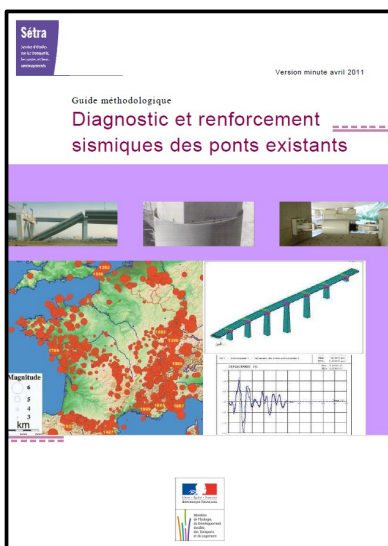
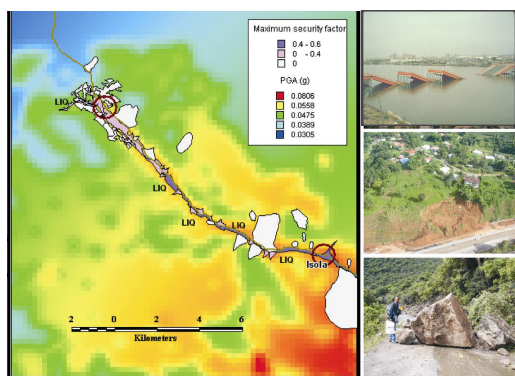
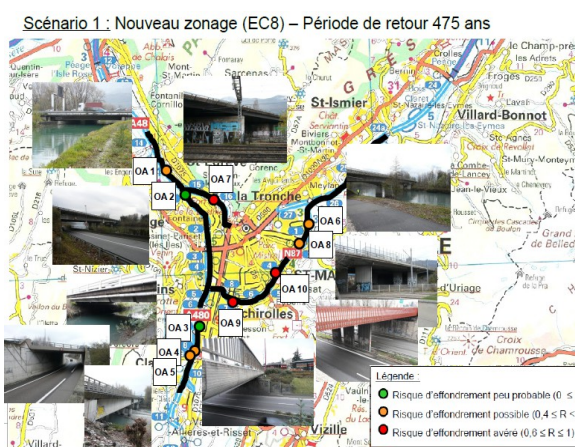
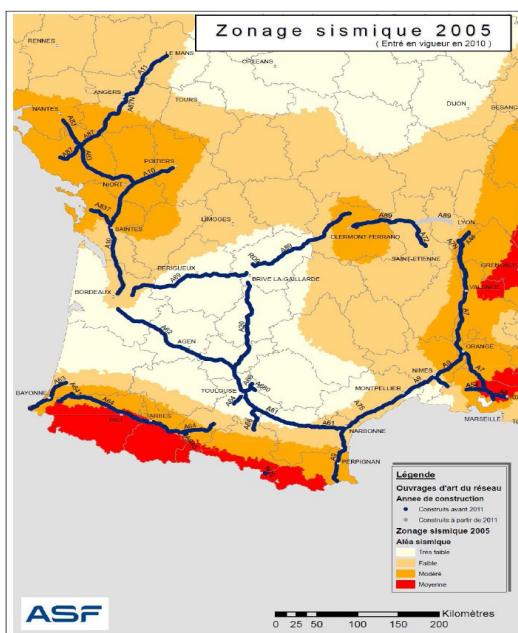


Prise en compte du risque sismique sur le patrimoine OA existant

Proposition de critères décisionnels pour une stratégie de renforcement



Programme d'actions Séttra/CTOA 2012 :
« Analyser et réduire les risques sismiques »





**Programme d'actions Sétra/CTOA 2012 :
« Analyser et réduire les risques sismiques »**



Prise en compte du risque sismique sur le patrimoine OA existant

Note de réflexion

Historique des versions du document

| Commentaire | Date | Auteur | Vérfié | Approuvé | Version |
|---|--------------|---------|---------------------------|----------|---------|
| Élaboration du document | Janvier 2013 | D. Davi | | | V0 |
| Modification suite relecture A. Ballière | Février 2013 | D. Davi | A. Ballière | | V1 |
| Modification suite relecture J.-C. Carlès | Juillet 2013 | D. Davi | A. Ballière, J.-C. Carlès | | V2 |
| | | | | | |
| | | | | | |

Service d'Études sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements (Sétra)
Centre des Techniques d'Ouvrages d'Art (CTOA)

110, Rue de Paris
77 171 SOURDUN

tél: 01 60 52 32 56
Fax: 01 60 52 83 56

mél: Christian.Cremona@developpement-durable.gouv.fr

Au 1^{er} janvier 2014, les 8 CETE, le Certu, le Cetmef et le Sétra fusionnent pour donner naissance au Cerema :
centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement.

- CETE : Centre d'études techniques de l'équipement

- Certu : Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme, et les constructions publiques

- Cetmef : Centre d'études techniques maritimes et fluviales

- Sétra : Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements



Service d'Études sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements (Sétra)

Centre des Techniques d'Ouvrages d'Art (CTOA)

Programme d'actions 2012 : « Analyser et réduire les risques sismiques »

Prise en compte du risque sismique sur le patrimoine OA existant

Note de réflexion

date : Juillet 2013

responsable de l'étude : Denis DAVI, DCEDI / Division Ouvrages d'Art

participants : Lætitia CARLES, stagiaire Classes Préparatoires Écoles d'Ingénieurs Polytech Marseille

relecture : Jean-Christophe CARLES, DCEDI / Division Ouvrages d'Art
Arnold BALLIERE, DCEDI / Division Ouvrages d'Art

résumé de l'étude :

La présente note présente une réflexion générale relative à la problématique de la prise en compte du risque sismique sur le patrimoine d'ouvrages d'art existant, menée par le CETE Méditerranée au titre du Pôle de Compétence et d'Innovation (PCI) « Vulnérabilité des ouvrages de Génie Civil aux aléas sismiques et hydrauliques ». Elle traite successivement des aspects suivants :

- présentation de la problématique et de ses enjeux, au regard notamment de la nouvelle législation sismique nationale,
- déclinaison à l'échelle du territoire national ou inter-régional et éléments de réflexion visant à prioriser les itinéraires ou tronçons d'itinéraires routiers les uns par rapport aux autres,
- déclinaison à une échelle plus locale et éléments de réflexion permettant de prioriser les ouvrages le long d'itinéraire et de proposer des objectifs et des solutions de durcissement sismique efficaces et réalistes pour les ouvrages identifiés comme prioritaires,
- réflexion spécifique sur les problématiques d'élargissements d'ouvrages et de remplacements de tabliers, basée notamment sur une étude paramétrique et la production de courbes « abaques » présentant l'influence des modifications structurelles sur les sollicitations sismiques de calcul.

zone géographique : Sourdun (77)

nombre de pages : 57 (hors annexes)

maître d'ouvrage : État (Sétra)

Code LOLF : 0203160101 IST-Infrastructures routières, Recherche et Méthodologie

Affaire : 12C000290

Devis : C0 2012 D 334

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| 1.CONTEXTE GÉNÉRAL ET OBJECTIFS DE LA NOTE..... | 6 |
| 2.CADRE LÉGISLATIF, RÉFÉRENCES NORMATIVES ET MÉTHODOLOGIQUES..... | 8 |
| 2.1 - Cadre législatif | 8 |
| 2.1.1 -Nouveau zonage et classement général des ouvrages et constructions en classes de risque et catégories d'importance..... | 8 |
| 2.1.2 -Cas des bâtiments et de certaines installations classées..... | 9 |
| 2.1.3 -Cas des ponts..... | 10 |
| 2.1.4 -Autres documents officiels faisant référence à la problématique de la prise en compte du risque sismique sur les ponts existants..... | 11 |
| 2.1.4.a - Circulaire du 26 avril 2002 relative à la prévention du risque sismique..... | 11 |
| 2.1.4.b - Plans de Prévention des Risques Sismiques (PPRS)..... | 11 |
| 2.2 - Références normatives..... | 11 |
| 2.2.1 -Normes de calcul : les Eurocodes et leurs annexes nationales..... | 11 |
| 2.2.2 -Normes produits..... | 12 |
| 2.3 - Références et outils méthodologiques..... | 12 |
| 2.3.1 -Méthodes Sismoa/Sismur/Sisroute..... | 12 |
| 2.3.2 -Guide « Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants » (à paraître)..... | 16 |
| 2.3.3 -Autres références nationales..... | 18 |
| 2.3.4 -Approches développées à l'étranger..... | 18 |
| 3.DÉMARCHE GÉNÉRALE..... | 19 |
| 4.RÉFLEXION À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE NATIONAL : PRIORISATION DES ITINÉRAIRES OU TRONÇONS D'ITINÉRAIRES ROUTIERS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES..... | 21 |
| 4.1 - Exposé de la problématique..... | 21 |
| 4.2 - Éléments de réflexion et recommandations..... | 22 |
| 4.2.1 -Démarche générale..... | 22 |
| 4.2.2 -Indices d'importance associés aux itinéraires..... | 23 |
| 4.2.3 -Indices d'aléas « régionaux »..... | 25 |
| 4.2.4 -Indices de vulnérabilité (très) sommaires | 26 |
| 5.RÉFLEXION À L'ÉCHELLE LOCALE : PRIORISATION DES OUVRAGES LE LONG D'UN ITINÉRAIRE..... | 28 |
| (Extrait du Guide méthodologique Sétra : « Diagnostic et renforcement sismique des ponts existants » - version de mai 2013) | 28 |
| 5.1 - Critères d'importance associés aux ouvrages d'art et classification..... | 28 |
| 5.2 - Choix des ouvrages devant faire l'objet d'une analyse détaillée..... | 33 |
| 5.3 - Exemples d'application ou tests déjà réalisés..... | 34 |
| 5.3.1 -Analyse de la vulnérabilité sismique des ouvrages courants du triangle autoroutier A7-A8-A54 (ASF)..... | 34 |
| 5.3.2 -Évaluation de la vulnérabilité au séisme des ouvrages d'art existants du projet de rocade L2 à Marseille (DREAL PACA)..... | 35 |
| 5.3.3 -Évaluation du risque sismique sur les itinéraires de desserte de l'agglomération Grenobloise (DREAL Rhône-Alpes)..... | 35 |
| 5.3.4 -Test de la méthode suite au séisme de l'Aquila (Italie, avril 2009)..... | 36 |
| 5.4 - Tendances observées à partir des résultats des premières études menées..... | 37 |
| 5.4.1 -Vis-à-vis de la classification des ouvrages existants en catégories d'importance..... | 37 |
| 5.4.2 -Vis-à-vis du choix des ouvrages devant faire l'objet d'une analyse détaillée..... | 37 |

