

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



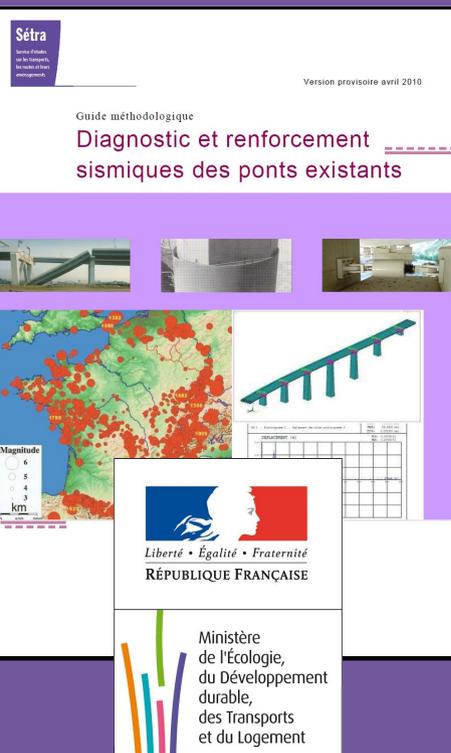
Journées techniques
organisées avec l'appui du Sétra
et sous l'égide de la CoTITA

PRISE EN COMPTE DU RISQUE SISMIQUE

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (1/4)

Obligations réglementaires
et démarche générale préconisée

Jean-Christophe CARLES / D Davi
CETE Méditerranée



Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (1/4)

Plan de l'exposé

- Contexte général et obligations réglementaires
- L'identification des ouvrages prioritaires
- Démarche générale pour les études de diagnostic/renforcement - Niveau de performance visé



Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (1/4)

Contexte général et obligations réglementaires

PS92 : 1^{ères} 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...

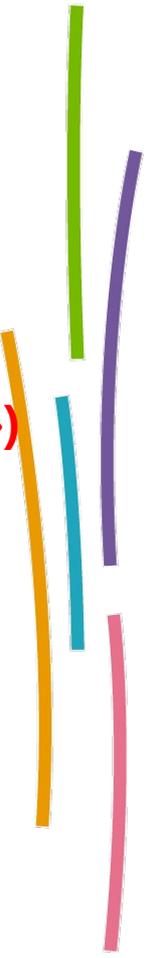
Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (1/4)

Contexte général et obligations réglementaires

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

Manques méthodologiques et réglementaires concernant cette problématique :

- Quels ouvrages traiter en priorité?
- Quelles méthodes d'analyses pour les diagnostiquer?
- Quel niveau de performance à atteindre par leur renforcement?
- A quel coût?



Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (1/4)

Contexte général et obligations réglementaires

En février 2006, création à l'initiative du Sétra d'un groupe de travail spécifique rassemblant des spécialistes de divers services et organismes (RST, AFPS, DGITM, SNCF, Sociétés d'autoroutes, bureaux d'études privés, entreprises BTP, ...)

Objectif : Rédiger un guide méthodologique destiné aux maîtres d'ouvrages, gestionnaires, maîtres d'œuvre et bureaux d'études confrontés à cette problématique



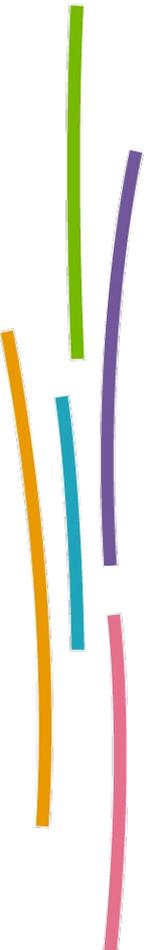
Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (1/4)

Contexte général et obligations réglementaires

S'inscrit dans la continuité des approches mises au point pour l'évaluation du risque sismique à l'échelle des itinéraires (approches Sismoa et Sisroute) :

- 1^{ère} phase : identification rapide des ouvrages les plus exposés et sensibles
- 2^{ème} phase : diagnostic détaillé des ouvrages jugés prioritaires et projet de renforcement le cas échéant

