91 / 2,24 = 0,41$

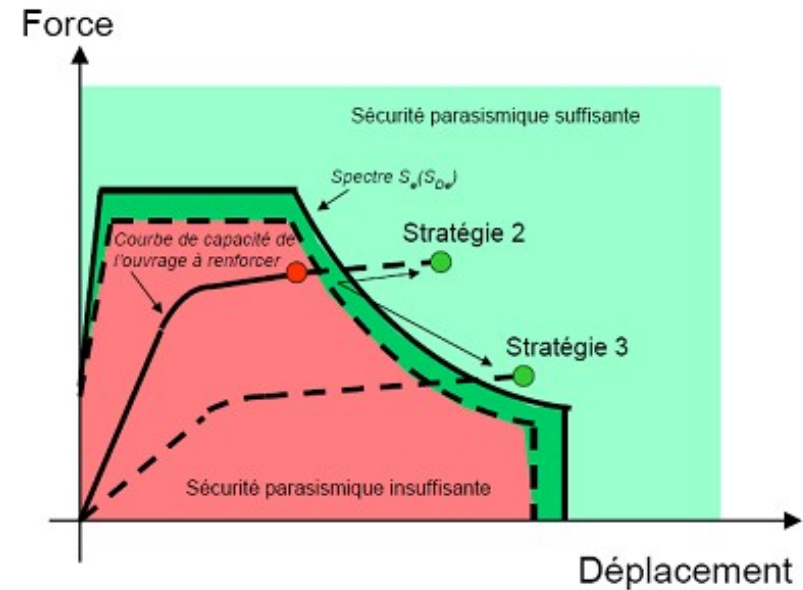
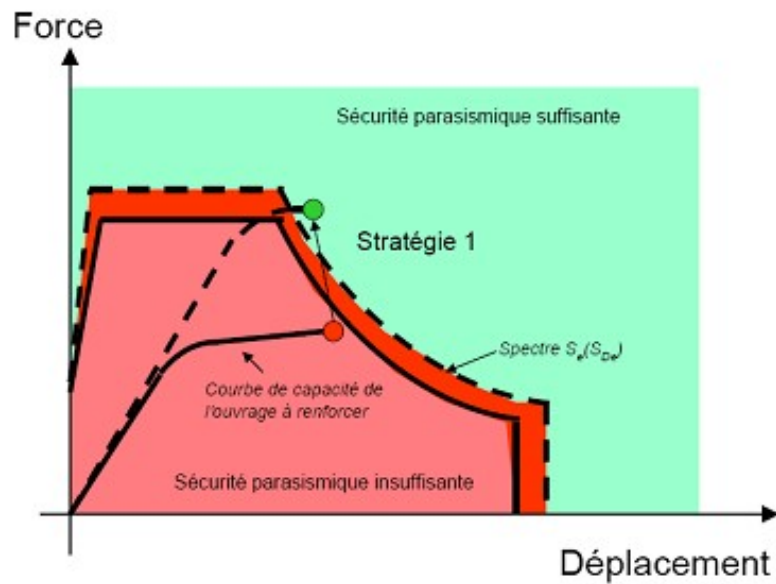
$\Rightarrow 0,7 \cdot \gamma_{\text{âge}} = 0,60 \leq \alpha_{\text{conf EL-LD}} \leq \gamma_{\text{âge}} = 0,86$
 $\Rightarrow \alpha_{\text{conf EL-LD}} \leq 0,7 \cdot \gamma_{\text{âge}} = 0,60$

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Méthodes d'analyse

- Stratégies et techniques de renforcement

Différentes stratégies possibles...



- 1 : Augmentation résistance (*attention*)
- 2 : Augmentation ductilité - chemisage
- 3 : Augmentation ductilité - suppression élé. fragile
- 4 : Assouplissement - modif. AA

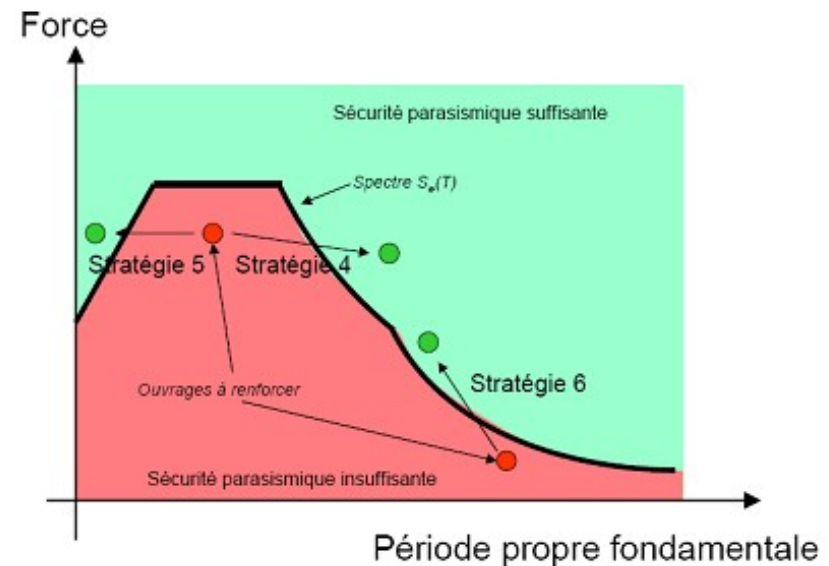
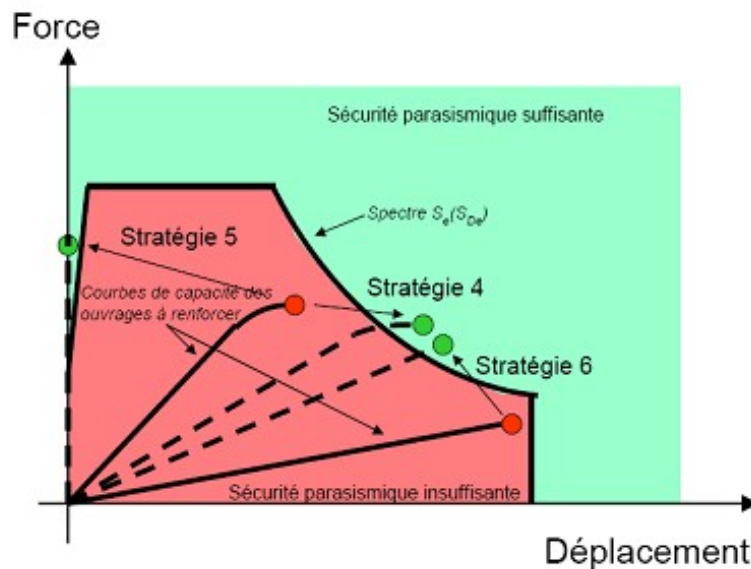
- 5 : Rigidification (*déconseillé*)
- 6 : Rigidification struct. souples – ponts suspendus
- 7 : Augmentation amortissement (disp. spéciaux)

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Méthodes d'analyse

- Stratégies et techniques de renforcement

Différentes stratégies possibles...



