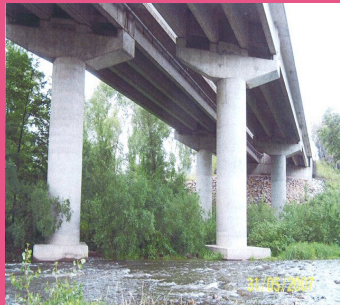
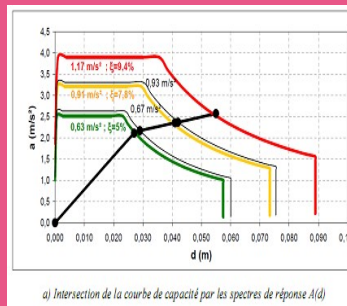


Journée technique

PRISE EN COMPTE DU RISQUE SISMIQUE

Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes : *Démarche générale et méthodes d'analyse*



Denis DAVI - CETE Méditerranée



Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

Contenu de l'exposé

- L'identification des ouvrages prioritaires
- Démarche générale pour les études de diagnostic/renforcement et niveau de performance visé
- Reconnaissances à mener pour le diagnostic sismique et méthodes d'analyses
- Exemple d'étude de diagnostic/renforcement sismique

Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

L'identification des ouvrages prioritaires

- Dans la continuité des approches Sismoa/Sisroute

1ère étape : Estimation de la vulnérabilité sur la base de critères qualitatifs typologiques et géométriques (méthode Sismoa validée et publiée)

▪ Vulnérabilité du tablier basée sur :

- *La distribution et les longueurs de travées*
- *La courbure et le biais de l'ouvrage*
- *Les repos d'appuis*
- *La présence éventuelle de butées parasismiques*



▪ Vulnérabilité des piles basée sur :

- *Le type et la dimension des piles*
- *La distribution et la régularité des hauteurs*
- *Le type de connexion au tablier*
- *La masse du tablier*



Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

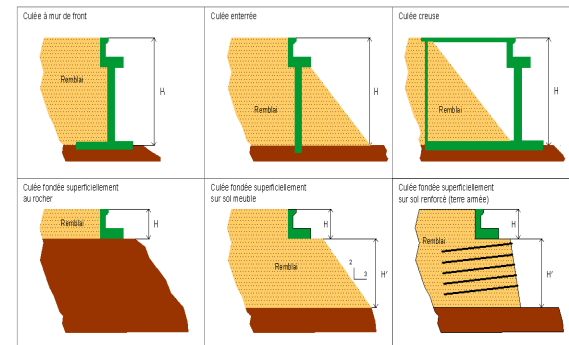
L'identification des ouvrages prioritaires

- Dans la continuité des approches Sismoa/Sisroute

1ère étape : Estimation de la vulnérabilité sur la base de critères qualitatifs typologiques et géométriques (méthode Sismoa validée et publiée)

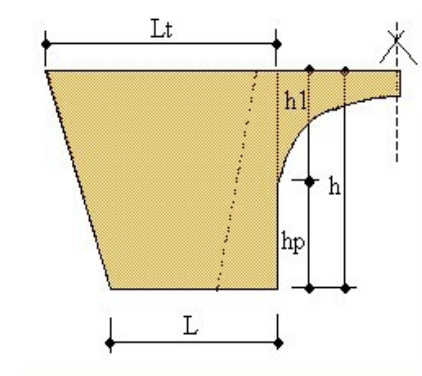
■ Vulnérabilité des culées basée sur :

- La typologie
- La hauteur du mur de front ou du remblai



■ Vulnérabilité des voutes en maçonnerie basée sur :

- Des considérations géométriques (ouverture)
- La hauteur des tympans
- La présence éventuelle de tirants passifs



Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

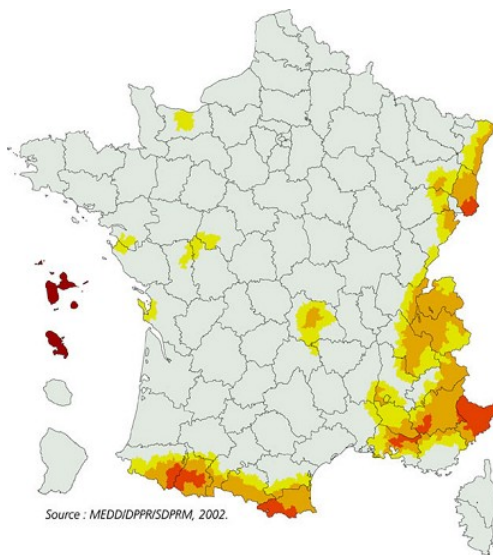
L'identification des ouvrages prioritaires

- Dans la continuité des approches Sismoa/Sisroute

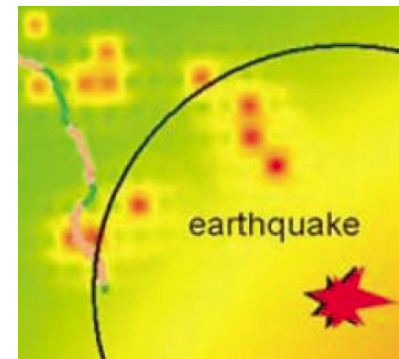
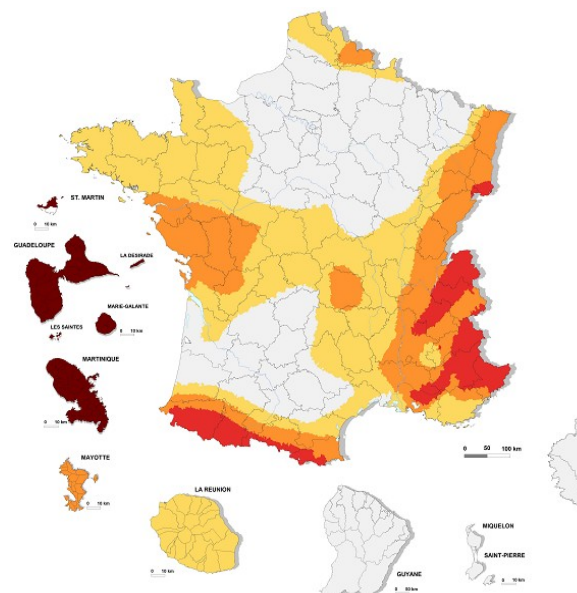
2ème étape : Définition de scénarios sismiques

➔ Différents scénarios sismiques envisagés :

- zonage déterministe PS92
- nouveau zonage probabiliste (approche EC8)
- n'importe quel séisme défini par sa position, sa profondeur et sa magnitude



Source : MEDD/DPRI/SDPRM, 2002.



Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

L'identification des ouvrages prioritaires

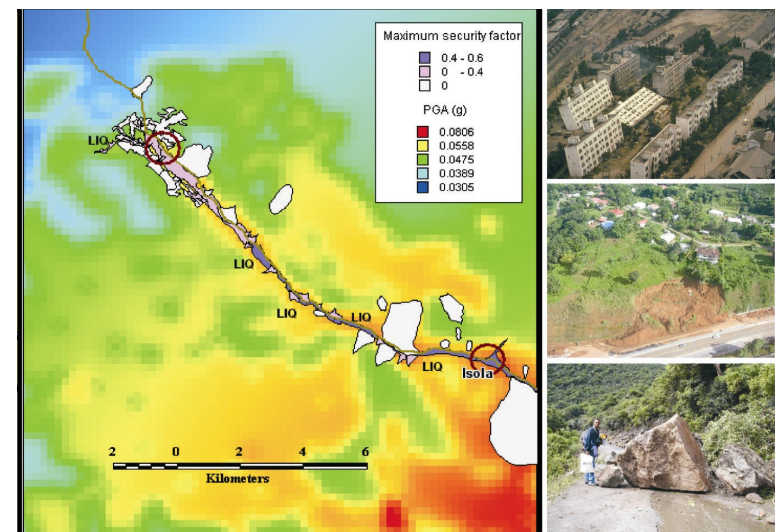
- Dans la continuité des approches Sismoa/Sisroute

3ème étape : Évaluation sommaire des aléas (méthode Sisroute en phase de développement)

- Analyse de la propagation des accélérations sismiques basée sur la loi d'atténuation d'Ambraseys, avec prise en compte des effets de site topologique et géologique
- Détermination des accélération de déclenchement des autres effets induits (liquéfaction, glissements de terrain, chutes de blocs...)

... toujours à partir de paramètres simples et accessibles tels que :

- Les propriétés de sol
- Les pentes des terrains
- La géomorphologie
- La taille des blocs
- La densité de végétation
- Les protections éventuelles (clouage de falaise, filets ...)



Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

L'identification des ouvrages prioritaires

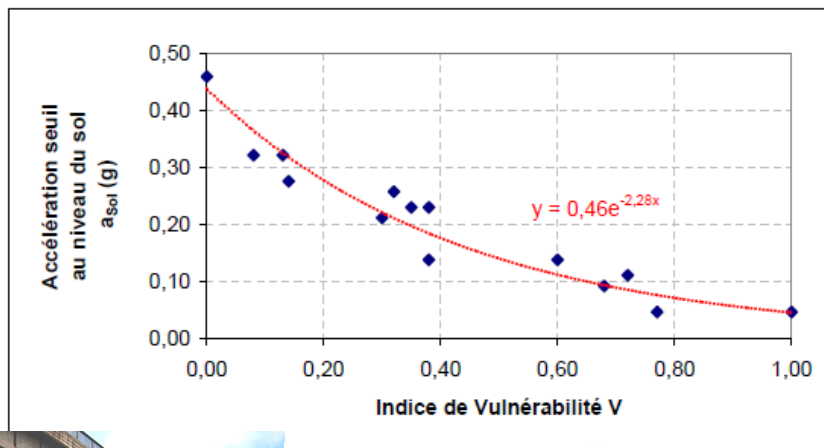
- Dans la continuité des approches Sismoa/Sisroute

4ème étape : calcul des indices de risque

➔ Pour chaque scénario, calcul des indices de risque de coupure de l'itinéraire par combinaison des valeurs d'aléas et de vulnérabilité :

Risque vibratoire sur les ponts :

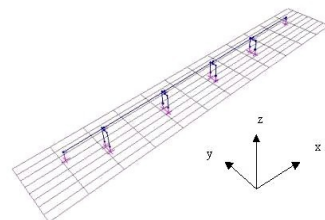
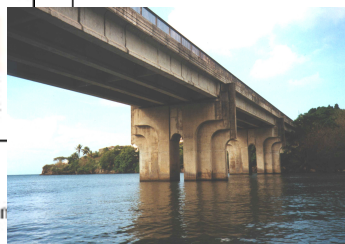
$$R = f(A;V)$$



$$a_{crit_vib} = 4,51 \exp(-2,28 \times V_{vib}),$$

$$0 \leq R_{vib} = 0,703 \ln(a_{vib}/(4,51 \exp(-2,28 \times V_{vib}))) + 0,5057 \leq 1$$

$0 \leq R < 0,4$
$0,4 \leq R < 0,6$
$0,6 \leq R \leq 1$



Calage de l'indice de risque à partir de modèles de diagnostic plus sophistiqués

Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

L'identification des ouvrages prioritaires

Matrice d'importance de l'itinéraire porté :

itinéraire porté	itinéraire 1 (court terme)	Victimes directes				$I_{Vict_itin} = \dots$		
		Trafic (en véh/j)	<1000 : 2	1k<...<10k : 4	>10 000 : 7		...	
		Fréquence embouteillages	nulle : 0	moyenne : 1,5	élevée : 3	...	$I_{Eva0_itin} = \dots$	
		Evacuation des populations				...		
		Rôle identifié (PPRS)		oui : 10	non : 0	...		
		Organisation des secours				$I_{Sec_itin} = \dots$		
		Itinéraire vital au sens des PIS		oui : 8	non : 0		...	
		Rôle de desserte d'équip. stratégiques pour la sécu. civile (pompiers, base militaire, hôpitaux...)		oui : 8	non : 0	...		
		Réseaux vitaux portés				$I_{Rése_itin} = \dots$		
		Eau		oui : 2,5	non : 0		...	
		Electricité		oui : 2,5	non : 0		...	
		Gaz		oui : 2,5	non : 0		...	
		Communication (fibres optiques, tel...)		oui : 2,5	non : 0	...		
		Itinéraires parallèles et rétablissements provisoires d'urgence				$I_{Parat_itin} = \dots$		
Présence d'itinéraire parallèle à moins de 3 km		oui : 0	non : 7	...				
Possibilité de rétablissement provisoire d'urgence en cas effondr. ponts, chutes blocs... (durée < qq jours)		oui : 0	non : 7	...				
$I_{itin 1} = \dots$ (= $I_{Vict_itin} + I_{Eva0_itin} + I_{Sec_itin} + I_{Rése_itin} + I_{Parat_itin}$)								
itinéraire porté	itinéraire 2 (long terme)	Rôle socio-économique				$I_{Soc_itin} = \dots$		
		Type voirie	VC : 0	RD : 0,5	RN : 1		Autoroute : 1,5	...
		Nb voies/sens		1 voie : 0,5	2 voie : 1		>= 3 voies : 1,5	...
		Trafic (en véh/j)		<1000 : 0,5	1k<...<10k : 1		>10 000 : 1,5	...
		Trafic PL		faible : 0,5	normal : 1		élevé : 1,5	...
		Rôle de desserte	village 0	agglom., pôle d'act. 1	régional 1,5		national 2	...
		Réseaux portés		oui : 1	non : 0		...	
		Itinéraires parallèles suffisamment proches et redondants pour offrir le même niveau de service ?				$I_{Para2_itin} = \dots$ (= $I_{Para2} \times I_{Soc}$)		
		Perte de temps engendrée :	< 30 mn : 0	30 < < 90 mn : 0,5	> 90 mn : 1		$I_{Para2_itin} = \dots$	
		Facilité de renforcement par rapport aux itinéraires parallèles				$I_{Coût_itin} = \dots$		
		Accessibilité (niveau urbanisation, zone montagne...)		inf. ou = : 0	supérieure : 2		...	
		Nbre OA L>10m, constr<1995 par rapport itin parall		inférieur : 1	supérieur ou = : 0		...	
		Nbre murs H>6m, constr<1995 par rapport itin parall		inférieur : 1	supérieur ou = : 0		...	
		Nbre tunnels, constr<1995 par rapport itin parall		inférieur : 1	supérieur ou = : 0		...	
Risque effets induits (liq, blocs...) par rapport itin parall		inférieur : 1	supérieur ou = : 0	...				
Aspect environnemental				$I_{Env_itin} = \dots$				
Embouteillage, émission CO ₂ prévisibles sur itin para		oui : 3	non : 0		...			
Retombées pour le gestionnaire				$I_{Conc_itin} = \dots$				
Coûts induits	Faibles : 0,5	Modérés : 1	Forts : 1,5		...			
Retombées médiatiques	régionales : 0,5	nationales : 1	internationales : 1,5		...			
$I_{itin 2} = \dots$ (= $I_{Soc_itin} + I_{Para2_itin} + I_{Coût_itin} + I_{Env_itin} + I_{Conc_itin}$)								



Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

L'identification des ouvrages prioritaires

Matrice d'importance de l'ouvrage :

I Ouvrage	I _{OA1} (court terme)	Victimes directes				I _{VILOA} =
		Trafic sur l'ouvrage (en véh/j)	<1000 : 1	1k<..<10k : 2	>10 000 : 3	
		Surface de tablier (m ²)	< 200 : 1	200< <4000 : 2	> 4000 : 3	
		Fréq embouteillage sur ouvrage	nulle : 0	moyenne : 1,5	élevée : 3	
		Voie franchie :				
		Type de voirie	RD, frêt Sncl : 1	RN, TER : 2	Autoroute, TGV : 4	
		Trafic sous l'ouvrage (en véh/j)	<1000 : 1	1k<..<10k : 2	>10 000 : 4	
		Fréq embouteillages sous ouvrage	nulle : 0	2	élevée : 4	
		Réseaux vitaux franchis		oui : 2	non : 0	
		Organisation des secours				
	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		
	Possibilités de rétablissement à court terme pour véhicules de secours					
	Réparabilité (pont courant à typologie peu vulnérable)		oui : - 2	non : 3		
	Possib. de pont de secours (brèche<40 m)		oui : - 3	non : 3		
Possib. de déviation locale (échangeur, nœud urbain)		oui : - 3	non : 3			
I_{OA1} = ... (= I _{VILOA} + I _{SEC_OA} + I _{REUB_OA})						
I _{OA2} (long terme)	Rôle socio-économique voie franchie				I _{SOE_OA} =	
	Type voirie	VC : 0	RD : 1	RN, frêt, TER : 2		Autoroute, TGV : 3
	Nb voies	1 voie : 0	2 voies : 0,5	3 ou 4 voies : 1		>= 5 voies : 2
	Trafic (en véh/j)		<1000 : 0	1k<..<10k : 0,5		>10 000 : 1
	Trafic PL		faible : 0	normal : 0,5		élevé : 1
	Rôle de desserte	village 0	agglomération, pôle d'act. 0,5	régional 1		national 2
	Réseaux franchis		oui : 1	non : 0		
	Possibilités de reconstruction de l'ouvrage					
	Durée de reconstruction		< 6 mois : -1	6< < 24mois : 2		> 2 ans : 4
	Valeur intrinsèque de l'ouvrage					
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_{OA2} = ... (= I _{SEC_OA} + I _{REUB_OA} + I _{VAL_OA})						



Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

L'identification des ouvrages prioritaires

Indice d'importance et classification

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

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

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

$(0 < I < 50 :$	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)



Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

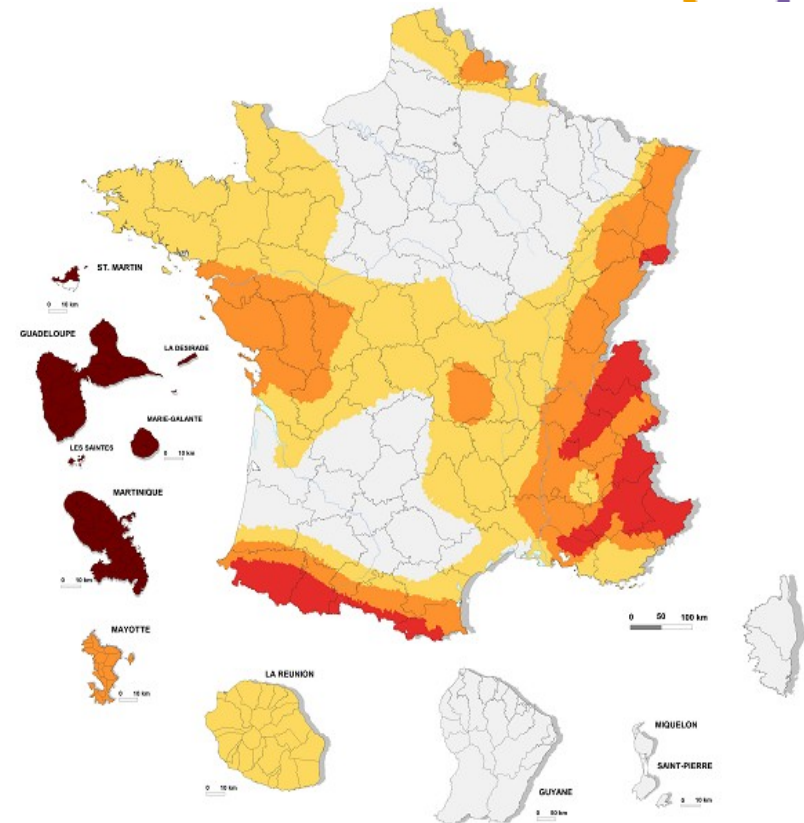
Niveau de performance visé

- Niveaux d'accélération de référence

Basés sur le nouveau zonage sismique

Indice de performance ou « de conformité » :