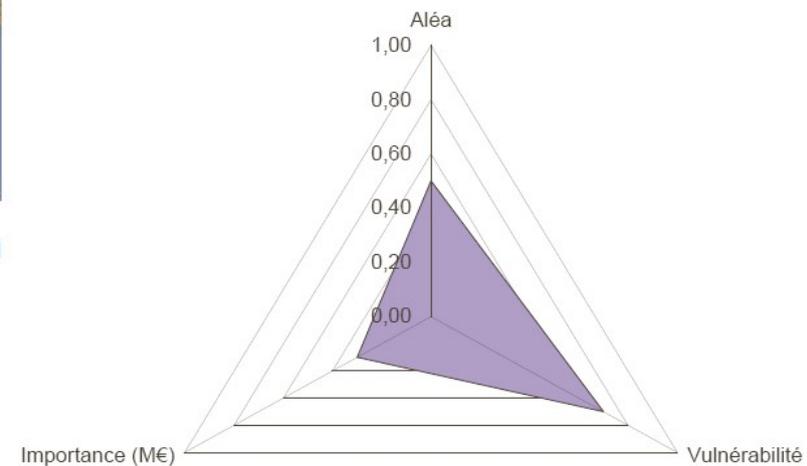
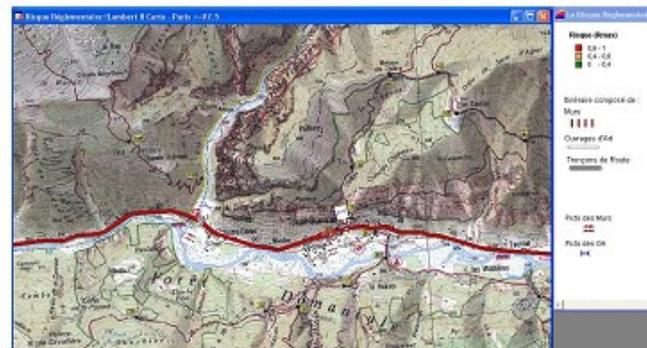
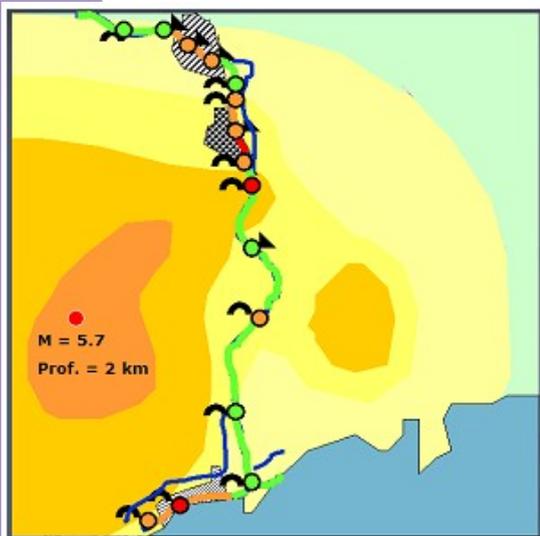
Cible préférentiellement le renforcement des ouvrages situés dans des zones de sismicité forte ou modérée et présentant un fort enjeu socio-économique (itinéraires structurants ou desserte d'équipements stratégiques) en vue d'une réduction sensible et économiquement pertinente de leur niveau de vulnérabilité.



Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (1/4)

L'identification des ouvrages prioritaires

- Dans la continuité des approches Sismoa/Sisroute



Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (1/4)

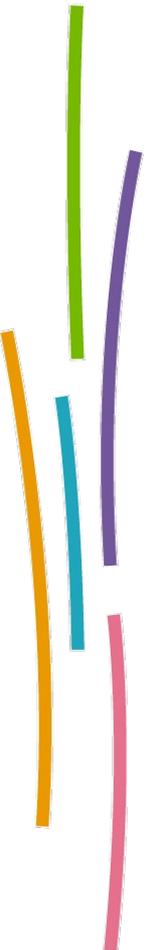
L'identification des ouvrages prioritaires

- 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*



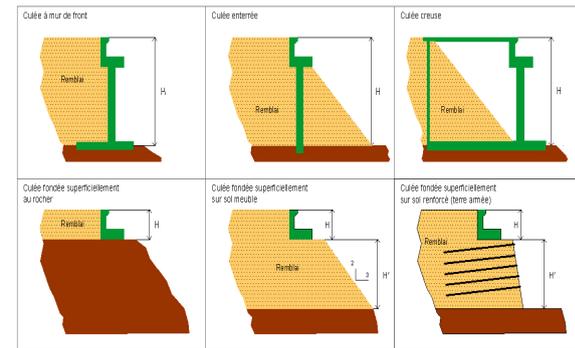
Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (1/4)