- 1 : Augmentation résistance (**attention**)
- 2 : Augmentation ductilité - chemisage
- 3 : Augmentation ductilité - suppression élé. fragile
- 4 : Assouplissement - modif. AA

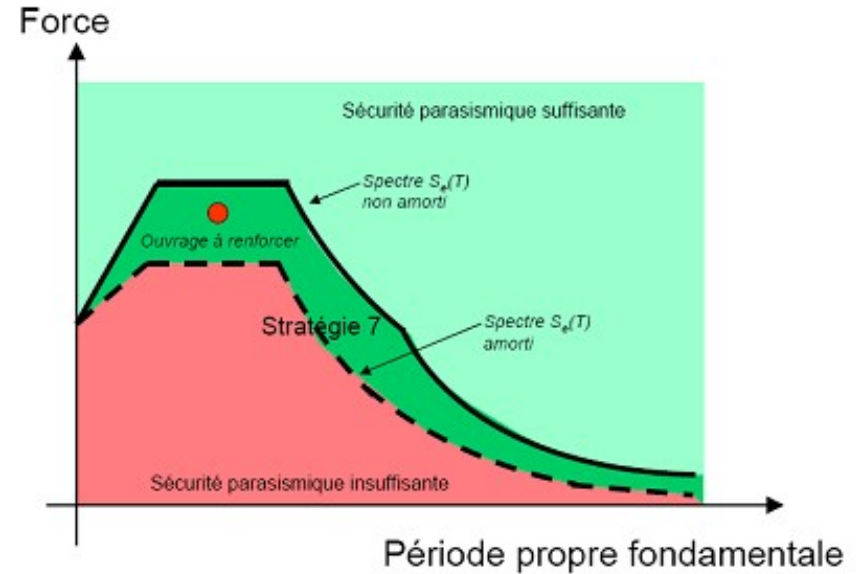
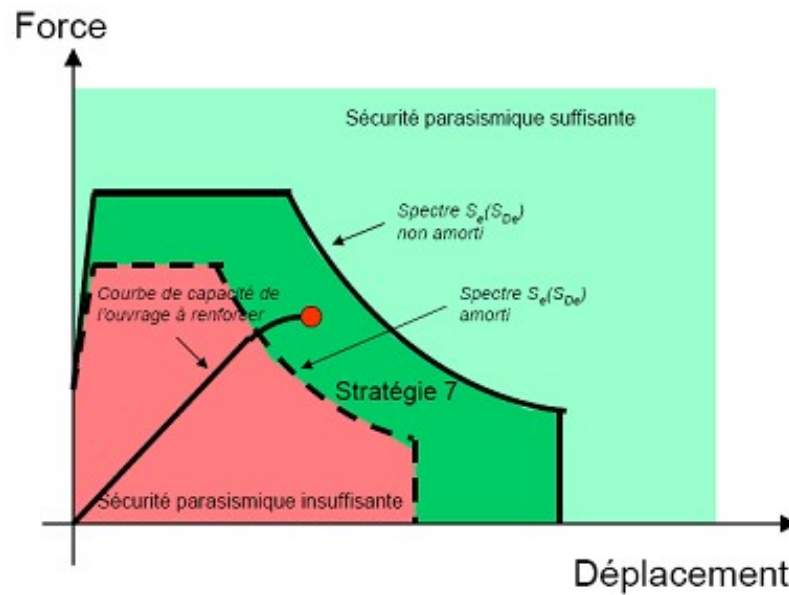
- 5 : Rigidification (**déconseillé**)
- 6 : Rigidification struct. souples – ponts suspendus
- 7 : Augmentation amortissement (disp. spéciaux)

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Méthodes d'analyse

- Stratégies et techniques de renforcement

Différentes stratégies possibles...



- 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)

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Méthodes d'analyse

- Stratégies et techniques de renforcement

Description des technologies, éléments de chiffrage et de dimensionnement

Tableau de synthèse des techniques de renforcement

TECHNIQUES	VARIANTES	OBJECTIFS				EFFETS				COUTS				Endommagement et réparation post sismique (*)
		ANTI échappement d'appui	ANTI choc	ANTI rupture Tranchant	ANTI rupture flexion	Limitation des efforts transmis aux piles	Limitation des déplacements	Augmentation de la ductilité des piles	Capacité résistante de la pile	Coût réalisation	Difficulté de conception	Difficulté réalisation	Coût entretien Inspection	
Elargissement du chevêtres (piles et culées)		+++	0	0	0	0	0	0	0	*/**	*	**	0	0
Augmentation de la capacité de déplacement du tablier au niveau des culées		0/-	+++	0	0	0	0/-	0	0	*/**	*	**	0	0
Dispositif d'attelage tabier/tablier	Mécanique	++	++	0	0	+/-	+/-	0	0	*	**	*	0/*	0/*
	Hydraulique (connecteur dynamique)	++	+++	0	0	+/-	+/-	0	0	*	**	*	**	0
Dispositif d'attelage tabier-appui	Hydraulique	+++	+++	--	--	++/.. ⁽¹⁾	+++	0	0	*	**	*	**	0
	Mécanique (Butée)	+++	++	--	--	++/.. ⁽¹⁾	+++	0	0	*	**	*	0	*
Modification de la période (assouplissement)	Introduction de ressort souple (appui Elastomère fretté/appuis glissants)	.. ⁽²⁾	.. ⁽²⁾	++	++	++	--	0	0	* ⁽³⁾	*	**	*	0/*
Amortissement	Elastoplastique visqueux	+	+	++	++	++	+	0	0	* ⁽³⁾	***	*/**	0/*	*
		+	+	++	++	++	+	0	0	*	***	*	**	0
Fusible		--	-	+++	+++	+++	--	0	0	*	*/** ⁽⁴⁾	*	0/*	*
Chemisage partiel sans liaison semelle (dans la zone de la rotule plastique)	Acier	0	0	-	+++	+/-	+	+++	+	*/**	*	**	0/*	**
	Composite	0	0	0	+++	+	0	+++	0	*/**	*	*	0/*	**
	Béton	0	0	--	+++	+/-	+	++	++	*/**	*	**	0	**
Chemisage total sans liaison semelle (toute hauteur)	Acier	0	0	+++	+++	+/-	+	+++	++	*/**	*	**/**	0/*	**
	Composite	0	0	+++	+++	0	0	+++	+	*/**	*	*/**	0/*	**
	Béton	0	0	+++/-	+++	+/-	+	++	+++	*/**	*	**/**	0	**
Chemisage total avec liaison semelle	Acier	0	0	+++/-	+++/-	+/-	+	++/- ⁽⁶⁾	+++	**	**	**/**	0/*	**
	Composite	0	0	+++/-	+++/-	+/-	0	++/-	++	**	**	*/**	0/*	**
	Béton	0	0	+++/-	+++/-	---	+	++/-	+++	**	**	**/**	0	**
Renforcement de la semelle et des fondations		0	0	++	++	0	0	0	+++	***	**	***	0	**