$$\alpha_{\text{conf-EL}} = \frac{a_{\text{max adm-EL}}}{a_{\text{ref-EL}}}$$

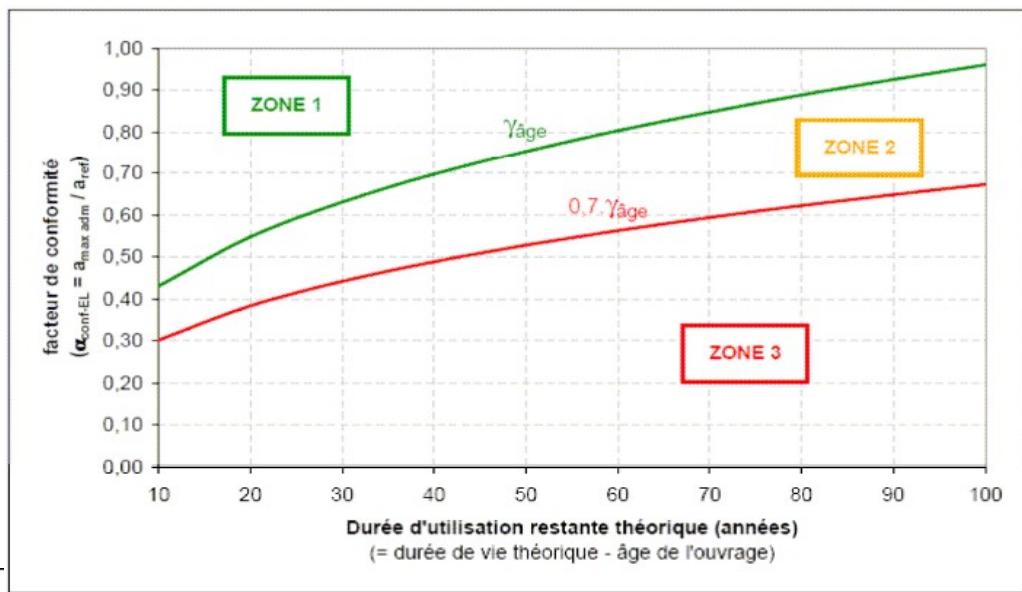


Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

Niveau de performance visé

- Définition du niveau de renforcement optimal

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

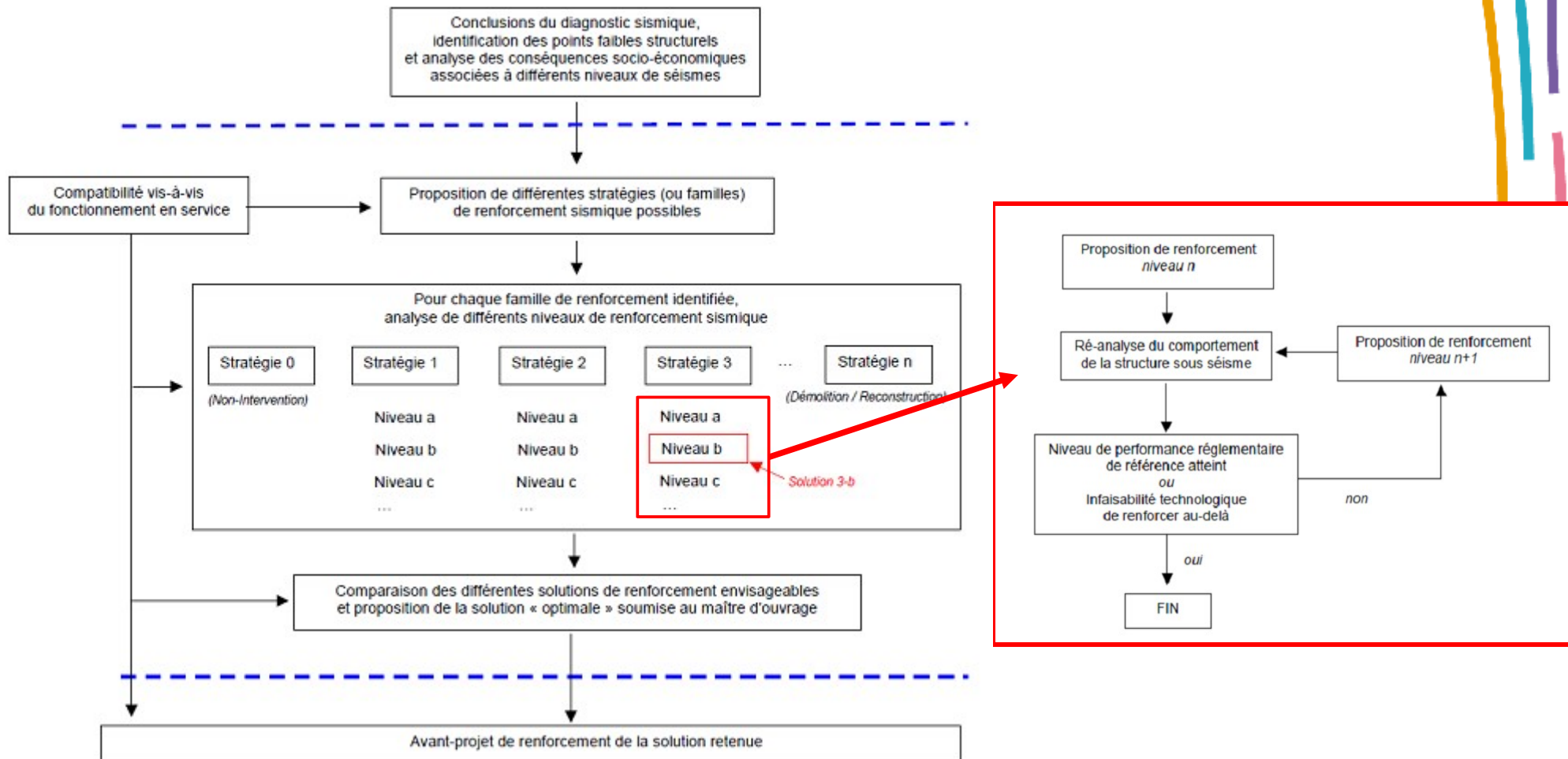


- Zone 1 : niveau de performance acceptable
=> aucun renforcement préconisé
- Zone 3 : niveau de performance insuffisant
=> renforcement nécessaire ou déclassement de l'ouvrage
- Zone 2 : renforcement à envisager sur la base du meilleur optimum
« performance/coût/enjeux »

Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

Niveau de performance visé

- Format général des études préliminaires de renforcement sismique



Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

Niveau de performance visé

- Format général des études préliminaires de renforcement sismique

Solutions	0 (non-intervention)	1-a	1-b	2-b	2-c	2-d	3-e	...	n (démolition/reconstruction)
Accélération admissible $a_{max adm EL}$	...	...	...	...	...	...	...	...
Indice de conformité γ_{conf}	...	...	...	...	...	...	...	...	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	...	...	...	...	...	...	...	...	...

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

Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

Démarche générale pour les études de diagnostic / renforcement

- Quelques recommandations générales pour le diagnostic

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 possibilités de redistribution d'efforts internes...

Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

Reconnaisances 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
 - **Hypothèses sismiques prises en compte lors de la conception**
 - **Caractéristiques des sections et éléments structurels**
 - **Type de fondations**
 - **Conditions de sol**
 - **Conditions d'environnement**
 - Effets induits (liquéfaction, chutes de blocs, glissements de terrain)
 - Effets de site (géologique ou topographique)
 - Présence de failles

Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

Reconnaisances 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*

Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

Reconnaisances 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 et investigations in-situ (ou essais labo)**
- **Données statistiques sur les pratiques constructives d'époques**
(caractéristiques matériaux et dispositions constructives)



Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

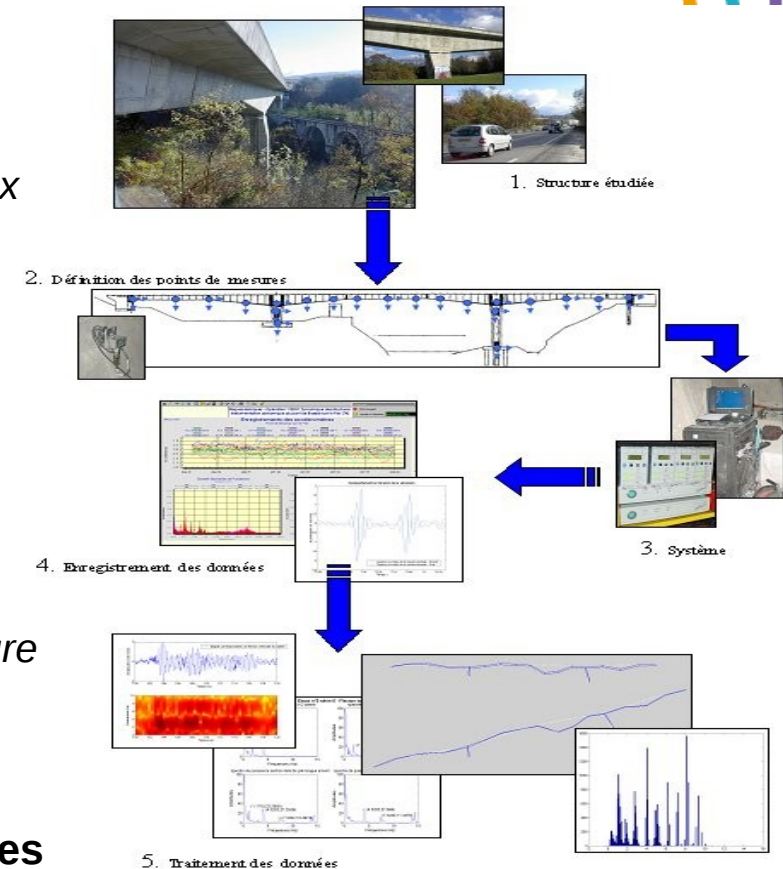
Reconnaitances à mener pour le diagnostic sismique

- 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!)

Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

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]

Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

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)	



Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

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



Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

Méthodes d'analyse

- États-limites pour le diagnostic sismique

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

▪ Etat-limite de « Limitation des Dommages » (EL-LD)

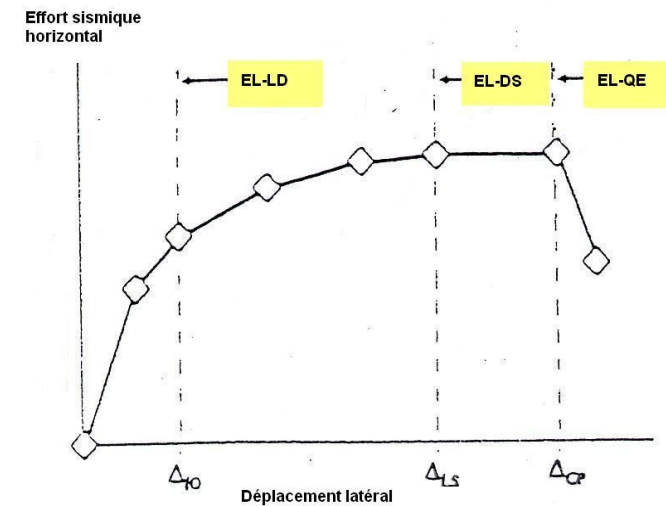
- *Dommages légers uniquement*
- *Usage maintenu*
- *Aucune réparation sauf équipements secondaires*
- *Pas de déformation résiduelle (domaine quasi-élastique)*

▪ Etat-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*

▪ Etat-limite de « Quasi-Effondrement » (EL-QE)

- *Ouvrage lourdement endommagé*
- *Résistance et rigidités résiduelles faibles*
- *Incapacité à supporter des répliques, même modérées*

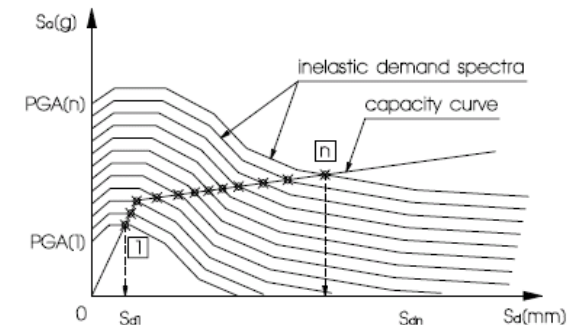
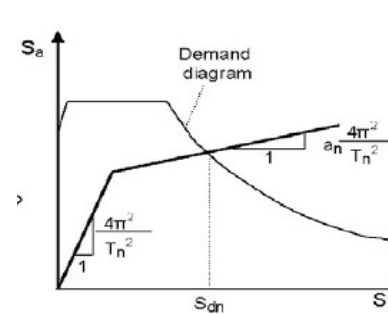
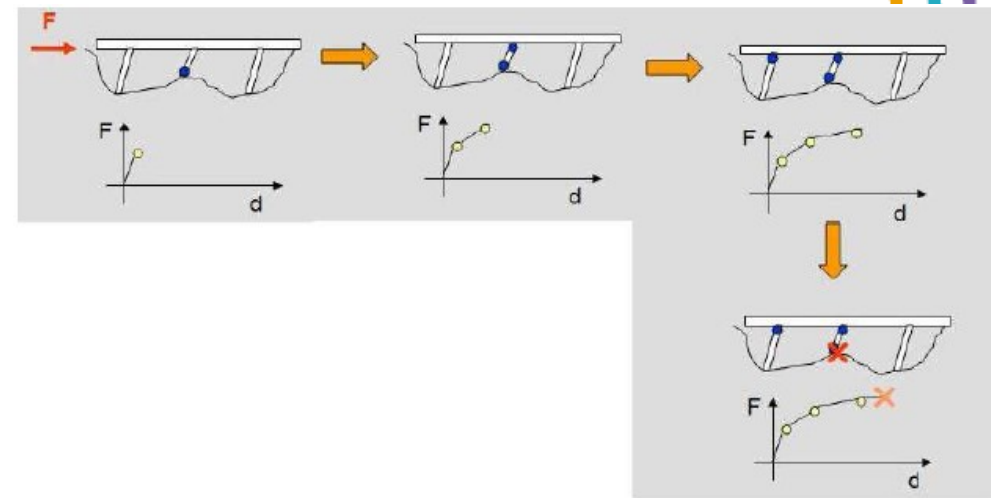
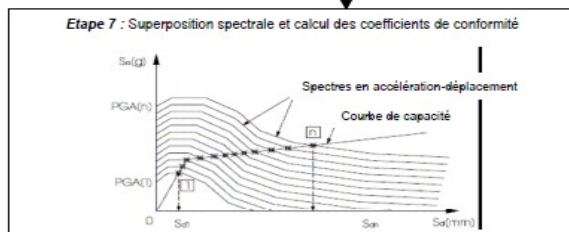
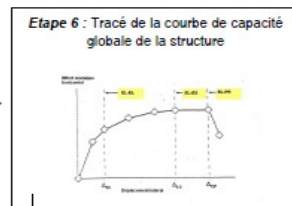
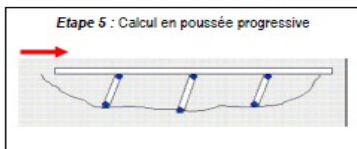
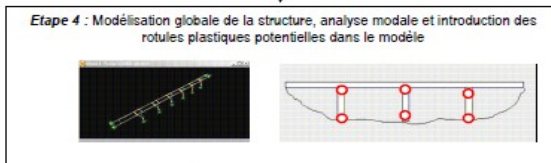
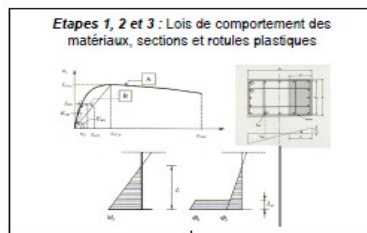


Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

Méthodes d'analyse

- Méthodes de calcul pour le diagnostic sismique

Méthode en déplacement (« Push-over »)



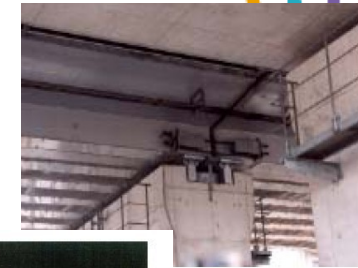
Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

Stratégies et techniques de renforcement

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

Du plus simple au plus complexe et coûteux...

- **Modification 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...



Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

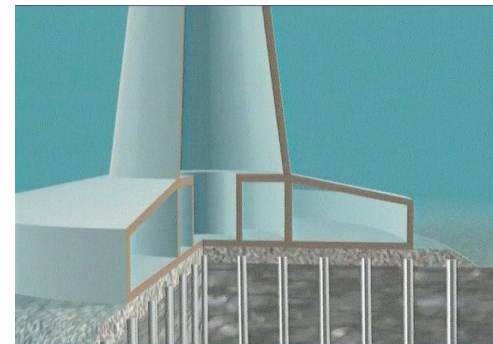
Stratégies et techniques de renforcement

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

Vis-à-vis des effets induits

▪ Liquéfaction

- Compactages
- Colonnes balastées
- Injections/traitements de sol



▪ Chutes de blocs

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



▪ Glissements de terrain

- Clouages
- Purges

Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

Problématique 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 Sétra : 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.

Réflexion en cours visant à adopter la même logique de recherche du meilleur optimum : « Performance / Coût / Enjeux »

+ objectif de « non-aggravation par rapport à la situation avant travaux »



Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

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

- Contexte général

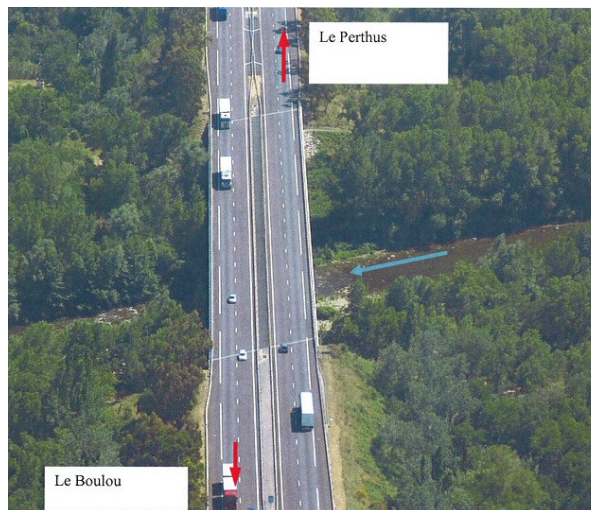
Mise à profit d'un élargissement d'ouvrage pour durcissement au séisme

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



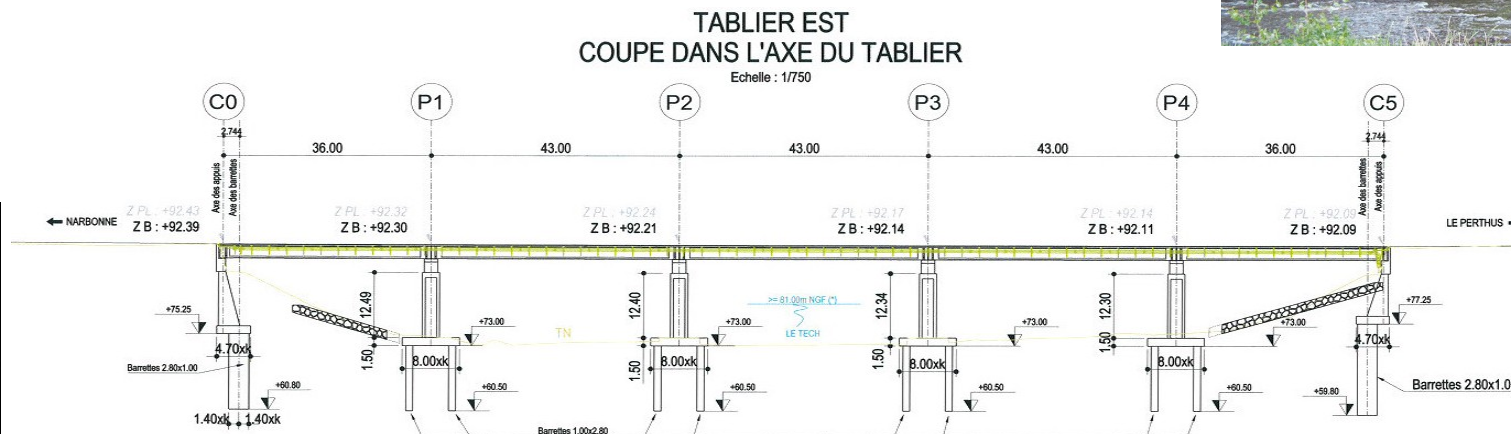
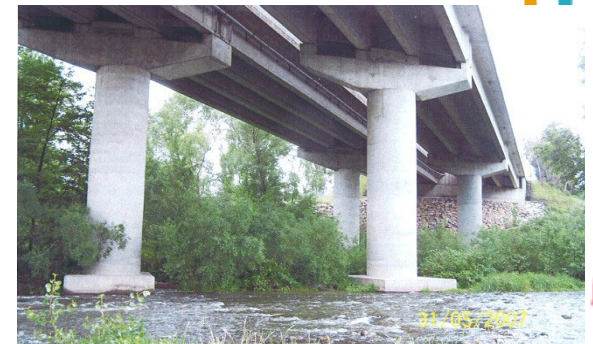
Localisation :

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

Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

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
(Dimensionnement selon PS69)
 - Tracé : Rectiligne, biais = 60 gr