L'identification des ouvrages prioritaires

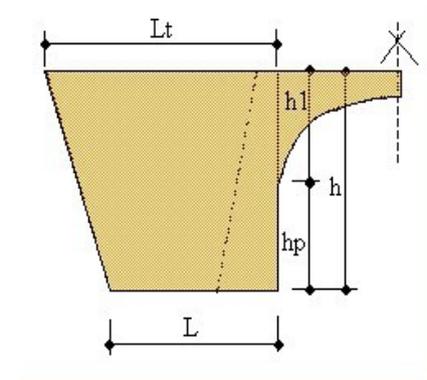
- Dans la continuité des approches Sismoa/Sisroute

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



Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (1/4)

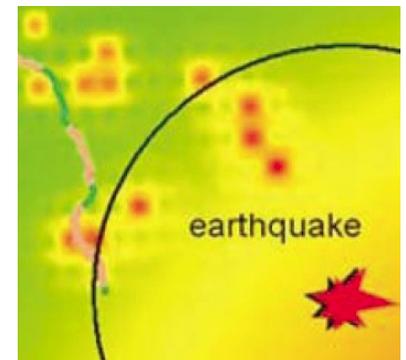
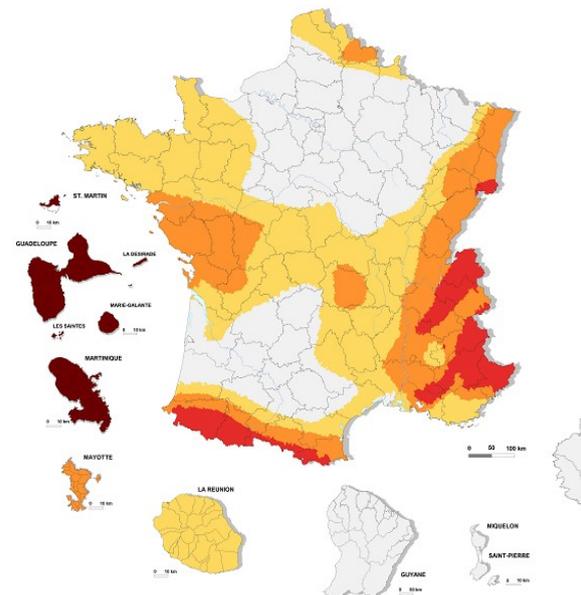
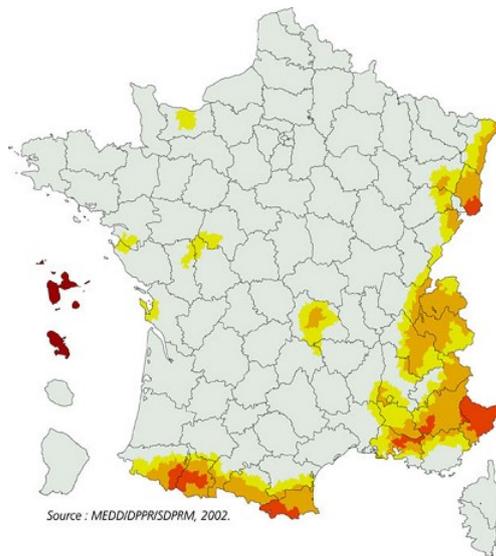
L'identification des ouvrages prioritaires

- 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



Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (1/4)

L'identification des ouvrages prioritaires

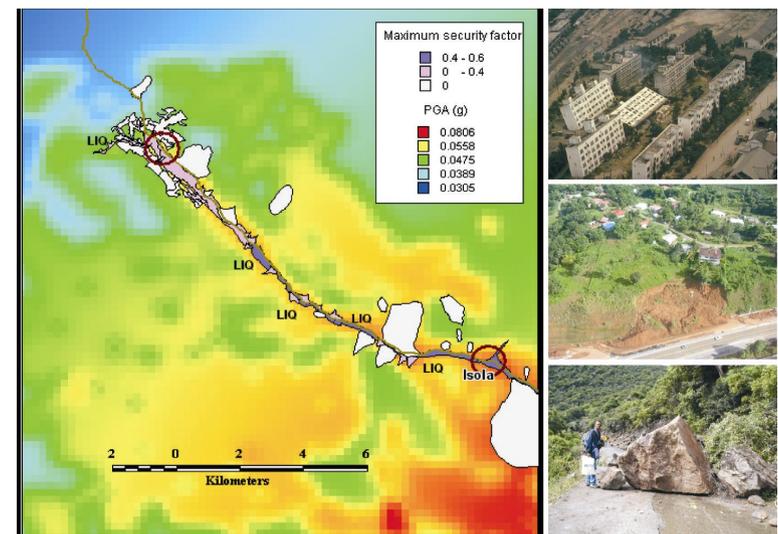
- Dans la continuité des approches Sismoa/Sisroute

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 ...)



Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (1/4)

L'identification des ouvrages prioritaires

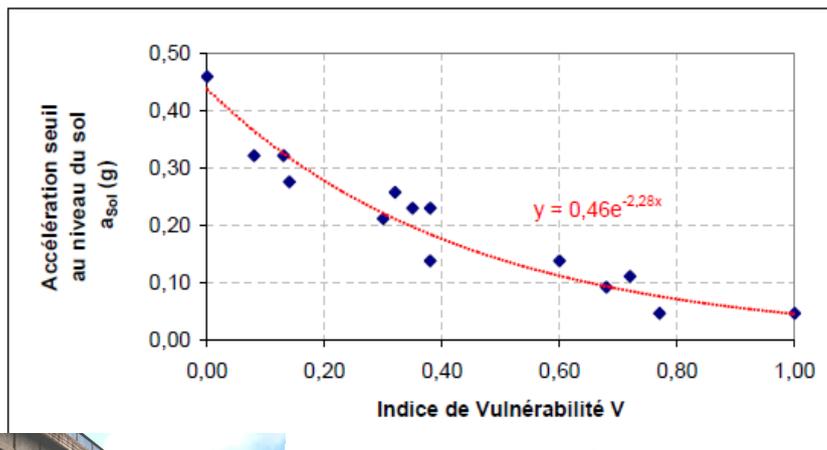
- Dans la continuité des approches Sismoa/Sisroute

4ème étape : calibrage d'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 :

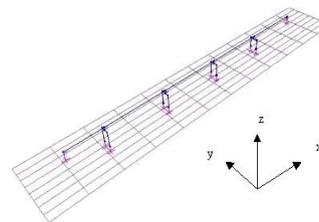
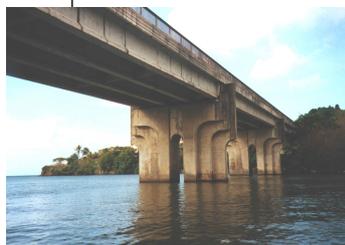
Risque vibratoire sur les ponts :

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

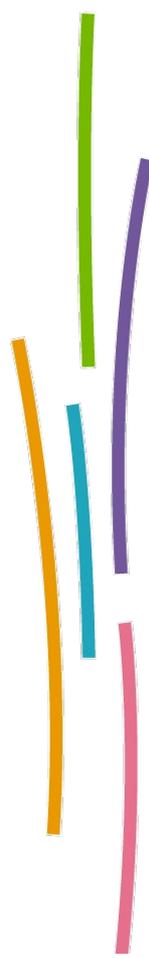
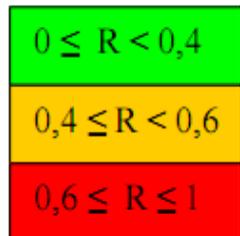


$$a_{crit_vib} = 4,51 \exp(-2,28 \times V_{vib}),$$

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



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



Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (1/4)

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 | ... | | |
| | | Evacuation des populations | | | | $I_{Eva0_itin} = \dots$ | | |
| | | 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 | | | | $I_{Para1_itin} = \dots$ | | |
| 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 | ... | | | | |
| $I_{itin 1} = \dots$ (= $I_{Vict_itin} + I_{Eva0_itin} + I_{Sec_itin} + I_{Rése_itin} + I_{Para1_itin}$) | | | | | | | | |
| 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 | ... | | |
| $I_{itin 2} = \dots$ (= $I_{Soc_itin} + I_{Para2_itin} + I_{Coût_itin} + I_{Env_itin} + I_{Conc_itin}$) | | | | | | | | |

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (1/4)