6. RÉFLEXION À L'ÉCHELLE D'UN OUVRAGE DONNÉ : OBJECTIFS DE PERFORMANCE SISMIQUE ET CHOIX D'UNE SOLUTION DE RENFORCEMENT OPTIMALE.....38

(Extrait du Guide méthodologique Sétra : « Diagnostic et renforcement sismique des ponts existants » - version mai 2013)38

6.1 - Problématique générale.....38

6.2 - États-limites et niveaux sismiques de référence.....39

6.2.1 - États-limites pour le diagnostic sismique des ponts.....39

6.2.1.a - État-limite de « Limitation des Dommages » (EL-LD).....39

6.2.1.b - État-limite de « Dommages Significatifs » (EL-DS).....39

6.2.1.c - État-limite de « Quasi-Effondrement » (EL-QE).....39

6.2.2 - Niveaux d'accélération de référence.....39

6.3 - Bilan du diagnostic sismique : définition des indices de robustesse (ou vulnérabilité sismique calculée).....41

6.4 - Décision de renforcement et niveau de performance à atteindre.....41

6.4.1 - Décision de renforcement.....41

6.4.2 - Choix d'une solution de renforcement optimale.....43

6.5 - Exemples d'application déjà réalisées.....47

6.5.1 - Application aux ouvrages élargis de l'A9 (ASF) entre Perpignan et l'Espagne.....47

6.5.2 - Diagnostic et renforcement sismique du viaduc de Caronte à Martigues (A55).....47

6.5.3 - Diagnostic et projet de renforcement sismique du Centre Commercial du Merlan (L2 - Marseille).....48

7. CAS PARTICULIERS DES ÉLARGISSEMENTS D'OUVRAGES ET REMPLACEMENTS DE TABLIERS.....49

7.1 - Exposé de la problématique et démarche générale.....49

7.2 - Évaluation de l'évolution des sollicitations sismiques en fonction des modifications de masse et de raideur...50

7.3 - Éléments de synthèse et recommandations générales.....52

8. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES.....54

9. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....56

ANNEXE :58

Abaques traduisant l'évolution des sollicitations sismiques globales en fonction des modifications de masse et de raideur pour différentes périodes propres fondamentales initiales et différentes conditions de site.....58

1. CONTEXTE GÉNÉRAL ET OBJECTIFS DE LA NOTE

Les connaissances scientifiques et les règles sur la conception parasismique des ponts évoluent et font que les ouvrages anciens ne sont pas ou plus dimensionnés correctement vis-à-vis du séisme. Ainsi, en France, les premières règles parasismiques dites PS69, appliquées à partir de 1975, prévoyaient une prise en compte simplifiée des actions sismiques conduisant à des ouvrages généralement sous-dimensionnés par rapport aux normes plus récentes. Il aura fallu attendre 1996 pour voir appliquées en France les premières normes parasismiques « modernes » (norme NFP06-013 dite règles PS92, guide AFPS 92 pour la protection parasismique des ponts rendu d'application obligatoire par l'Arrêté du 15 septembre 1995 relatif à la classification et aux règles de construction parasismiques applicables aux ponts de la catégorie dite « à risque normal »). Depuis 2010, les normes européennes (NF EN 1998 dites Eurocode 8) s'imposent.

Ces normes de calcul dites « modernes » (PS92, Eurocodes 8-1 et 8-2) et les outils méthodologiques qui les accompagnent (guide AFPS 92 pour la protection parasismique des ponts, guide Sétra/SNCF « Conception des ponts courants en zone sismique », récemment réédité et complété pour être mis en conformité avec l'Eurocode 8-2) fournissent depuis quelques années aux ingénieurs un ensemble de méthodes détaillées pour la conception et le dimensionnement des ouvrages neufs leur assurant une protection parasismique adéquate. Cependant, ces différentes règles et documents ne couvrent pas la problématique spécifique des ponts existants.

La plupart des ponts actuellement en service ont été construits (et conçus) avant 1996, et ne sont donc généralement pas en mesure a priori de supporter les sollicitations engendrées par le tremblement de terre réglementaire de dimensionnement (Figure 1). Par ailleurs, la récente évolution du zonage sismique national définie par le décret n°2010-1255 du 22 octobre 2010 (Figure 2) pose nécessairement la question de la mise à niveau des constructions dans les zones pour lesquelles le niveau d'aléa est revu à la hausse lorsque le niveau d'accélération à prendre en compte est augmenté, que ce soit du fait de la sismicité (accélération de référence a_{EK}) ou de l'effet de site géologique pressenti (coefficient de sol S).

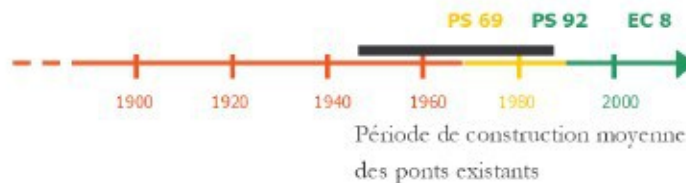


Figure 1 : Période de construction moyenne des ponts et évolution de la réglementation parasismique en France

Pour autant, le risque associé aux ponts et les conséquences de ce risque en cas de séisme diffèrent sensiblement d'un ouvrage à l'autre : certains ouvrages, de par leur conception ou leur typologie, ou parce qu'ils sont relativement peu exposés, présentent a priori un risque modéré face à l'aléa sismique. Pour d'autres, se pose la question de la rentabilité de l'investissement dans des travaux de confortement lourds par rapport à l'enjeu et aux pertes engendrées en cas d'effondrement associé à un événement dont la probabilité d'occurrence est relativement faible. Une vaste campagne de mise en conformité systématique et exhaustive de tous les ponts existants vis-à-vis des exigences réglementaires actuelles pour les ouvrages neufs serait, quoi qu'il en soit, inenvisageable compte tenu du nombre d'ouvrages à traiter, des coûts engendrés pour la société et les maîtres d'ouvrages, et du faible bénéfice pour la sécurité publique. Par conséquent, il apparaît indispensable d'établir une stratégie cohérente de prise en compte de l'aléa sismique sur le patrimoine et de classer les ouvrages à diagnostiquer puis éventuellement à traiter par ordre de priorité.

En France, 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 (au sens de l'arrêté du 15 septembre 1995 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux ponts de la catégorie dite « à risque normal ») à procéder à une démarche de diagnostic et éventuellement de renforcement de leurs ouvrages existants vis-à-vis de l'aléa sismique. Cependant l'absence de cadre normatif ou méthodologique pour accompagner ces études, ajoutée au fait que la probabilité qu'une infrastructure donnée (dont la durée d'utilisation théorique est généralement de l'ordre de 100 ans) soit soumise à un séisme majeur de niveau réglementaire (dont la période de retour de calcul varie entre 475 ans et 1250 ans selon l'importance accordée à l'ouvrage), se sont avérés en pratique très peu incitatifs pour les décideurs et maîtres d'ouvrages. En effet, d'une part les phénomènes sismiques se caractérisent par un niveau d'agression réglementaire des structures rendant difficile voire impossible, tant financièrement que techniquement, la mise à niveau des ouvrages existants ; d'autre part dans les pays à sismicité modérée comme la France, la politique de gestion du patrimoine doit régir l'intérêt public au travers d'une dualité combinant une bonne utilisation des deniers publics et une bonne maîtrise des conséquences humaines et socio-économiques de l'aléa sismique.

Sur la base de ce constat, un certain nombre de choix d'ordre stratégique ou décisionnel s'imposent aux gestionnaires ou aux Maîtres d'ouvrages, qu'ils soient publics ou privés : quels ouvrages faut-il diagnostiquer en priorité ? A partir de quel niveau de risque faut-il renforcer les ponts existants ? Quel niveau de performance faut-il viser dans le cadre de leur renforcement, en fonction des enjeux et des contraintes techniques ou financières propres à chaque cas ?