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Méthodes d'analyse

- Stratégies et techniques de renforcement

Description des technologies, éléments de chiffrage et de dimensionnement

Légende effets	
effet largement positif	+++
effet positif	++
effet légèrement positif	+
Pas d'effet	0
Effet négatif possibles	-
Effet potentiellement négatif sensible à évaluer	--
Effet négatif pouvant annuler l'effet positif voire rendre la structure dangereuse	---

Légende : difficulté de conception	
Accessible sans modèle complexe	*
Nécessite spécialiste et modèle complexe	**
Nécessite un expert car risques	***

Légende : difficulté réalisation	
Rapide, faible impact trafic	*
Impact trafic et durée moyenne	**
Long, fort impact trafic ou Multi métiers	***

Légende : Coût de réalisation	
0	< 1% du coût de remplacement de l'ouvrage
*	1 à 3 % du coût de remplacement de l'ouvrage
**	3 à 10 %
***	> 10 %

Légende : Coût d'entretien	
0	Entretien et inspection classique
*	Inspection et entretien spécifique à intégrer
**	spécialisé par personnel qualifié
***	Durée de vie limitée: prévoir remplacement

Légende endommagement et réparation post-	
0	inspection
*	Travaux légers de remplacement du dispositif
**	Travaux de réparation structurelle

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Exemple d'étude de diagnostic/renforcement sismique *Cas d'un ouvrage autoroutier non-courant : Viaduc de Tech sur l'A9*

- Contexte général

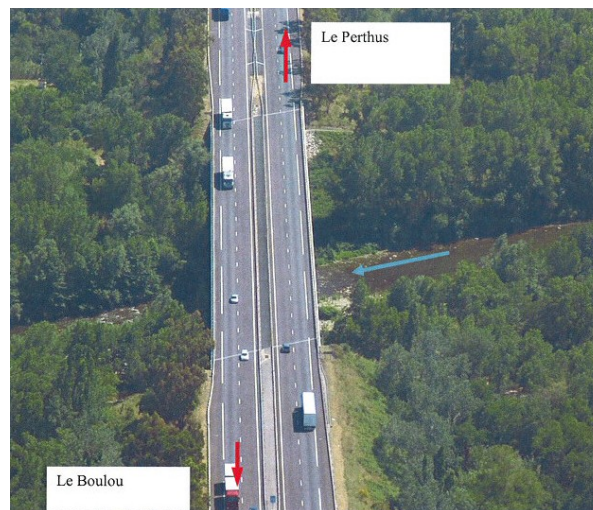
Mise à profit d'un élargissement d'ouvrage pour durcissement au séisme

Demande explicite de prise en compte par la DGITM (concedant) validée par Décision Ministérielle

Maître d'ouvrage / Concessionnaire : ASF

Maître d'oeuvre / Bureau d'études : SETEC TPI

Assistance Maîtrise d'Ouvrage : CETE Méditerranée / Sétra



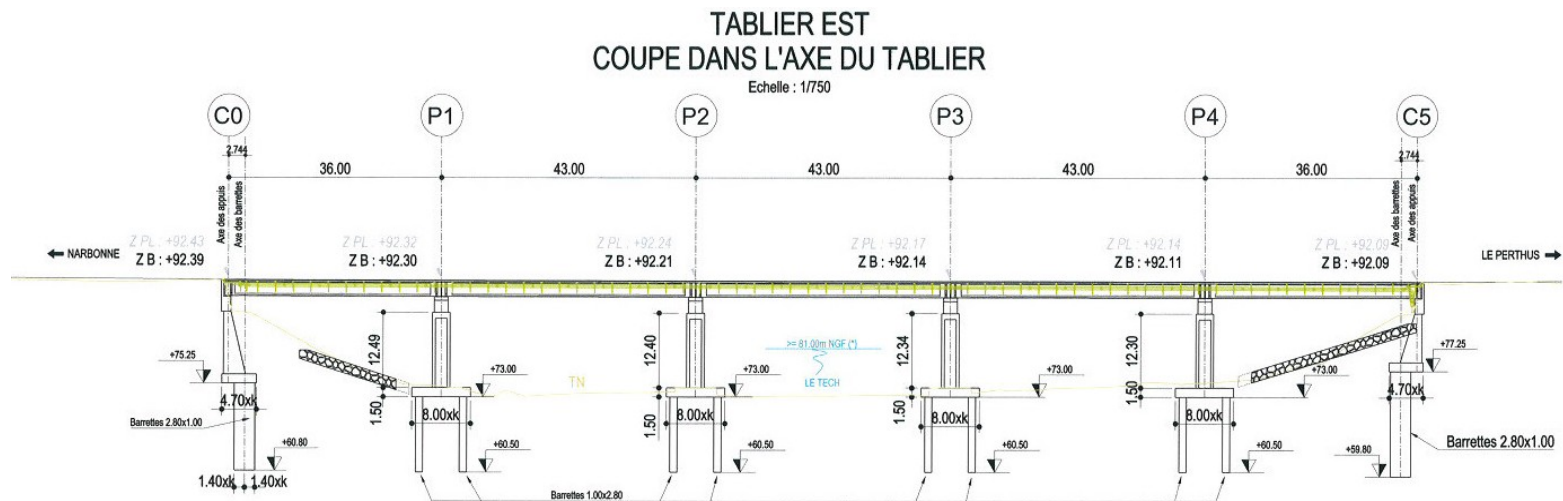
Localisation :

Tronçon Le Boulou – Le Perthus
entre Perpignan et l'Espagne

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Exemple d'étude de diagnostic/renforcement sismique Cas d'un ouvrage autoroutier non-courant : Viaduc de Tech sur l'A9

- Description de l'ouvrage
 - VIPP à 2 tabliers parallèles (*vide central* : 2m)
 - Longueur totale : 201 m
 - 5 travées : 36m – 3x43m – 36m
 - Année de construction : 1970
 - Tracé : Rectiligne, biais = 60 gr