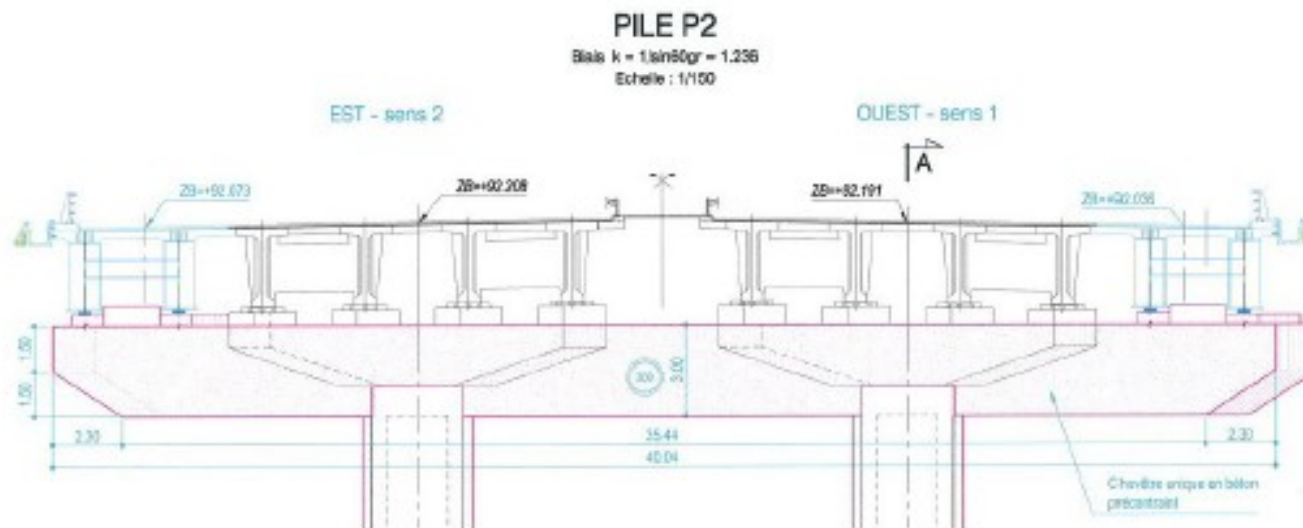


Biais = 60 gr - k = 1/sin 60gr = 1.236067977

Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

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



Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

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 :

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

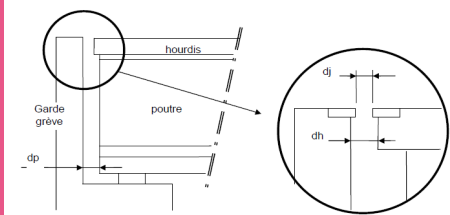
→ Catégorie III : $\gamma_1 = 1,2$

→ $a_g = \gamma_1 \cdot a_{gr} = 1,2 \times 1,1 = 1,32 \text{ m/s}^2$

Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

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
Culées	- 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



Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

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 O : 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

Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

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 (**)	Gène 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

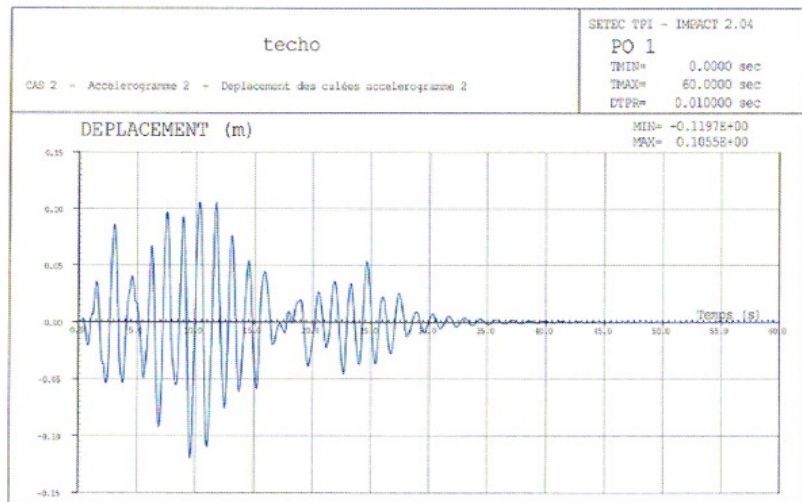
Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

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

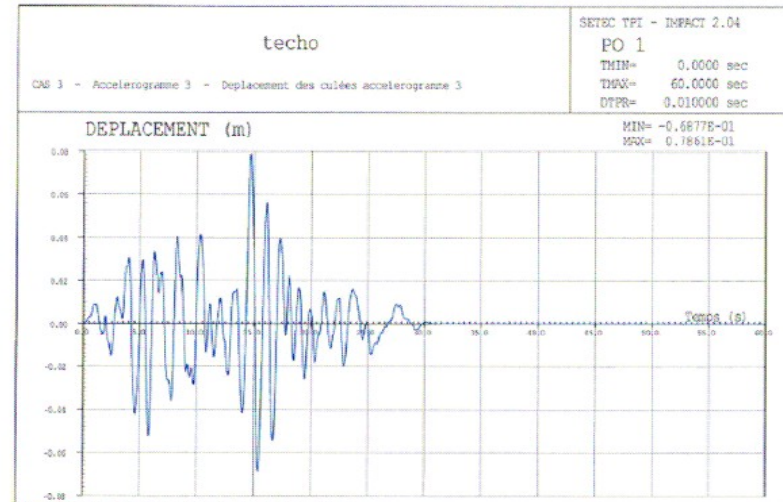
- Calculs justificatifs

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

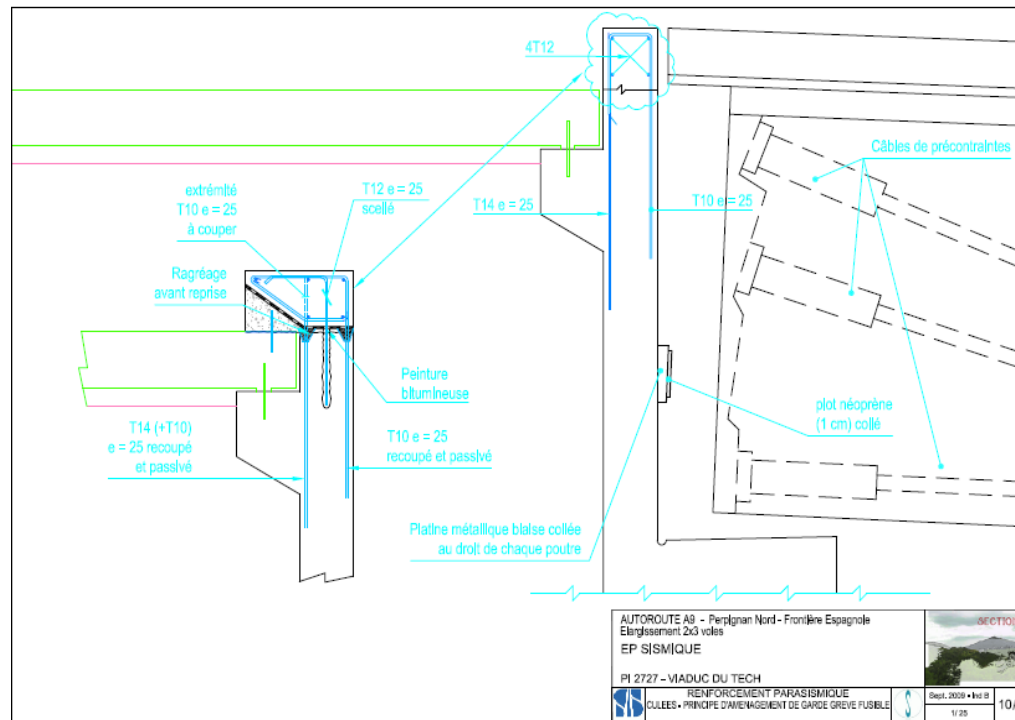


Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

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

Aménagement du garde-grève fusible (solution 0)