La décision du durcissement au séisme des itinéraires routiers, et donc des ouvrages d'art qui les composent, repose généralement sur la comparaison entre le coût du renforcement et les pertes résultant d'un tremblement de terre. Ces pertes intègrent, les coûts de réparation ou de reconstruction des ouvrages, mais aussi et surtout les pertes humaines directement associées à l'effondrement ainsi que toutes les conséquences sociales, humaines et économiques résultant de l'interruption de l'itinéraire. Ces pertes induites s'avèrent en pratique beaucoup plus élevées que la valeur intrinsèque des ponts, en particulier, lorsque ceux-ci supportent des routes stratégiques ou des réseaux vitaux pour la population (eau, gaz, électricité, télécommunication...). Leur bonne tenue au séisme est alors prépondérante dans la gestion de crise et l'accès des secours, contribuant ainsi très significativement à la limitation du nombre total de victimes.

A partir de cet exposé de la problématique et du contexte général, l'objectif de la présente note consiste à présenter une réflexion globale relative à la prise en compte du risque sismique sur le patrimoine d'ouvrages d'art existant. Elle traite successivement des aspects suivants :

- présentation du cadre législatif en vigueur et des référentiels normatifs et méthodologiques,
- réflexion à l'échelle du territoire national ou inter-régionale visant à prioriser les itinéraires routiers (ou tronçons d'itinéraires) les uns par rapport aux autres,
- réflexion à l'échelle locale visant à prioriser les ouvrages le long d'un itinéraire ou tronçon d'itinéraire,
- réflexion à l'échelle d'un ouvrage donné visant à définir des objectifs de durcissement sismique efficaces et réalistes et à proposer des solutions de renforcement optimales pour les ouvrages jugés les plus sensibles, incluant une réflexion spécifique sur les problématiques d'élargissements d'ouvrages et de remplacements de tabliers.

Outre l'évolution des codes de calculs et la prise en compte tardive de l'aléa sismique dans ces derniers (autour de 1970), cette réflexion s'inscrit dans le cadre de l'évolution récente du zonage sismique national (décret n°2010-1255 du 22 octobre 2010) qui conduit au fait que davantage d'ouvrages sont désormais concernés par la prise en compte de cet aléa et qu'un grand nombre d'entre eux, qui n'ont jamais été calculés au séisme, se retrouvent désormais situés dans des zones identifiées comme potentiellement sismiques.

Remarque : Certaines parties de cette note s'inspirent largement du projet de guide « Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants » dans sa version de mai 2013. C'est le cas en particulier des §5 et 6 qui en sont directement extraits. Cette note apporte des compléments de réflexion sur deux aspects non traités dans ce guide et qui concernent d'une part la question de la hiérarchisation des itinéraires entre eux (approche « grande échelle » - cf. §4) et d'autre part la problématique spécifique des élargissements d'ouvrages et des remplacements de tablier en utilisant tout ou partie des appuis existants (cf. 7). Les extractions du guide précité ont pour objectif de conférer à la présente note un caractère autoportant permettant de couvrir de manière complète l'ensemble de la problématique.

2. CADRE LÉGISLATIF, RÉFÉRENCES NORMATIVES ET MÉTHODOLOGIQUES

2.1 - Cadre législatif

Depuis 2010, la nouvelle législation sismique nationale est publiée, ou en cours de publication. Elle se compose de deux décrets généraux et de plusieurs arrêtés traitant plus spécifiquement des règles de dimensionnement parasismiques applicables aux différents types de structures de génie civil : bâtiments (neufs et existants), ponts (neufs uniquement), équipements (canalisations, tuyauteries, silos, réservoirs, structures hautes et élancées...), installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE)...

2.1.1 - Nouveau zonage et classement général des ouvrages et constructions en classes de risque et catégories d'importance

Le **Décret n°2010-1254 du 22 octobre 2010 relatif à la prévention du risque sismique** fixe le cadre général pour l'application des règles de construction parasismiques en France. Il définit notamment les dénominations relatives aux ouvrages dits "à risque normal" et aux ouvrages dits "à risque spécial".

La classe dite "à risque normal" comprend les bâtiments, équipements et installations pour lesquels les conséquences d'un séisme demeurent circonscrites à leurs occupants et à leur voisinage immédiat. Ces bâtiments, équipements et installations sont répartis en quatre catégories d'importance notées I, II, III et IV, selon la terminologie suivante :

- Catégorie d'importance I : ceux dont la défaillance ne présente qu'un risque minime pour les personnes ou l'activité économique ;
- Catégorie d'importance II : ceux dont la défaillance présente un risque moyen pour les personnes ;
- Catégorie d'importance III : ceux dont la défaillance présente un risque élevé pour les personnes et ceux présentant le même risque en raison de leur importance socio-économique ;
- Catégorie d'importance IV : ceux dont le fonctionnement est primordial pour la sécurité civile, pour la défense ou pour le maintien de l'ordre public. »

La définition de ces catégories d'importance est alors déclinée et précisée dans chacun des arrêtés spécifiques en fonction du type de structure.

La classe dite "à risque spécial" comprend les bâtiments, les équipements et les installations pour lesquels les effets sur les personnes, les biens et l'environnement de dommages même mineurs résultant d'un séisme peuvent ne pas être circonscrits au voisinage immédiat des-dits bâtiments, équipements et installations. L'ensemble des ouvrages d'art, hormis les ponts-canaux, relève du risque normal. Toutefois, en dehors des ponts-canaux, les ouvrages couvrant ou intégrés dans des structures relevant de classements spéciaux peuvent sortir du domaine normal. Leur classement relève d'une analyse au cas par cas.

Le **Décret n°2010-1255 du 22 octobre 2010 portant délimitation des zones de sismicité du territoire français** divise le territoire national en cinq zones de sismicité croissante :

- Zone de sismicité 1 (très faible) ;
- Zone de sismicité 2 (faible) ;
- Zone de sismicité 3 (modérée) ;
- Zone de sismicité 4 (moyenne) ;
- Zone de sismicité 5 (forte).

La zone 5, qui se limite aux îles antillaises, correspond au niveau d'aléa le plus élevé du territoire national. La métropole et les autres DOM présentent quatre zones sismiques, de la zone 1 de très faible sismicité (bassin aquitain, bassin parisien...) à la zone 4 de sismicité moyenne (fossé rhénan, Provence, Côte d'Azur, massifs alpin et pyrénéen). Par rapport aux anciennes pratiques (Décret n°91-461 du 14 mai 1991 et anciennes règles PS92), le zonage sismique de la France est désormais défini au niveau communal et non plus cantonal.

En outre, ce nouveau Décret modifie profondément l'étendue et la localisation géographique des zones de sismicité du territoire

français (cf. (Figure 2). Le nombre de communes concernées par le risque sismique (zones 2 à 5 selon la nouvelle dénomination) subit ainsi une augmentation significative, puisqu'il passe de 5 000 communes environ en zone sismique en 1991 (soit 17% du territoire) à plus de 20 000 avec le nouveau zonage (soit 66% du territoire).

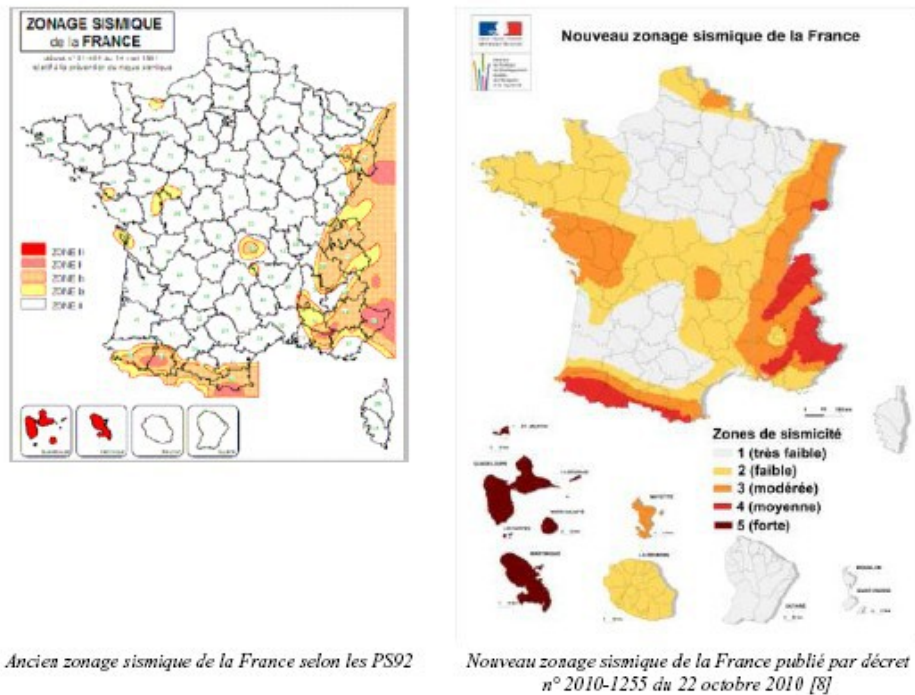


Figure 2 : Évolution de la carte d'aléa sismique de la France entre 1995 et 2010

Ce nouveau zonage est basé non plus sur une approche déterministe (plus fort niveau de séisme historiquement connu ou vraisemblable) mais sur une approche probabiliste, conforme aux règles de calcul de l'Eurocode 8 (niveaux de séisme associés à une période de retour donnée). Ce changement d'approche se traduit en pratique par une modification à la baisse des accélérations de calcul au rocher dans les zones déjà considérées sismiques dans l'ancien zonage (Figure 3). Ce constat est néanmoins à nuancer par la prise en compte sensiblement plus pénalisante des conditions de site lithologiques (coefficient de sol S pouvant atteindre jusqu'à 1,8 selon les arrêtés spécifiques mentionnés ci-dessous, pour les sites caractérisées par la présence de sols de mauvaise qualité au sens de l'Eurocode 8).