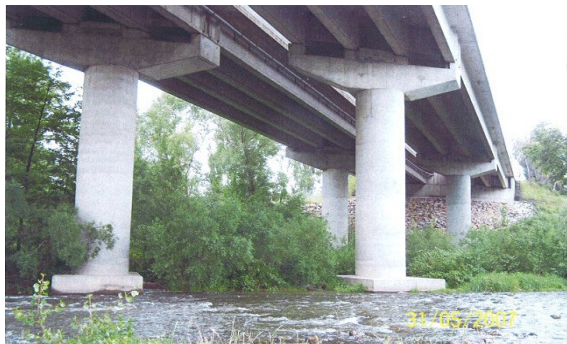


Biais = 60 gr - k = 1/sin 60gr = 1.236067977

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Exemple d'étude de diagnostic/renforcement sismique Cas d'un ouvrage autoroutier non-courant : Viaduc de Tech sur l'A9

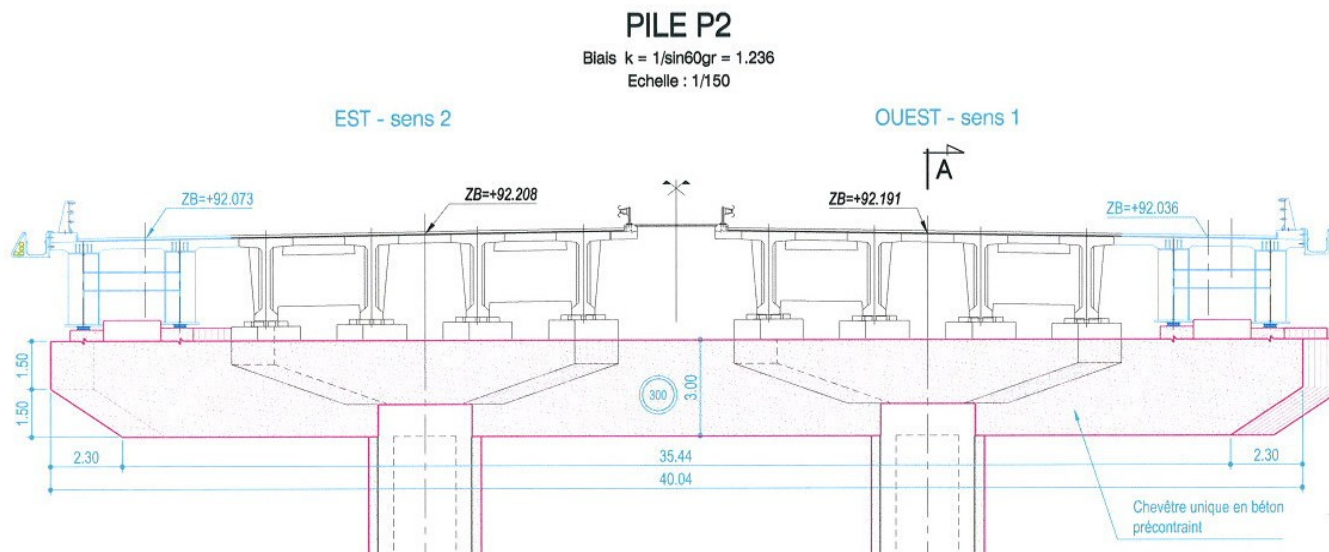
- Description de l'ouvrage
 - **Conception des appuis :**
 - Piles marteaux (fûts cylindriques creux ϕ 3m ext – 2m int)
 - Hauteur régulières : 14,30m à 14,50m
 - Fondations sur barrettes profondes 14,50m ancrées dans substratum marneux
 - Piles-culées enterrées, hauteur : 8m
 - AA élastomère fretté, plaques de glissement sur culées
 - Butées transversales de sécurité sur piles et culées
 - **Attelage des travées par continuité du hourdis sur appuis**
 - **Dimensionnement parasismique selon les règles PS69**



Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Exemple d'étude de diagnostic/renforcement sismique Cas d'un ouvrage autoroutier non-courant : Viaduc de Tech sur l'A9

- Description de l'ouvrage
 - Etude menée dans la configuration élargie : 11m + 4,20m par tablier



Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Exemple d'étude de diagnostic/renforcement sismique Cas d'un ouvrage autoroutier non-courant : Viaduc de Tech sur l'A9

- Hypothèses sismiques
 - Zone 3 (sismicité modérée) : $a_{gr} = 1,1 \text{ m/s}^2$
 - Sol de classe D : $S = 1,6$
 - Coefficient topo : $\tau = 1,0$
 - Indice d'importance :

$$I = I_{itin 1} + I_{OA 1} + I_{itin 2} + I_{OA 2} = 44 + 10,5 + 19,5 + 6 ; \text{ soit } I = 80.$$

➔ **Catégorie III : $\gamma_I = 1,2$**

➔ **$a_g = \gamma_I \cdot a_{gr} = 1,2 \times 1,1 = 1,32 \text{ m/s}^2$**



Détermination de l'indice d'importance associé à la valeur socio-économique des ouvrages

I _{itin 1} (court terme)	Victimes directes				I _{vict_itin} = 8,5	
	Trafic (en véh/j)	<1000 : 2	1k<.. <lt;10k 4<="" :="" td=""> <td>>10 000 : 7</td> <td>7</td> </lt;10k>	>10 000 : 7		7
	Fréquence embouteillages	nulle : 0	moyenne : 1,5	élevée : 3		1,5
	Evacuation des populations				I _{Evac_itin} = 10	
	Rôle identifié (PPRS)	oui : 10		non : 0		10
	Organisation des secours				I _{Sec_itin} = 16	
	Itinéraire vital au sens des PIS	oui : 8		non : 0		8
	Rôle de desserte d'équip. stratégiques pour la sécu. civile (pompiers, base militaire, hôpitaux...)	oui : 8		non : 0		8
	Réseaux vitaux portés				I _{Rés_itin} = 2,5	
	Eau	oui : 2,5		non : 0		0
	Electricité	oui : 2,5		non : 0		0
	Gaz	oui : 2,5		non : 0		0
	Communication (fibres optiques, tel...)				2,5	
Itinéraires parallèles et rétablissements provisoires d'urgence				I _{Para1_itin} = 7		
Présence d'itinéraire parallèle à moins de 3 km	oui : 0		non : 7		0	
Possibilité de rétablissement provisoire d'urgence en cas effondr. ponts, chutes blocs... (durée < qq jours)	oui : 0		non : 7		7	

$$I_{mn 1} = 44,0$$

$$(\text{= } I_{vict_itin} + I_{Evac_itin} + I_{Sec_itin} + I_{Rés_itin} + I_{Para1_itin})$$

Commentaires
actuellement plus de 20 000 véh/j/sens moyenne à défaut d'informations
à priori
à priori
à priori
fibres optiques
RD 900 en France et route nationale N11 en Espagne présence de grands viaducs