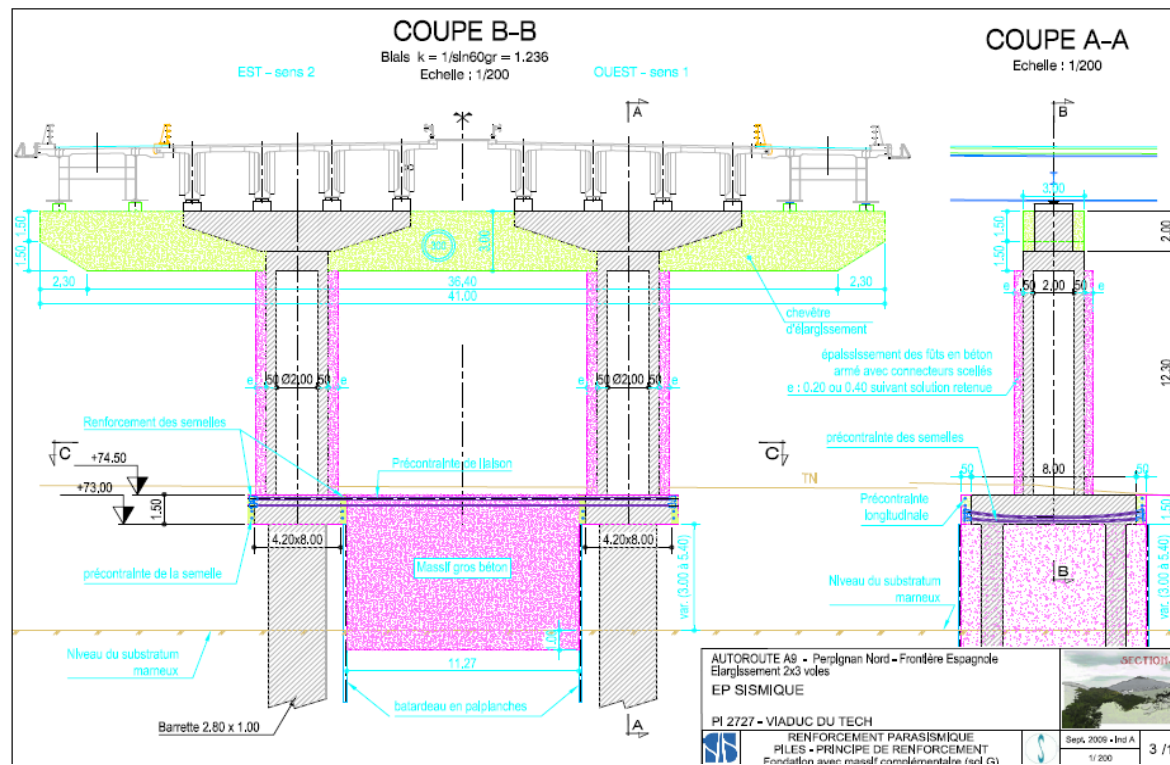


Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

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

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

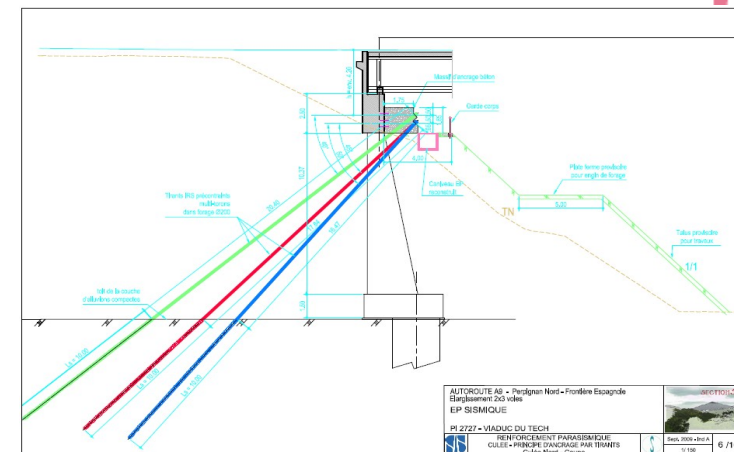
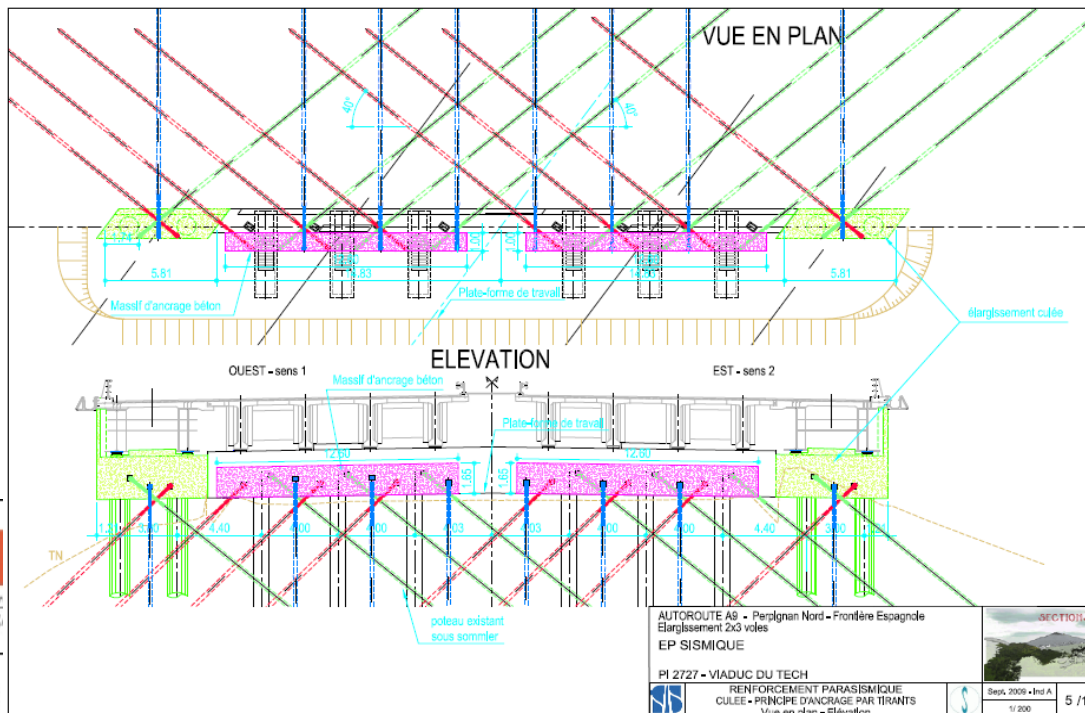


Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

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

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



Évaluation et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes

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)