| Anciennes | | | | | Nouvelles | | | | |
|-----------|---------|-----|-----|-----|-----------|------------|-----|------|------|
| Zones | Classes | | | | Zones | Catégories | | | |
| | A | B | C | D | | I | II | III | IV |
| 0 | X | X | X | X | 1 | X | X | X | X |
| Ia | X | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2 | X | 0,7 | 0,84 | 0,98 |
| Ib | X | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3 | X | 1,1 | 1,32 | 1,54 |
| II | X | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4 | X | 1,6 | 1,92 | 2,24 |
| III | X | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 5 | X | 3,0 | 3,6 | 4,2 |

Figure 3 : Évolution des accélérations de calcul au rocher

2.1.2 - Cas des bâtiments et de certaines installations classées

L'Arrêté du 22 octobre 2010 (modifié juillet 2011 et octobre 2012) relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal » (dit Arrêté « bâtiments ») précise, en la déclinant au cas des bâtiments, la définition des quatre catégories d'importance des constructions de la classe dite "à risque normal" telles que définies par le Décret n°2010-1254 du 22 octobre 2010. Il impose l'application de l'Eurocode 8-1 pour la construction de bâtiments neufs et précise les compléments nécessaires apportés par l'administration française à cette norme et à son annexe nationale (accélérations de référence et de calcul, coefficients d'importance associés aux différentes catégories, paramètres des spectres de

réponse...).

L'article 3 (3°) de l'Arrêté fixe en outre les règles qui s'appliquent aux bâtiments existants :

- La catégorie d'importance à considérer pour l'application des dispositions constructives est celle qui résulte du classement du bâtiment après travaux ou changement de destination.
- Les extensions de bâtiments désolidarisées par un joint de fractionnement respectent les règles applicables aux bâtiments neufs.
- Les travaux, de quelque nature qu'ils soient, réalisés sur des bâtiments existants ne doivent pas aggraver la vulnérabilité de ceux-ci au séisme.

A noter que cette prescription pose en pratique quelques questionnements et difficultés sur la définition quantitative de l'aggravation de la vulnérabilité sismique (ajout de panneaux solaires, antennes de réception, paraboles...)

- En cas de travaux visant uniquement à renforcer le niveau parasismique d'un bâtiment, le niveau de dimensionnement de ce renforcement au sens de la norme NF-EN 1998-3 décembre 2005 « évaluation et renforcement des bâtiments », à savoir quasi-effondrement, dommage significatif ou limitation des dommages relève du choix du maître d'ouvrage.
- En cas de remplacement ou d'ajout d'éléments non structuraux (à partir de zone 2-cat. III ou zone 3-cat. II), ceux-ci respecteront les dispositions prévues dans la norme NF EN 1998-1 septembre 2005 pour ces éléments.
- En cas de travaux ayant pour objet d'augmenter la SHON initiale de plus de 30% (zone 2-cat. IV ou zone 3-cat. II, III, IV ou zone 4-cat. II) ou de plus de 20% (zone 4-cat. III et IV, zone 5-cat. II, III, IV) ou supprimant plus de 30% d'un plancher à un niveau donné (zone 2-cat. IV ou zones 3, 4, 5-cat. II, III, IV), ou de supprimer plus de 20 % du contreventement vertical (zone 4-cat. III, IV ou zone 5-cat. II, III, IV), ou de mettre en place des équipements lourds en toiture (zones 4, 5-cat. III, IV), il sera fait application de la norme NF EN 1998-1 septembre 2005 avec la valeur d'accélération $a_{gr} = 60\%$ de l'accélération de référence réglementaire prise pour les bâtiments neufs.

L'Arrêté du 24 janvier 2011 fixant les règles parasismiques applicables à certaines installations classées (dit Arrêté « ICPE ») concerne quant-à lui les équipements au sein d'installations susceptibles de conduire, en cas de séisme, à un ou plusieurs phénomènes dangereux dont les zones des dangers graves pour la vie humaine dépassent les limites du site sur lequel elles sont implantées.

Cela concernera par exemple les équipements de stockage de matières dangereuses (explosions gaz et pétrole notamment, contamination chimique ou bactériologique...), en dehors des centrales nucléaires et des barrages qui sont soumis à un cadre et à une législation très spécifiques.

Cet arrêté fixe toutes les règles de construction à appliquer, **y compris en zone de sismicité 1**, et précise les **niveaux d'aléas sismiques (ou accélérations de calcul) majorés** à prendre en compte dans le dimensionnement, correspondant à l'application d'un coefficient d'importance équivalent $\gamma_I=2,2$ (contre 1,4 pour la catégorie d'importance IV de la classe à risque normal).

Concernant les infrastructure existantes, l'Arrêté précise en outre que les études de diagnostic, intégrant un niveau d'aléa sismique correspondant à l'application d'un coefficient d'importance équivalent $\gamma_I=1,85$, seront à produire au plus tard pour le 31 décembre 2015. Il est également indiqué qu'avant le 31 décembre 2016, le préfet fixera par arrêté l'échéancier de mise en œuvre des moyens techniques nécessaires à la protection parasismique des équipements, sans toutefois dépasser le 1^{er} janvier 2021.

2.1.3 - Cas des ponts

L'Arrêté du 26 octobre 2011 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux ponts de la classe dite « à risque normal » (dit Arrêté « ponts ») remplace et abroge l'ancien Arrêté du 15 septembre 1995. Sont visés par cet Arrêté les ponts nouveaux définitifs, incluant les passerelles, publics ou privés ainsi que les murs de soutènement qui en sont solidaires.

Sur le même format que l'Arrêté « bâtiments », il précise, en la déclinant au cas des ponts, la définition des quatre catégories d'importance des ouvrages de la classe dite "à risque normal" telles que définies par le Décret n°2010-1254 du 22 octobre 2010. Il impose l'application de l'Eurocode 8-2 pour la construction des ponts nouveaux définitifs et précise les compléments nécessaires

apportés par l'administration française à cette norme et à son annexe nationale (accélération de référence et de calcul, coefficients d'importance associés aux différentes catégories, paramètres des spectres de réponse...).

L'Arrêté exclut explicitement les ponts de catégorie d'importance I ou situés en zone de sismicité très faible (zone 1) du champ d'application obligatoire des règles parasismiques qui y sont définies.

A noter que les définitions des catégories d'importances I, II, III et IV sont strictement conformes à celles des classes A, B, C, D de l'ancien Arrêté, à ceci près que l'alignement de la catégorie d'importance d'un ouvrage dont l'endommagement pourrait provoquer des dommages à un bâtiment, un équipement ou une installation de catégorie d'importance supérieure, sur celle de l'installation menacée est limitée aux seules installations de catégorie IV.

Contrairement aux cas des bâtiments et installations classées, le champ d'application de cet Arrêté se limite strictement aux ouvrages nouveaux définitifs.

Enfin, la phrase présente dans l'ancien Arrêté du 15 sept. 1995 : « *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.* », jugée trop pénalisante, a été supprimée dans cette nouvelle version.

Nota : Dans sa version de janvier 2000, le guide Sétra/SNCF « Ponts courants en zone sismique – Guide de conception » indiquait en commentaire de cette phrase que : « *Le réemploi d'appui (pile ou culée) n'est en général possible que si la liaison tablier/appui est réalisée à l'aide d'un appareil d'appui glissant. Il convient alors de créer un appui fixe pour l'ouvrage sur un appui qui sera alors soit renforcé, soit remplacé s'il s'agit d'un appui existant.* »

2.1.4 - Autres documents officiels faisant référence à la problématique de la prise en compte du risque sismique sur les ponts existants

2.1.4.a - *Circulaire du 26 avril 2002 relative à la prévention du risque sismique*

Cette circulaire « encourage les propriétaires publics ou privés de bâtiments, équipements et installations de classe C ou D (ancienne terminologie des catégories d'importance III et IV) à procéder à une démarche de diagnostic et éventuellement de renforcement de leurs ouvrages existants vis-à-vis de l'aléa sismique. »

2.1.4.b - *Plans de Prévention des Risques Sismiques (PPRS)*

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...

A noter toutefois que le caractère assez vague de ces textes fait qu'ils sont peu voire jamais appliqués dans les faits...

2.2 - **Références normatives**

2.2.1 - Normes de calcul : les Eurocodes et leurs annexes nationales

Les normes de calcul à utiliser sont les Eurocodes et leurs annexes nationales. L'Eurocode 8 (ou norme NF EN 1998) fait en effet référence à tous les Eurocodes matériaux et de charges avec lesquels il est totalement compatible. A noter néanmoins que contrairement à la plupart des autres Eurocodes qui sont d'application volontaire (selon le décret n°2006 du 1 août 2006 abrogeant L'article 13 du décret n° 84-74), l'Eurocode 8, qui touche à la sécurité publique au sens de l'article 12 du décret de 1984 modifié, est d'application obligatoire, y compris pour les ouvrages non-calculés avec les Eurocodes « matériaux ». L'Eurocode 8 n'est pas un texte unique, mais est composé de 5 textes européens, ayant chacun une annexe nationale. Pour les ponts, seuls les Eurocodes 8 parties 1 (chapters relatifs aux règles générales et actions sismiques), 2 (Ponts), et 5 (Fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques) sont utiles. **Ces parties ne concernent cependant que les ouvrages neufs et sont exclusivement rédigées dans cette optique.**

Ce nouveau corpus normatif permet d'intégrer les dernières avancées scientifiques et technologiques relatives à la connaissance et à la prise en compte du risque sismique (définition et représentation de l'aléa sismique, comportement dynamique des structures sous sollicitations sismiques, etc.) dans la conception et le dimensionnement des ouvrages d'art.