I _{itin 2} (long terme)	Rôle socio-économique				I _{Soc_itin} = 9		
	Type voirie	VC : 0	RD : 0,5	RN : 1		Autoroute : 1,5	1,5
	Nb voies/sens	1 voie : 0,5		2 voie : 1		>= 3 voies : 1,5	1,5
	Trafic (en véh/j)	<1000 : 0,5		1k<.. <lt;10k 1<="" :="" td=""> <td>>10 000 : 1,5</td> <td>1,5</td> </lt;10k>	>10 000 : 1,5	1,5	
	Trafic PL	faible : 0,5		normal : 1	élevé : 1,5	1,5	
	Rôle de desserte	village 0	agglom., pôle d'act. 1	régional 1,5	national 2	2	
	Réseaux portés	oui : 1		non : 0	1		
	Itinéraires parallèles suffisamment proches et redondants pour offrir le même niveau de service ?				I _{Para2_itin} = 4,5 (= γ _{para2} × I _{Soc})		
	Perte de temps engendrée :	< 30 mn : 0	30 < < 90 mn : 0,5	> 90 mn : 1		γ _{para2_itin} = 0,5	
	Facilité de renforcement par rapport aux itinéraires parallèles				I _{Coût_itin} = 0		
	Accessibilité (niveau urbanisation, zone montagne...)	inf. ou = : 0		supérieure : 2		0	
	Nbre OA L>10m, constr<1995 par rapport itin parall	inférieur : 1		supérieur ou = : 0		0	
	Nbre murs H>6m, constr<1995 par rapport itin parall	inférieur : 1		supérieur ou = : 0		0	
Nbre tunnels, constr<1995 par rapport itin parall	inférieur : 1		supérieur ou = : 0	0			
Risque effets induits (liq. blocs...) par rapport itin parall	inférieur : 1		supérieur ou = : 0	0			
Aspect environnemental				I _{Env_itin} = 3			
Embouteillage, émission CO ₂ prévisibles sur itin para	oui : 3		non : 0		3		
Retombées pour le gestionnaire				I _{Conc_itin} = 3			
Coûts induits	Faibles : 0,5		Modérés : 1		Forts : 1,5	1,5	
Retombées médiatiques	régionales : 0,5		nationales : 1		internationales : 1,5	1,5	

$$I_{mn 2} = 19,5$$

$$(\text{= } I_{Soc_itin} + I_{Para2_itin} + I_{Coût_itin} + I_{Env_itin} + I_{Conc_itin})$$

Commentaires
après élargissement actuellement plus de 20 000 véh/j/sens
fibres optiques
RD 900 très proche mais niveau de service moindre
présence de viaducs avec piles peu accessibles 14 PI pour la RD900 et N11 contre 6 PI pour l'A9 et AP7
embouteillage
péage par excès en raison de la proximité de la frontière espagnole

Nom de l'ouvrage : VIADUC DU TECH

Itinéraire associé : Itinéraire compris entre les échangeurs du Boulou et de la Jonquera (15 km env. dont environ 9 km sur A9 en France et 6 km sur AP7 en Espagne)

Détermination de l'indice d'importance associé à la valeur socio-économique des ouvrages

Ouvrage	Victimes directes				$I_{Vct_OA} = 7,5$	
	Trafic sur l'ouvrage (en véh/j)	<1000 : 1	1k<..<10k : 2	>10 000 : 3		3
	Surface de tablier (m ²)	< 200 : 1	200<<4000 : 2	> 4000 : 3		3
	Fréq embouteillage sur ouvrage	nulle : 0	moyenne : 1,5	élevée : 3		1,5
	Voie franchie :					
	Type de voirie	RD, frêt SnCF : 1	RN, TER : 2	Autoroute, TGV : 4	0	
	Trafic sous l'ouvrage (en véh/j)	<1000 : 1	1k<..<10k : 2	>10 000 : 4	0	
	Fréq embouteillages sous ouvrage	nulle : 0	2	élevée : 4	0	
	Réseaux vitaux franchis		oui : 2	non : 0	0	
	Organisation des secours				$I_{Sec_OA} = 0$	
	Franchissement d'un itinéraire vital au sens des PIS		oui : 4	non : 0		0
	Desserte immédiate de centre vital (caserne pompier, hôpital, base militaire, préfecture...)		oui : 4	non : 0		0
	Possibilités de rétablissement à court terme pour véhicules de secours				$I_{Rétab_OA} = 3$	
	Réparabilité (pont courant à typologie peu vulnérable)		oui : - 2	non : 3		3
Possib. de pont de secours (portée<40 m)		oui : - 3	non : 3	3		
Possib. de déviation locale (échangeur, nœud urbain)		oui : - 3	non : 3	-3		

$I_{OA1} = 10,5$
 (= $I_{Vct_OA} + I_{Sec_OA} + I_{Rétab_OA}$)

Ouvrage	Rôle socio-économique voie franchie				$I_{Soc_OA} = 0$		
	Type voirie	VC : 0	RD : 1	RN, frêt, TER : 2		Autoroute, TGV : 3	0
	Nb voies	1 voie : 0	2 voies : 0,5	3 ou 4 voies : 1		>= 5 voies : 2	0
	Trafic (en véh/j)		<1000 : 0	1k<..<10k : 0,5		>10 000 : 1	0
	Trafic PL		faible : 0	normal : 0,5		élevé : 1	0
	Rôle de desserte	village 0	aggl. pôle d'act. 0,5	régional 1		national 2	0
	Réseaux franchis			oui : 1	non : 0	0	
	Possibilités de reconstruction de l'ouvrage				$I_{Rec_OA} = 4$		
	Durée de reconstruction	< 6 mois : -1	6<< 24mois : 2	> 2 ans : 4		4	
	Valeur intrinsèque de l'ouvrage				$I_{Val_OA} = 2$		
	Coût	< 1 M € : 0,5	1 << 15 M € : 1	15 << 60 M € : 2		> 60 : 4	2
Valeur patrimoniale historique (ouvrage classé)		oui : 2	non : 0	0			

$I_{OA2} = 6,0$
 (= $I_{Soc_OA} + I_{Rec_OA} + I_{Val_OA}$)

$I_1 = I_{Itin1} + I_{OA1} = 54,5 / 100$ (court terme, gestion crise)
 $I_2 = I_{Itin2} + I_{OA2} = 25,5 / 50$ (long terme, reprise activité socio-éco.)