L'identification des ouvrages prioritaires

Matrice d'importance de l'ouvrage :

| | | | | | | |
|---|---|--------------------------------------|-----------------------------|-------------------|----------------------------|---------------------------|
| 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 Snct : 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 (casernes pompier, hôpital, base militaire, préfecture...) | | | | oui : 4 | non : 0 |
| | Possibilités de rétablissement à court terme pour véhicules de secours | | | | I _{Reub_OA} = ... | |
| | 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 _{Soc_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 | agglom., pôle d'act. 0,5 | régional 1 | | national 2 |
| | Réseaux franchis | oui : 1 | | non : 0 | | |
| | Possibilités de reconstruction de l'ouvrage | | | | | I _{Rec_OA} = ... |
| | Durée de reconstruction | | < 6 mois : -1 | 6< < 24mois : 2 | | |
| | Valeur intrinsèque de l'ouvrage | | | | | I _{Val_OA} = ... |
| 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}) | | | | | | |

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (1/4)

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)

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (1/4)

Niveau de performance visé

- 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)

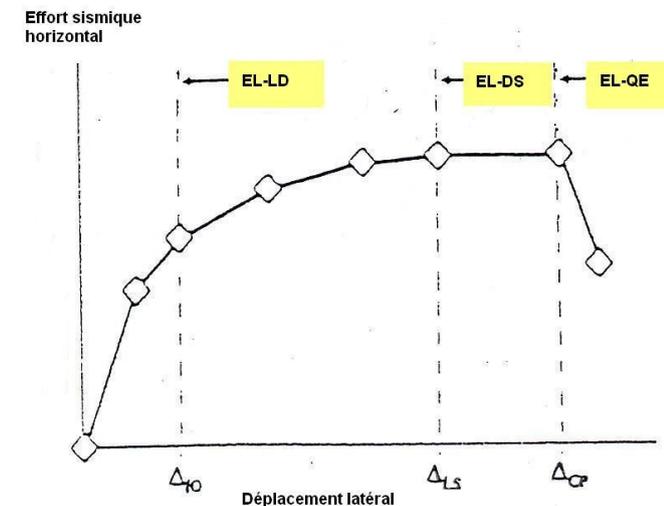
- *Dommages légers uniquement*
- *Usage maintenu*
- *Aucune réparation sauf équipements secondaires*
- *Pas de déformation résiduelle (domaine quasi-élastique)*

▪ 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*



Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (1/4)

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...
- **Etre cohérents avec le niveau de connaissance de l'ouvrage et les données disponibles**
Plans, notes de calculs, investigations in-situ...
- **Etre adaptés à la typologie de l'ouvrage et « points faibles sismiques » associés**
- **Intégrer les éventuelles défaillances de dispositions constructives**
- **Evaluer 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...

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (1/4)