A noter que l'Eurocode 8-3 « Évaluation et renforcement des bâtiments » traite spécifiquement de la problématique de l'existant. Si elle s'applique exclusivement aux bâtiments, cette partie de l'Eurocode 8 définit néanmoins un certain nombre de principes et notions pouvant être généralisées aux ponts, notamment :

- **La définition des états-limites de calcul (quasi-effondrement, dommages significatifs, limitation des dommages) ;**
- **Les données d'entrées et niveaux de connaissance nécessaires au diagnostic ;**
- **Les méthodes d'analyse et de calcul spécifique en fonction des matériaux constitutifs et de la technique de renforcement ;**
- **Les objectifs et principes minimums de renforcement.**

2.2.2 - Normes produits

Mis à part les Eurocodes, d'autres normes sont utiles pour la conception parasismique, notamment pour les appareils d'appui et les dispositifs parasismiques : norme NF EN 15129 "Dispositifs antisismiques" et norme NF EN 1337 « Appareils d'appui structuraux » pour la justification des appareils d'appui avec les sollicitations dites « de service » et leur compatibilité vis-à-vis des situations « non-sismiques ».

2.3 - Références et outils méthodologiques

2.3.1 - Méthodes Sismoa/Sismur/Sisroute

En règle générale, l'évaluation quantitative de la vulnérabilité d'un ouvrage requiert une analyse structurelle assez sophistiquée. Dans le cadre de la gestion d'un patrimoine, il est important de pouvoir disposer de méthodes simples et rapides d'appréciation globale de la sensibilité (ou vulnérabilité) des ouvrages et permettant une première hiérarchisation de manière à orienter de façon pertinente les mesures de traitement du risque.

En 1997, la Direction des Routes du Ministère de l'Équipement et des Transports a passé commande au Sétra d'une méthode d'évaluation sommaire et qualitative de la vulnérabilité sismique des ouvrages d'art. Cette commande a conduit, dans le cadre d'une collaboration au sein du Réseau Scientifique et Technique de l'Équipement entre le Sétra et le CETE Méditerranée, à l'élaboration de l'outil Sismoa.

Cette procédure est basée sur l'analyse du comportement des ponts issue des retours d'expérience des séismes passés et repose essentiellement sur des critères typologiques et géométriques facilement accessibles.

La méthodologie Sismoa est validée et téléchargeable sur le site Internet du Sétra. Le présent paragraphe se contente d'en rappeler les principaux concepts.

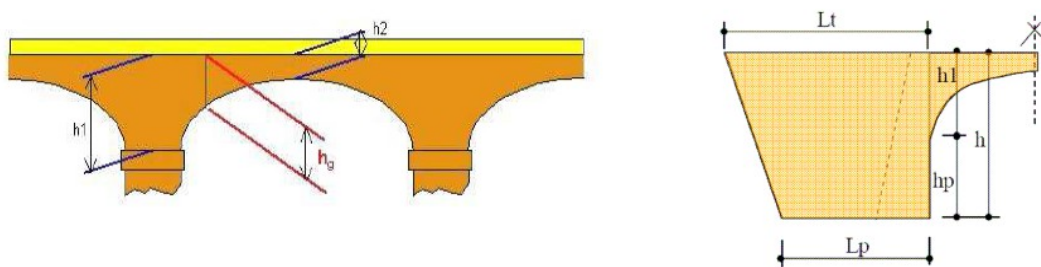
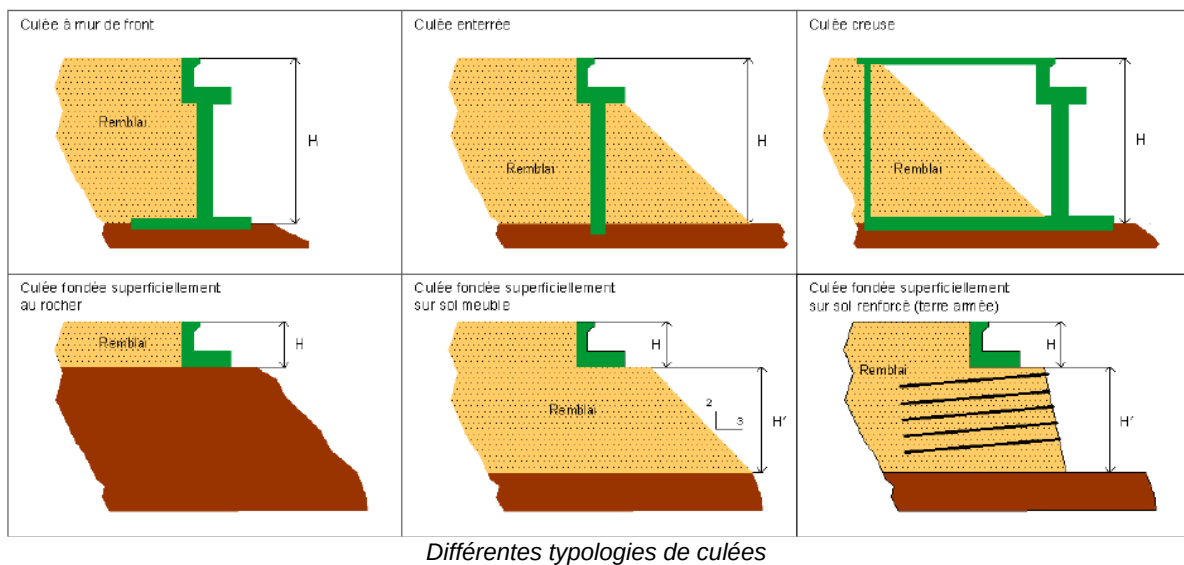
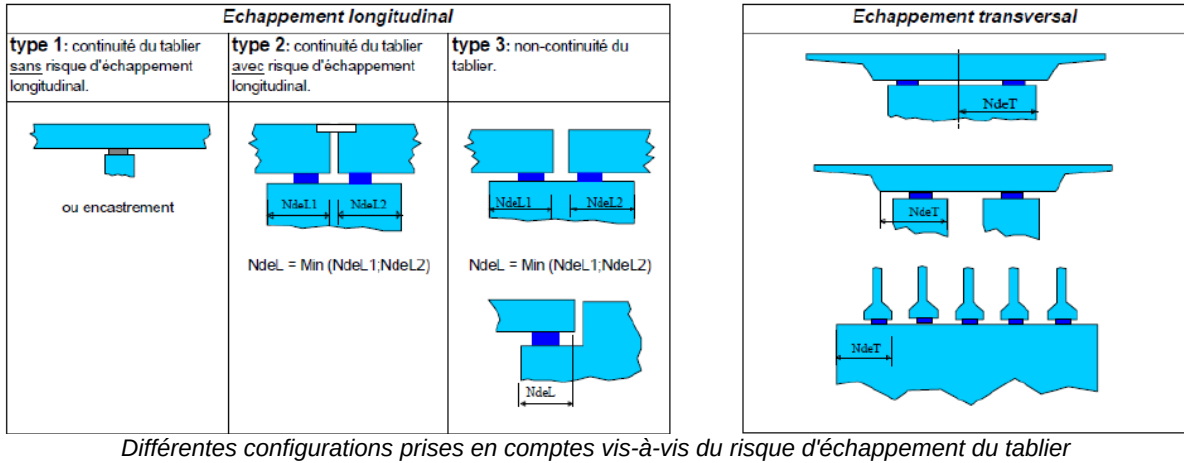
Pour un ouvrage donné, l'approche Sismoa s'appuie sur la détermination d'indices élémentaires de vulnérabilité, relatifs au phénomène vibratoire imposé par le séisme (V_{vib}) et à ses effets induits tels que les chutes de blocs (V_{blocs}), les glissements de terrain (V_{gliss}), ou encore la liquéfaction du sol (V_{liq}) : forme et régularité des hauteurs d'appui, masse du tablier, conditions d'appui, nombre de travées, courbure, biais, nature et profondeur des fondations, redondance structurelle, présence de protections extérieures contre chutes de blocs (écrans, filets, merlons, fosses...). La méthode a été établie et calibrée sur différents itinéraires tests de façon à s'adapter au mieux au contexte français (niveaux sismiques, typologies d'ouvrages ou parties d'ouvrage et matériaux utilisés).

Le recensement et le traitement des données au niveau départemental s'appuient sur :

- Un traitement informatique à partir des bases de données existantes (Lagora par exemple pour les ouvrages de l'Etat) ;
- Une approche complémentaire, à partir des dossiers d'ouvrages quand ils existent, pour les données non accessibles dans les bases de données ;
- Une visite sur le terrain pour les dossiers d'ouvrages non suffisamment renseignés.

La méthode est basée sur l'analyse indépendante de la vulnérabilité des différents éléments structurels qui composent l'ouvrage (piles, culées, tablier, fondations, voûte et tympans dans le cas d'un pont en maçonnerie... - cf. Figure 4) et l'identification pour chacun d'eux des typologies, éléments de conception générale ou caractéristiques géométriques favorables ou néfastes. En outre, l'indice de

vulnérabilité sismique globale est directement impactée par la date de construction de l'ouvrage (ou règlement de calcul utilisé pour sa conception) et de son état plus ou moins pathologique (ou classe IQOA).