$I = I_1 + I_2 = 80,0 / 150$

(0 < I < 50 : Importance socio-économique faible)
 (50 < I < 100 : Importance socio-économique moyenne)
 (100 < I < 150 : Importance socio-économique élevée)

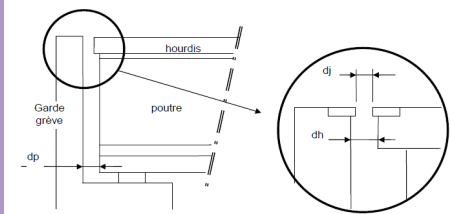
Commentaires
 actuellement environ 20 000 véh/j/sens
 2 x 3070 = 6140 m² après élargissement des tabliers
 moyenne à défaut d'informations
 cours d'eau
 proximité de l'échangeur du Boulou

Commentaires
 cours d'eau
 études comprises
 30 M€ coût de reconstruction (sans démolition)

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Exemple d'étude de diagnostic/renforcement sismique Cas d'un ouvrage autoroutier non-courant : Viaduc de Tech sur l'A9

- Résistances élémentaires de la structure existante et analyse des points faibles



Parties d'ouvrage	Critère de défaillance	Acc. limite admissible	Conséquences prévisibles
Tabliers	- Souffle des joints de chaussée	0,24 m/s ²	- Risque de choc associé à un endommagement des culées
	- Souffle des abouts de hourdis	0,51 m/s²	- Risque de choc associé à un endommagement des culées
	- Souffle des abouts de poutres VIPP	1,35 m/s ²	- Risque de choc associé à un endommagement des culées et des ancrages de précontrainte
	- Résistance du hourdis de continuité des travées	> 1,32 m/s ²	- Risque d'échappement d'appui longitudinal
	- Débattement transversal des tabliers	> 1,32 m/s ²	- Risque d'échappement d'appui transversal
Appareils d'appui	- Distorsion des appareils d'appui	1,07 m/s ²	- Endommagement ou rupture des élastomères associés à un tassement d'appui du tablier et un risque d'échappement d'appui
Piles	- Résistance au tranchant des fûts	0,32 m/s²	- Rupture de pile et effondrement de l'ouvrage
	- Résistance à la flexion des fûts P2 et P3	0,39 m/s²	- Endommagement ou rupture de pile
	- Résistance à la flexion des fûts P1 et P4	0,49 m/s²	- Endommagement ou rupture de pile
	- Résistance des semelles	> 1,32 m/s ²	- Endommagement des semelles
	- Résistance des barrettes	0,40 m/s²	- Perte de portance de l'ouvrage
Culée	- Résistance des poteaux	< 0,40 m/s²	- Basculement des culées et risque d'effondrement des travées de rive
	- Résistance des barrettes	< 0,40 m/s²	- Basculement ou perte de portance des culées et risque d'effondrement des travées de rive

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Exemple d'étude de diagnostic/renforcement sismique *Cas d'un ouvrage autoroutier non-courant : Viaduc de Tech sur l'A9*



- Différentes solutions de renforcement testées

- *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*

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Exemple d'étude de diagnostic/renforcement sismique Cas d'un ouvrage autoroutier non-courant : Viaduc de Tech sur l'A9

- Analyse comparative

Combinaisons de solutions	Accélération max admissible (m/s ²)	A _{adm} /A _{ref} (%)	Partie défaillante	Prix (k€HT) Valeur juin 2007	Indice de rentabilité R	Impact environnement (**)	Gêne à l'utilisateur (**)	Classement
Borne inf.	<0,24 m/s ²	<18 %	souffle	0 k€	0	0	0	Solution écartée.
Solution 0	0,32 m/s ²	24 %	Fûts de piles	74 k€	0,109	0	1	Solution écartée
Combinaison 0+E	< 0,40 m/s ²	< 30 %	Barrettes de piles et culées	692 k€	0,182	0	1	Solution écartée
Combinaison 0+C+E	< 0,40 m/s ²	< 30 %	Poteaux et barrettes culées	746 k€	0,179	0	1	Solution écartée
Combinaison 0+C+E+H	0,63 m/s ²	48 %	Barrettes de piles	1423 k€	0,461	1	1	Solution écartée
Combinaison 0+C+E+H+I	0,66 m/s ²	50 %	Appareils d'appui	1754 k€	0,482	1	1	Solution écartée
Combinaison 0+E+F+H	0,84 m/s ²	64 %	Barrettes de piles	2804 k€	0,669	1	1	5
Combinaison 0+E+G+H	1,07 m/s ² (1) 1,13 m/s ² (2)	81 % (1) 86 % (2)	App. d'appui (1) Barrettes piles (2)	2901 k€	1,033	1	1	4
Combinaison 0+C+E+F +H+I	1,25 m/s ²	0,95 %	Barrettes de piles	3189 k€	1,228	1	1	3
Combinaison 0+E+G+H+I	# 1,32 m/s ²	# 100 %	Barrettes piles	3232 k€	1,324	1	1	1
Combinaison 0+C+E+G +H+I	>1.32 m/s ²	>100 %	ND	3286 k€	1,321	1	1	2
Borne sup	≥ 1.32 m/s ²	≥ 100 %	ND	15 100 k€ (*)	0,2	3	0	6

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Exemple d'étude de diagnostic/renforcement sismique Cas d'un ouvrage autoroutier non-courant : Viaduc de Tech sur l'A9

- Analyse comparative

$$R = \gamma_{\text{enjeu}} \cdot \frac{\Delta a_{\text{renf}}}{\gamma_{\text{âge}} \cdot a_{\text{ref}} - a_{\text{max adm}}} - \frac{C_{\text{renf}}}{C_{\text{repl}}}$$

Avec :

- $\gamma_{\text{enjeu}} = 1,2$ pour un ouvrage de catégorie d'importance II ;
- $\gamma_{\text{âge}} = 0,82$ en considérant 1976 pour l'année de mise en service de l'ouvrage existant, 2017 pour la réalisation des travaux de renforcement et une durée de vie théorique totale de 100 ans (sauf solution de « démolition/reconstruction » pour laquelle $\gamma_{\text{âge}} = 1$) ;
- $a_{\text{ref}} = 1,32 \text{ m/s}^2$
- $a_{\text{max adm}} = 0,24 \text{ m/s}^2$: accélération admissible de la structure existante en l'état ;
- Δa_{renf} = gain d'accélération admissible par rapport à la borne inférieure ;
- C_{renf} : coût associé à la solution de renforcement en k€ HT
- $C_{\text{repl}} = 15100 \text{ k€ HT}$ (coût associé à la démolition/reconstruction de l'ouvrage)

$$R = 1,2 \frac{a_{\text{max adm solution}} - 0,24}{0,82 \times 1,32 - 0,24} - \frac{C_{\text{renf solution}}}{15100}$$