Niveau de performance visé

- Niveaux d'accélération de référence

Basés sur le nouveau zonage sismique

▪ Ouvrages de catégorie III

- $a_{ref_DS} = 1,2 a_{gr}$

▪ Ouvrages de catégorie IV

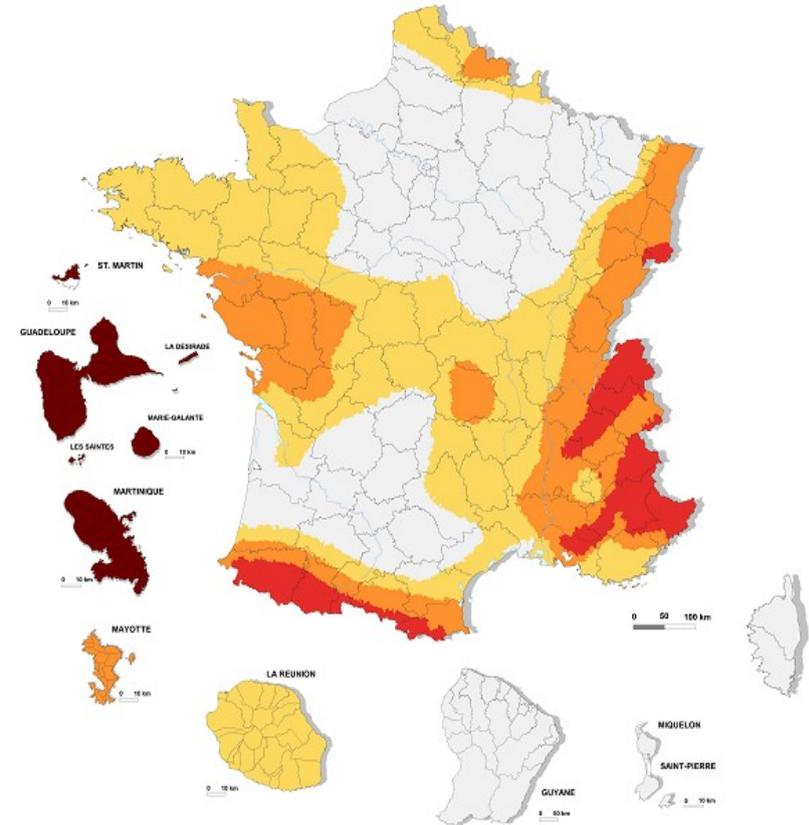
- $a_{ref_DS} = 1,4 a_{gr}$

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

- *Indice de conformité*

Indice de performance ou « de conformité » :

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

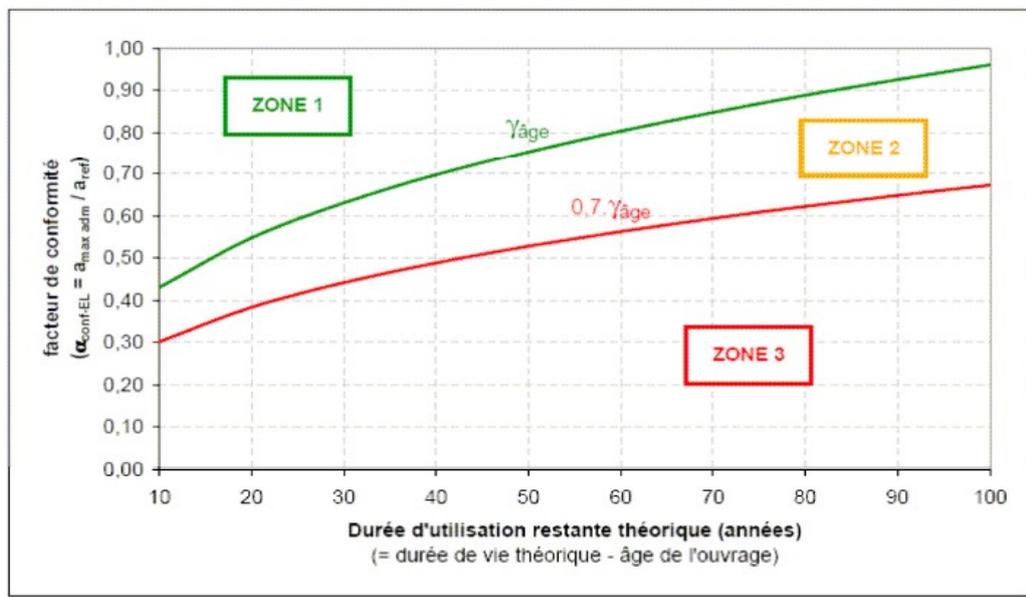


Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (1/4)