Paramètres géométriques influant sur la vulnérabilité des ponts en maçonnerie

Figure 4 : Exemples de paramètres typologiques et géométriques intégrés dans le calcul de la vulnérabilité des ponts selon la méthode Sismoa

Au final, l'outil Sismoa aboutit à la détermination de quatre indices de vulnérabilité vis-à-vis du phénomène vibratoire et des effets induits : liquéfaction, glissements de terrain et chutes de blocs (resp. V_{vib} , V_{liq} , V_{gliss} , V_{blocs}), chacun compris entre 0 et 1.

A l'échelle d'un itinéraire ou d'un parc d'ouvrages, ces résultats, croisés avec des considérations d'« aléas » et d'« importance » (cf. plus loin) permettent de hiérarchiser les ponts par ordre de sensibilité, en vue d'une analyse socio-économique des risques par rapport aux enjeux.

Par ailleurs, les indices de vulnérabilité partiels relatifs aux différentes parties de l'ouvrage permettent d'identifier rapidement les points faibles structurels potentiels et d'anticiper les mesures de confortement à envisager et les ordres de grandeur des coûts relatifs associés, dans le cadre par exemple d'une étude préliminaire de planification d'opération.

De façon à caractériser le risque sismique (ou risque de défaillance en cas de séisme résultant du croisement de l'aléa et de la vulnérabilité) à l'échelle des itinéraires ou d'un parc d'ouvrages, la méthode Sismoa a été complétée par deux outils, baptisés respectivement Sismur et Sisroute.

L'outil Sismur, en cours de développement par le CETE Méditerranée, traite de la vulnérabilité des murs de soutènement, toujours sur la base de critères géométriques, mécaniques et typologiques relativement accessibles (hauteur et épaisseur en tête, matériaux constitutifs, état général, pente et caractéristiques géotechniques des terrains...), et selon quatre modes de rupture identifiés : par glissement, par renversement, par poinçonnement du sol ou par rupture interne du mur. Pour chacun de ces modes de rupture, il est tenu compte du rapport entre l'accélération seuil provoquant l'initiation du phénomène et l'accélération conduisant à des pathologies significatives en terme de continuité de l'itinéraire. Les dommages sur la chaussée sont par exemple plus importants dans un mode de rupture interne par cisaillement que par glissement de l'ouvrage sur sa base. Enfin, un coefficient γ_{config} a été introduit, qui permet de prendre en compte la largeur de chaussée restant praticable pour les véhicules de secours (Figure 5).

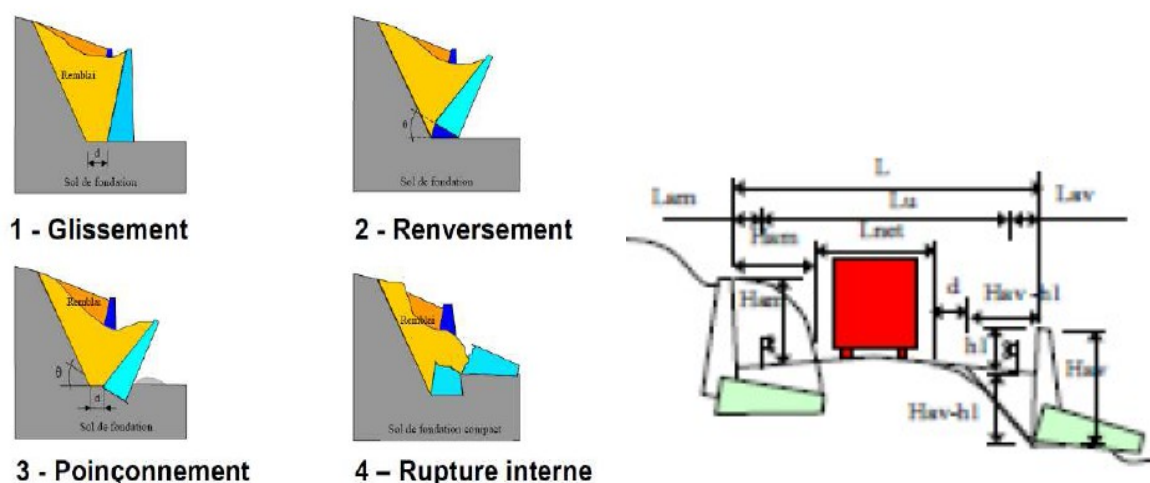


Figure 5 : Modes de rupture des murs de soutènement identifiés dans le cadre de la méthode Sismur et impact sur le niveau de service de la route

L'outil Sisroute, également en phase de développement, permet l'évaluation des risques par itinéraire, par croisement des indices de vulnérabilité importés de Sismoa et Sismur avec les aléas à considérer au droit des ouvrages : aléa sismique vibratoire (a_{vib}), liquéfaction (a_{liq}), glissements de terrain (a_{gliss}) et chutes de blocs (a_{blocs}), pour différents scénarii sismiques :

- carte de l'ancien zonage sismique réglementaire PS92 basée sur les plus forts séismes historiques connus,
- cartes d'aléa probabilistes qui ont conduit au nouveau zonage sismique national publié par décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010 et qui associent des niveaux d'accélération à des périodes de retour,
- ou tout séisme, réel ou fictif, caractérisé par la position de son épicer, la profondeur du foyer et sa magnitude, et dont la diffusion des accélérations ressenties sur la zone d'étude sont simulées à partir d'une loi de propagation empirique.

Ces niveaux d'accélération sont alors pondérés localement pour tenir compte des éventuels effets de site géologiques ou topographiques, en fonction des types de sol rencontrés et des conditions de relief (Figure 6).

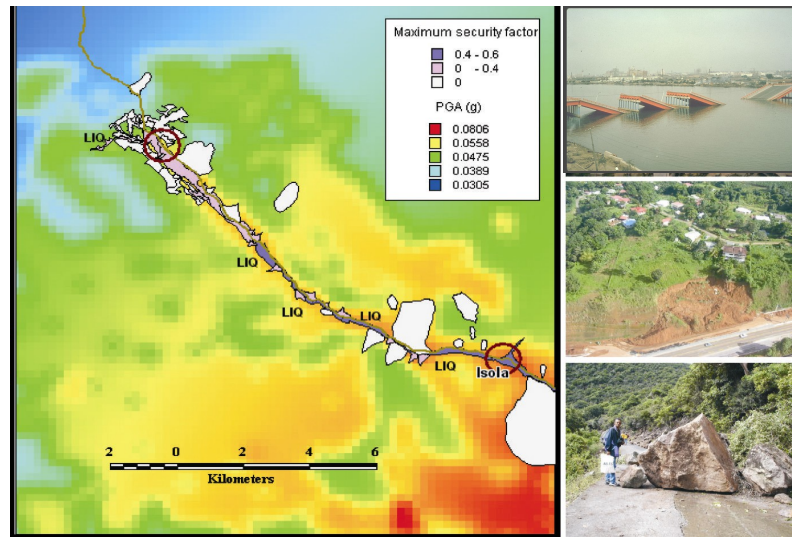


Figure 6 : Représentation de la propagation des accélérations dans Sisroute et prise en compte des effets de site et induits

Les indices de risque sont alors obtenus par combinaisons mathématiques entre les indices d'aléa a_{vib} , a_{liq} , a_{gliss} et a_{blocs} définis dans Sisroute et les indices de vulnérabilité V_{vib} , V_{liq} , V_{gliss} et V_{blocs} définis dans Sismoa.

L'approche a été calibrée statistiquement et empiriquement sur la base d'études de diagnostic plus précises (modélisations numériques) menées sur une vingtaine d'ouvrages de typologies différentes situés dans les vallées de l'arrière pays niçois, autour de l'agglomération grenobloise ou en Martinique. L'indice de risque R_{vib} a par ailleurs été défini de sorte que :

- R_{vib} soit compris entre 0 et 1 lorsque l'aléa de scénario est compris respectivement entre la moitié et le double de la valeur seuil critique (amenant l'ouvrage à sa limite de résistance théorique ou correspondant au seuil de déclenchement d'un phénomène induit pondéré par la vulnérabilité de l'ouvrage à ce phénomène : liquéfaction, chute de blocs ou glissement de terrain) ;
- $R_{vib} = 0,5$ lorsque l'aléa de scénario est égal à la valeur seuil critique théorique

Si l'indice de risque global R (enveloppe des indices R_{vib} , R_{liq} , R_{gliss} et R_{blocs}) est supérieur à 0,6, le risque de ruine du pont est considéré comme avéré. Inversement, si $R < 0,4$, le risque de ruine du pont est considéré comme peu probable.

L'exploitation des résultats à l'aide d'outil cartographique SIG permet, à l'échelle d'un itinéraire ou d'une zone donnée, de représenter les vulnérabilités et indices de risque de chaque pont et de chaque mur de soutènement, contribuant ainsi à une visualisation rapide et efficace du risque de coupure de l'itinéraire pour les différents scénarii sismiques envisagés. La localisation sur le fond de plan des équipements stratégiques (hôpitaux, casernes, aéroports...) ainsi que des éventuelles déviations possibles permettent ainsi d'identifier rapidement les points faibles de l'itinéraire, et par conséquent les sections et ouvrages à renforcer en priorité (Figure 7).