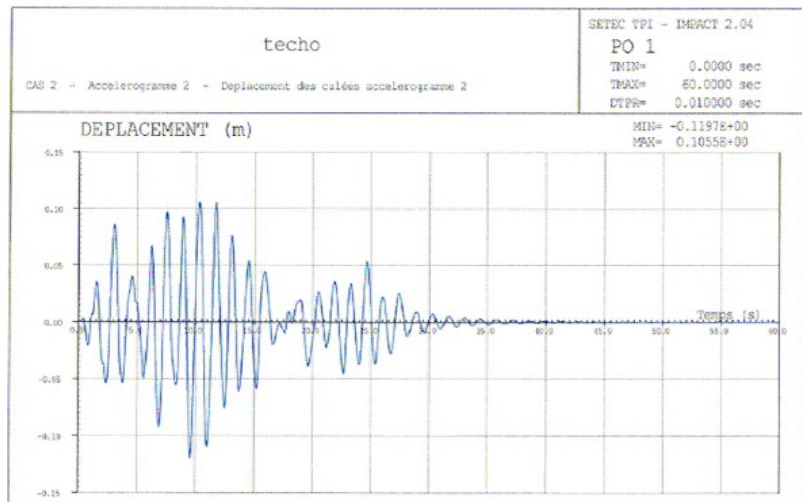
Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Exemple d'étude de diagnostic/renforcement sismique Cas d'un ouvrage autoroutier non-courant : Viaduc de Tech sur l'A9

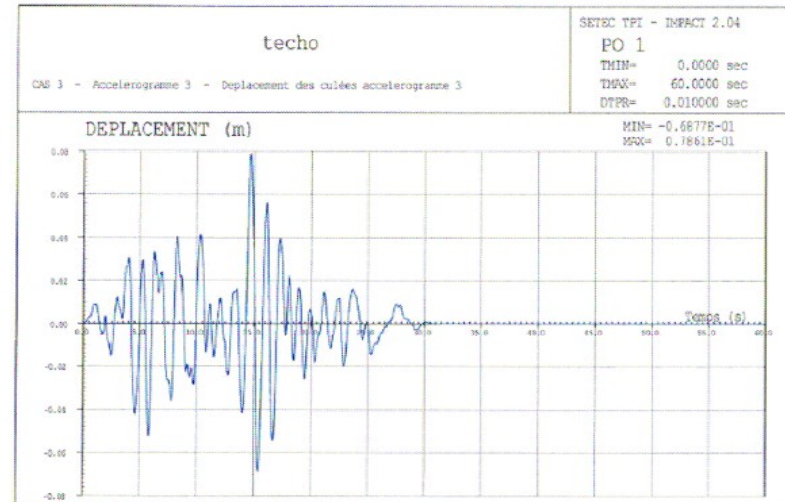
- Calculs justificatifs

La solution de renforcement retenue impliquant l'utilisation de dispositifs amortisseurs au comportement fortement linéaire et dépendant des vitesses de sollicitations (amortisseurs visqueux), les calculs de justification sont menés à partir d'une analyse dynamique temporelle non-linéaire par pas de temps à l'aide d'un logiciel spécifique (Impact[®]).

Ces calculs montrent que l'utilisation des amortisseurs permet de réduire les niveaux de déplacement d'environ 40% (réduits de 12 à 7 cm environ).



Solution 0



Solution 0+I

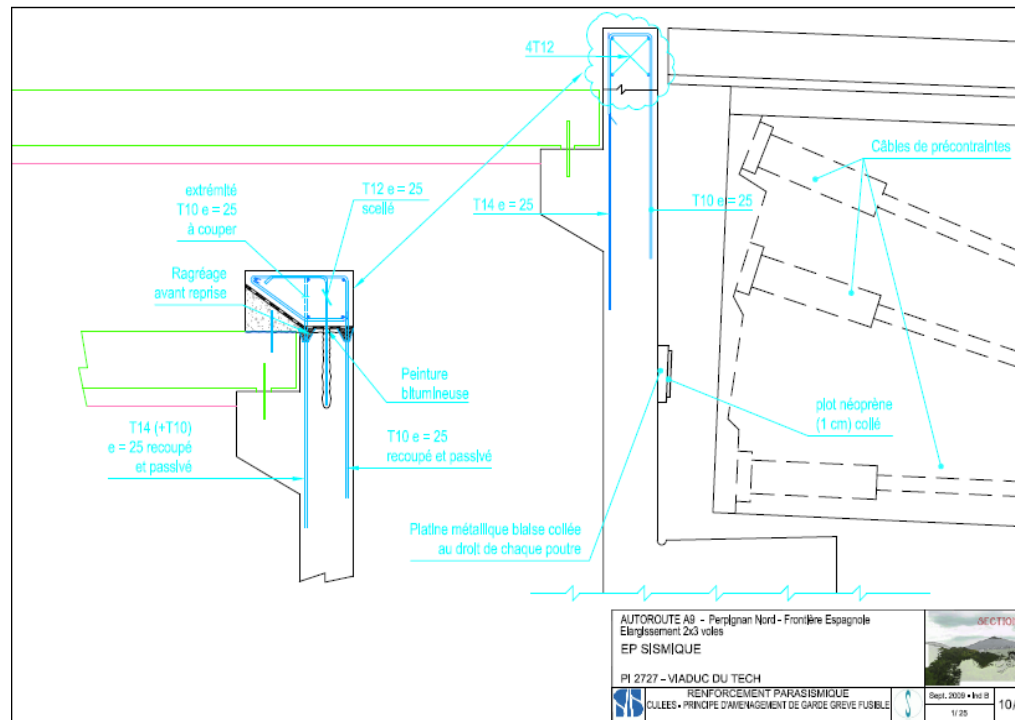
Déplacements calculés par l'analyse dynamique temporelle avec et sans amortisseurs

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Exemple d'étude de diagnostic/renforcement sismique Cas d'un ouvrage autoroutier non-courant : Viaduc de Tech sur l'A9

- schémas de principes des renforcements

Aménagement du garde-grève fusible (solution 0)