Niveau de performance visé

- Définition du niveau de renforcement optimal

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

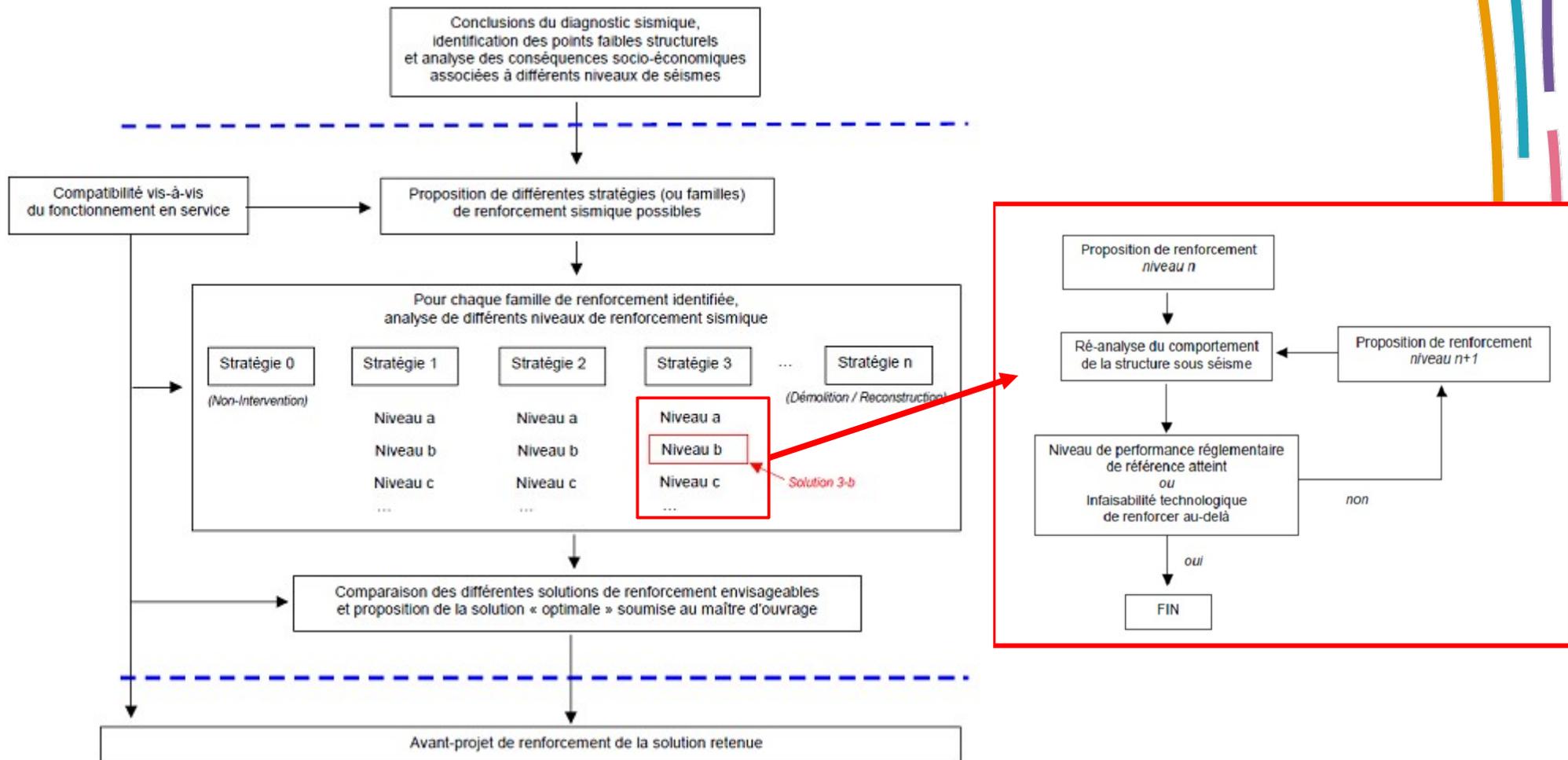


- Zone 1 : niveau de performance acceptable
=> aucun renforcement préconisé
- Zone 3 : niveau de performance insuffisant
=> renforcement nécessaire ou déclassement de l'ouvrage
- Zone 2 : renforcement à envisager sur la base du meilleur optimum
« performance/coût/enjeux »

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (1/4)

Niveau de performance visé

- Format général des études préliminaires de renforcement sismique



Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (1/4)

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 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

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

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (1/4)

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**

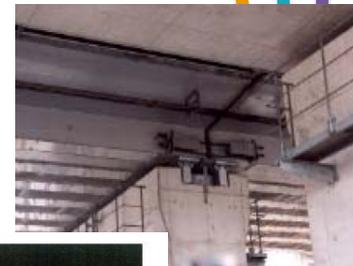
Réduction efficace et simultanée des efforts et des déplacements

- **Renforts de piles (ductilité et éventuellement résistance)**

Fibres composites, chemisage béton...

- **Renforts des fondations**

Traitement de sol, élargissements de semelles, ajouts de pieux...



Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (1/4)

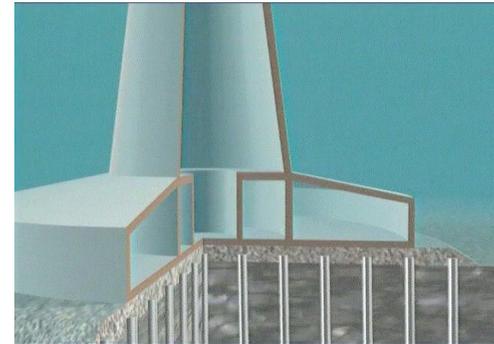
Stratégies et techniques de renforcement

- 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

Diagnostic et renforcement des ouvrages existants (1/4)

Problématique des élargissements / remplacements de tabliers

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

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 »