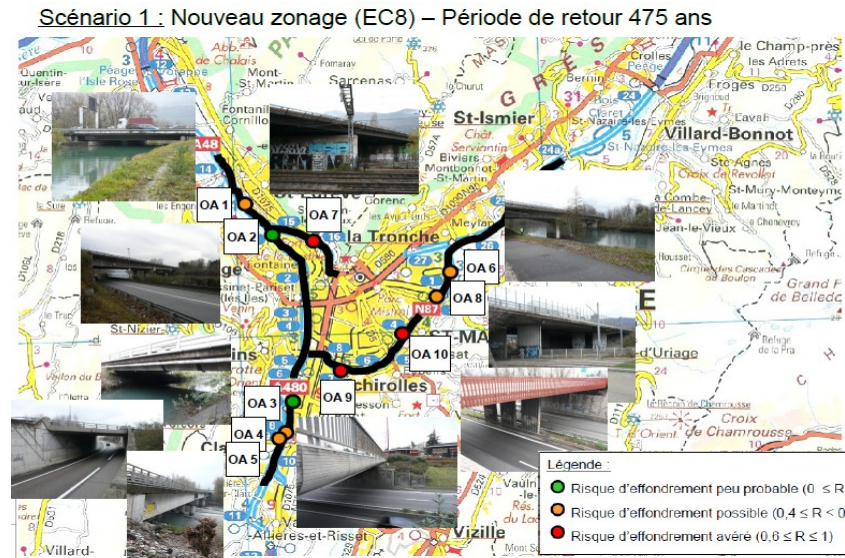


Figure 7 : Exemple d'application des méthodes Sismoa/Sisroute, pour l'évaluation préliminaire du risque sismique sur les principaux ouvrages du réseau routier national de desserte de l'agglomération Grenobloise dans le cadre de l'exercice de simulation de crise sismique « Richter 38 »

2.3.2 - Guide « Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants » (à paraître)

Dans la continuité des études Sismoa/Sisroute, un **groupe de travail piloté par le Sétra** travaille depuis 2006 à l'édition d'un **guide méthodologique intitulé « Diagnostic et renforcement sismique des ponts existants »**. Rassemblant l'expertise d'ingénieurs spécialisés d'organismes publics (Sétra, CETE, LCPC, LRPC, SNCF...) et privés (Sociétés d'autoroutes, entreprises de Génie Civil, bureaux d'études et de contrôle...) et s'inspirant d'actions menées à l'étranger, notamment aux Etats-Unis Californie (Priestley et al., 1996), au Japon (Légeron, 2001), en Italie (PIARC C4.4, 2007) et surtout en Suisse (OFROU, 2005) où le contexte sismologique et les habitudes constructives sont très similaires à ceux de la France métropolitaine, ce guide a pour objectif d'adapter ces différentes approches au contexte et spécificités françaises, en termes de typologies et caractéristiques d'ouvrages, de niveau de sismicité modérée et de considérations économiques et décisionnelles (niveaux de performance à atteindre, coûts). Il intègre également, en les adaptant au cas particulier des ouvrages d'art, les recommandations et prescriptions générales de l'EC8-3 « Évaluation et renforcement des bâtiments » (définition des états-limites de calcul, reconnaissances préliminaires, méthodes d'analyse, démarche générale et objectifs de renforcement...).

Ce guide est **destiné aux maîtres d'ouvrage et gestionnaires ayant à gérer un patrimoine, aux maîtres d'œuvre et aux ingénieurs d'études ayant à diagnostiquer et le cas échéant à renforcer des ouvrages d'art vis-à-vis du risque sismique**. Il aborde la hiérarchisation des ouvrages et l'identification de ceux à traiter prioritairement à l'échelle d'un itinéraire ou tronçon d'itinéraire donné, la définition des aléas à considérer, le recueil des informations nécessaires à un bon diagnostic, l'instrumentation et les investigations de terrain éventuellement nécessaires, la description détaillée des méthodes d'analyse à mettre en œuvre, les niveaux de performance à atteindre ainsi qu'une description de différentes stratégies et techniques de renforcement possibles.

Il répond ainsi à certains des objectifs du Programme National de Prévention du Risque Sismique présenté en automne 2005 par le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, en particulier dans le cadre de la problématique "Réflexions sur la prise en compte du risque sismique dans les infrastructures et les réseaux".

La présente note apporte des compléments de réflexion sur deux aspects non traités dans ce guide et qui concernent d'une part la question de la hiérarchisation des itinéraires entre eux (approche « grande échelle » - cf. §4) et d'autre part la problématique spécifique des élargissements d'ouvrages et des remplacements de tablier en utilisant tout ou partie des appuis existants (cf. 7).



Figure 8 : Guide méthodologique Sêtra « Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants » (à paraître)

Les aspects décisionnels, traités dans le chapitre 2 du guide, visent à définir un **niveau acceptable d'abaissement du risque, établi sur la base d'un meilleur optimum performance/coût/enjeux**. Ces aspects seront rappelés aux §5 et 6 de la présente note.

L'objectif consiste dans un premier temps à identifier au sein d'un patrimoine d'ouvrages, les ponts les plus à risque qui doivent faire l'objet d'un diagnostic sismique plus approfondi. Comme dans la plupart des politiques de gestion des risques, les niveaux de priorité dans le cadre des études de diagnostic et de renforcement sismiques des ponts sont à établir sur la base de **trois critères** (Figure 9) :

- L'aléa sismique au niveau du site d'implantation de l'ouvrage, incluant les éventuels effets de site et induits ;
- La présomption de vulnérabilité de la structure, évaluée à partir d'approches sommaires ;
- L'importance socio-économique de l'ouvrage et de l'itinéraire dans lequel il s'intègre.

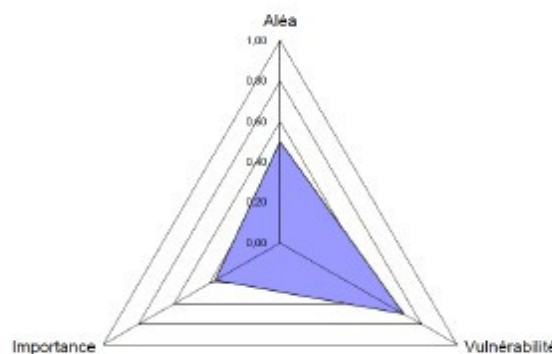


Figure 9 : Principe général de hiérarchisation des ouvrages en fonction des indices normalisés d'aléa, de vulnérabilité et d'importance

Le couplage de l'aléa sismique, représentatif de l'agression sismique prévisible dans la région d'implantation du pont, avec sa vulnérabilité estimée, représentative de sa sensibilité propre aux mouvements dynamiques de type sismique, permet ainsi d'évaluer le risque d'endommagement de l'ouvrage au cours d'une période de référence donnée. Enfin, la prise en compte de l'importance de l'ouvrage, c'est-à-dire de son caractère plus ou moins essentiel pour la société en cas de crise (desserte des hôpitaux, acheminement des secours, reprise rapide de l'activité socio-économique...), permet d'établir le niveau de priorité.

Dans un deuxième temps, le document fournit des éléments permettant d'aiguiller les choix du décideur, en fonction des moyens dont il dispose, sur la décision de renforcement et les niveaux de performance à atteindre. L'approche a d'ores et déjà

été testée dans le cadre de plusieurs études opérationnelles dans le Sud de la France, chacune de ces études contribuant à mieux valider et calibrer la méthode.

Sans portée normative ou réglementaire, ce guide n'a pas vocation à se substituer aux décisions et responsabilités de la puissance publique et des différents maîtres d'ouvrages. Il s'agit uniquement d'un guide méthodologique dont l'objectif consiste à fournir un certain nombre de recommandations générales et à assister les maîtres d'ouvrages et gestionnaires dans la prise de décision dans le cadre d'une politique de renforcement sismique spécifique et volontaire. Sa rédaction et son contenu se veulent néanmoins plus incitatifs et didactiques que l'arrêté bâtiments qui indique simplement que « En cas de travaux visant uniquement à renforcer le niveau parasismique d'un bâtiment, le niveau de dimensionnement de ce renforcement au sens de la norme NF-EN 1998-3, à savoir quasi-effondrement, dommage significatif ou limitation des dommages, relève du choix du maître d'ouvrage. » (cf. §2.1.2).

A noter que la problématique spécifique des élargissements et remplacement de tabliers n'est pas abordée dans ce guide. Elle fait l'objet du chapitre 7 de la présente note.

2.3.3 - Autres références nationales

Parmi les autres documents méthodologiques français de référence traitant de la prise en compte du risque sismique sur les ponts, on pourra citer :

- Le guide Sétra « Ponts en zone sismique – Conception et dimensionnement selon l'Eurocode 8 » (version provisoire de février 2012), qui traite exclusivement de la construction neuve ;
- Le guide AFPS « Dispositions constructives parasismiques des ouvrages en acier, bois, béton et maçonnerie - Nouvelle édition (2011) conforme aux Eurocodes », également exclusivement pour la construction neuve (bâtiments + ponts) ;
- Le cahier technique Sétra/AFPS « Dispositifs parasismiques pour les ponts : principe généraux, conditions de mise en œuvre et méthodes de calcul associées » (à paraître) ;
- Le guide AFPS/CFMS « Procédés d'amélioration et de renforcement de sol sous actions sismiques » - 2012, qui traite notamment de la réduction du risque liquéfaction au droit des constructions ;
- Le guide Sétra « Maîtrise des risques - Application aux ouvrages d'art » (à paraître).