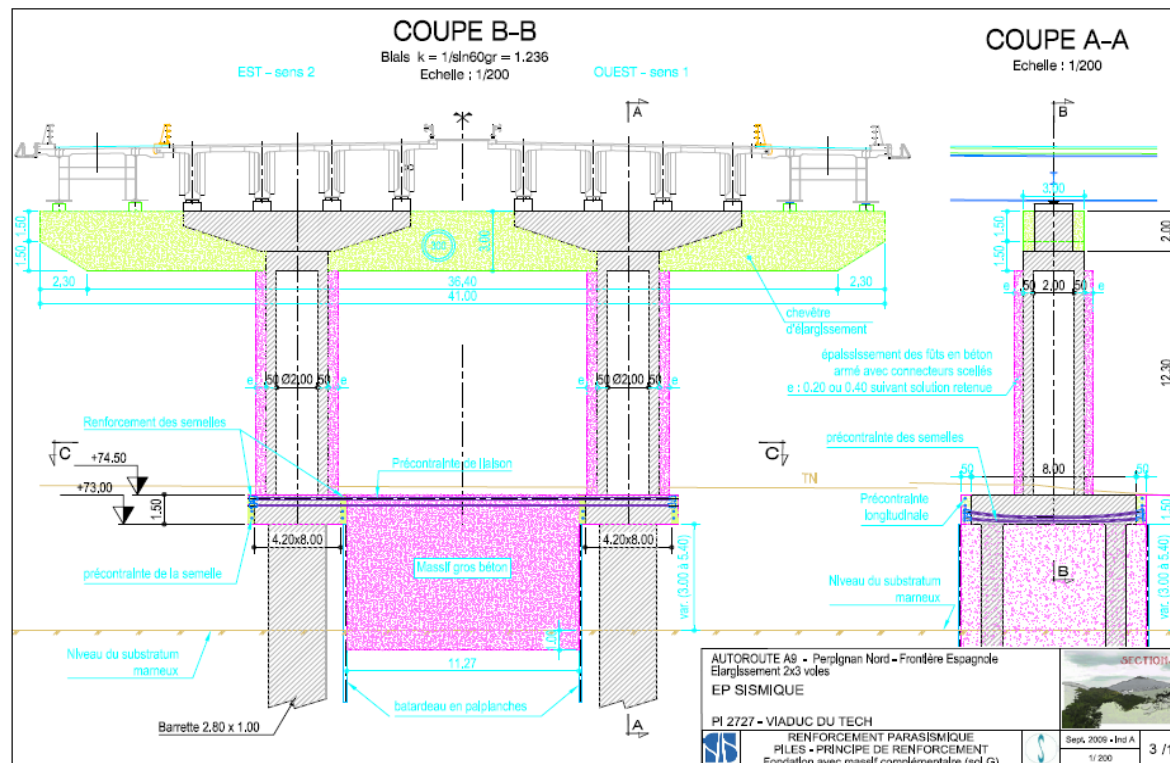


Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Exemple d'étude de diagnostic/renforcement sismique Cas d'un ouvrage autoroutier non-courant : Viaduc de Tech sur l'A9

- schémas de principes des renforcements

Épaississement en béton armé des fûts et réalisation d'un massif rigide complémentaire pour les fondations de piles (solutions E+G)

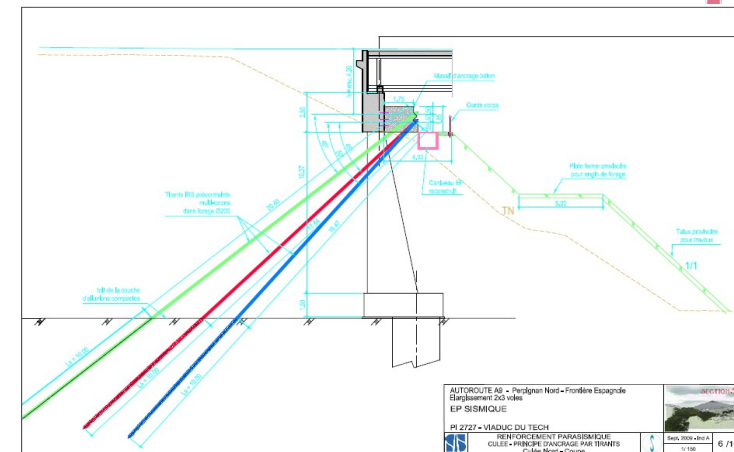
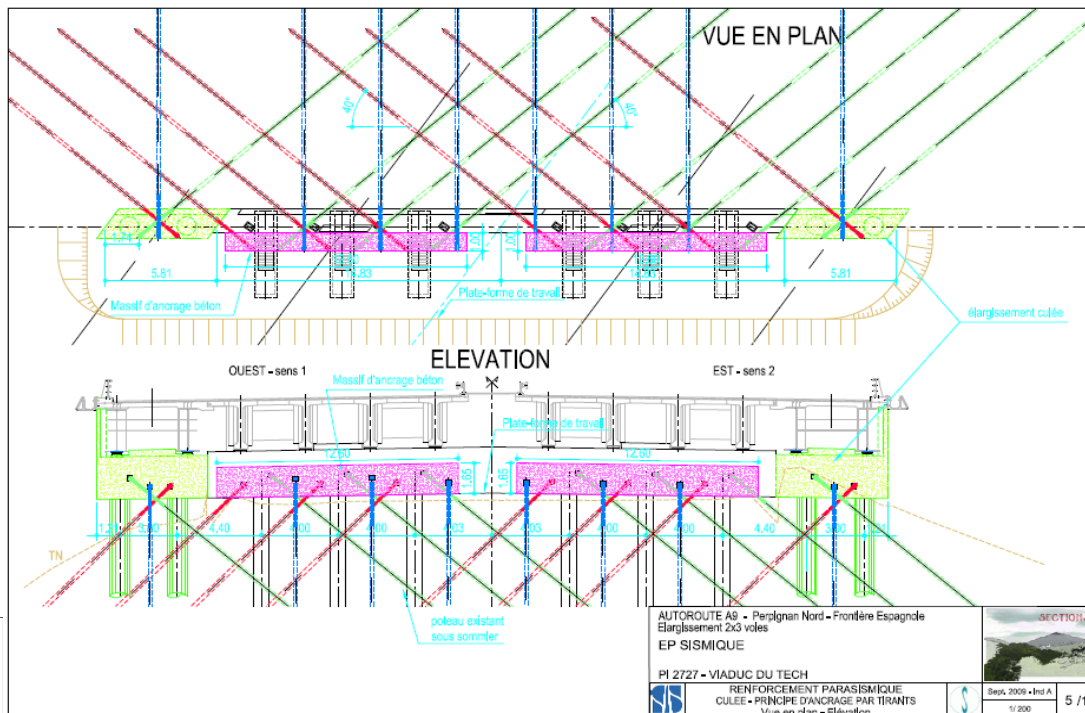


Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Exemple d'étude de diagnostic/renforcement sismique Cas d'un ouvrage autoroutier non-courant : Viaduc de Tech sur l'A9

- schémas de principes des renforcements

Ancrage des têtes de culées par tirants précontraints (solution H)



Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (3/4)

Exemple d'étude de diagnostic/renforcement sismique Cas d'un ouvrage autoroutier non-courant : Viaduc de Tech sur l'A9

- schémas de principe des renforcements

Mise en œuvre d'amortisseurs au droit des culées (solution I)