On notera également que certains bureaux d'études (Egis-JMI et Setec-TPI notamment) ont depuis proposé des approches alternatives à Sismoa, en tentant de prendre en compte de manière plus spécifique les problématiques liées aux itinéraires autoroutiers.

2.3.4 - Approches développées à l'étranger

Plusieurs pays, en Europe et dans le monde ont développé des méthodes plus ou moins sophistiquées d'évaluation et de traitement du risque sismique sur leur patrimoine d'ouvrages d'art existants. C'est le cas notamment de la Suisse, de l'Italie, des USA en particulier dans l'État de Californie, et du Japon.

On se référera au §1.3 du projet de guide Sétra « Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants » pour une description plus précise de ces différentes méthodes et de leur mise en œuvre opérationnelle.

3. DÉMARCHE GÉNÉRALE

Les retours d'expérience des principaux séismes majeurs ayant eu lieu dans le monde lors des dernières décennies ont montré que les dégâts sur les infrastructures routières ne concernaient généralement qu'un nombre très limité d'ouvrages sur la totalité du parc existant. Dans la plupart des cas, seuls les ponts les plus anciens ou de typologies identifiées comme particulièrement vulnérables subissent des dommages notables. Ces retours d'expériences ont aussi montré que la situation pouvait être considérablement améliorée en concentrant les efforts sur les ouvrages les plus stratégiques et pour un coût relativement réduit (coût du renforcement de l'ordre de 10% de la valeur de reconstruction de l'ouvrage). Ainsi, les ouvrages précédemment renforcés ont quasi-systématiquement affiché un comportement tout-à-fait satisfaisant, en ne présentant que peu ou pas de dégât, y compris lorsqu'ils avaient été soumis à des niveaux de séismes sensiblement supérieurs à celui pris en compte dans les calculs.

Sur la base de ce constat, la présente note de réflexion propose une approche générale pour la prise en compte du risque sismique sur le patrimoine d'ouvrages d'art existants, qui consiste à procéder par étapes de priorisation successives, correspondant à différentes échelles d'analyse (du plus étendu au plus local) et associées à différents niveaux de raffinement (du plus sommaire au plus sophistiqué). Chacune de ces étapes de priorisation est basée sur la prise en compte des trois mêmes critères : aléa, enjeu, vulnérabilité ; cependant les pondérations associées à ces critères sont calibrées en cohérence avec le niveau de précision ou de pertinence que l'on peut attendre sur chacun d'eux aux différentes échelles d'étude considérées :

1. A l'échelle du territoire national ou inter-régional (qui intéressera préférentiellement la DGITM/DIT ou les sociétés concessionnaires d'autoroute), l'approche consiste à comparer entre eux les itinéraires ou tronçons d'itinéraires. L'accent est mis en priorité sur le critère « enjeu » au travers d'une matrice d'importance combinant la gestion de crise à court terme et la reprise de l'activité socio-économique à moyen et long terme. Le critère « aléa » repose essentiellement sur la nouvelle carte du zonage sismique national, en y superposant les effets de site (lithologique ou topographique) ou potentiellement induits (liquéfaction des sols, chute de blocs, glissements de terrain) évalués à partir d'une analyse en « grandes mailles » : bassin sédimentaire, vallée alluvionnaire, plages et lagunes, zone de relief prononcé... Le critère « vulnérabilité », nécessairement peu précis à cette échelle, est quant-à lui basé sur une analyse très succincte et sommaire (nombre d'ouvrages, pourcentage d'ouvrages non-courants, date de mise en service...) et se trouve par conséquent affecté d'une faible pondération ;
2. A l'échelle locale, d'un itinéraire ou d'un tronçon d'itinéraire (cible préférentielle : gestionnaire de l'itinéraire : société concessionnaire d'autoroute, DIR ou collectivités locales), ou d'une zone géographique donnée d'étendue plus limitée (préfecture ou collectivités locales), l'approche s'appuie sur les outils Sismoa et Sisroute, développés ou en cours de développement, qui permettent un raffinement de la prise en compte de la vulnérabilité pressentie de chaque ouvrage (qui reste néanmoins sommaire et qualitative) et des aléas locaux (effets de site et induits). La prise en compte du critère « enjeu » est complété par la définition d'une matrice d'importance à l'échelle de l'ouvrage intégrant notamment celles relatives aux itinéraires à la fois portés et franchis ainsi que la valeur intrinsèque de la structure ou des conséquences locales de son effondrement ;
3. A l'échelle d'un ouvrage donné (cible préférentielle : maître d'ouvrage ou gestionnaire), identifié comme prioritaire à l'issue des étapes précédentes, l'analyse est cette fois basée sur le projet de guide méthodologique, actuellement en phase de finalisation : « Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants ». La méthode développée dans ce guide s'appuie sur un diagnostic sismique détaillé de l'ouvrage basé sur un calcul numérique dynamique ou pseudo-dynamique de la structure et résultant dans le calcul d'un indice de conformité exprimé comme le rapport entre le niveau de séisme (accélération) maximal que l'ouvrage est capable de supporter et le niveau de séisme réglementaire qui serait considéré dans le cas d'un ouvrage neuf. En fonction des conclusions de ce diagnostic, une étude préliminaire est menée visant à définir la solution et le niveau de renforcement présentant le meilleur compromis performance/coût/enjeu. Les cas particuliers des élargissements d'ouvrages et de remplacements de tabliers en réutilisant tout ou partie des appuis existants constituent une extension de cette dernière approche, mais intègrent en plus une exigence de non-aggravation significative de la vulnérabilité sismique de l'ouvrage par rapport à la situation avant travaux.

Le respect d'une démarche générale consistant à procéder successivement aux trois étapes définies ci-dessus devrait garantir une cohérence globale et une certaine « égalité de traitement du risque » à l'échelle du territoire national. Néanmoins, il est tout-à fait possible pour un maître d'ouvrage donné de procéder directement aux étapes 2 ou 3 sans passer par la ou les étapes précédentes. Ce pourra par exemple être le cas si l'on souhaite procéder directement au diagnostic d'un ouvrage emblématique ou jugé particulièrement sensible. Le logigramme représenté par la Figure 10 ci-dessous récapitule les différentes étapes décrites ci-dessus et permet un aiguillage vers les différents paragraphes de la note traitant de leur mise en œuvre pratique.

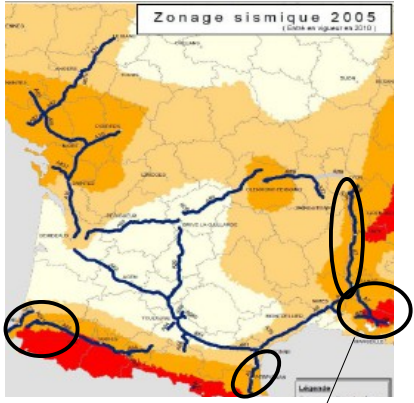
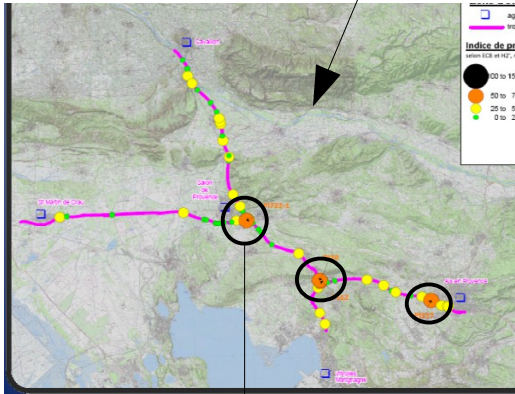
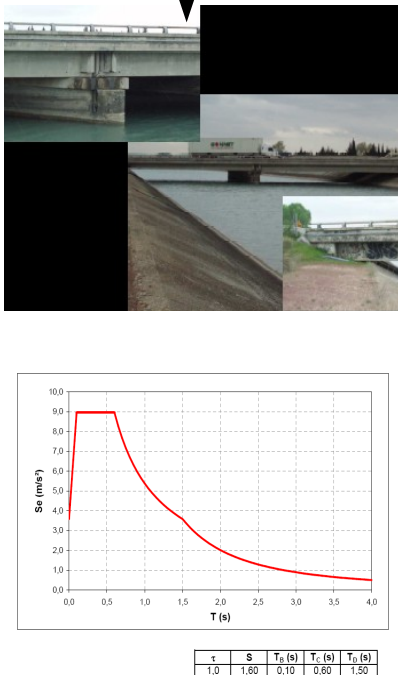
| | | | | |
|---|---|--|---|--|
| <p>Échelle nationale ou inter-régionale</p> |  | <p>- Objectif : Priorisation des itinéraires ou tronçons d'itinéraires sur une zone étendue (territoire national ou inter-régional) - Cibles : DGITM, sociétés concessionnaires d'autoroute... - Critères de hiérarchisation privilégiés : Enjeux stratégiques, aléas « grandes mailles » - Méthode proposée : Analyse préliminaire très sommaire - Outils : Matrice d'importance « itinéraires », matrice de risque basée sur les critères très simplifiés, guide Sétra « Maîtrise des risques - Application aux ouvrages d'art » - Chapitre de la note : §4</p> | | |
| <p>Échelle locale ou itinéraire</p> |  | <p>- Objectif : Priorisation des ouvrages le long d'un itinéraire ou tronçon d'itinéraire ou à une échelle locale (département, communauté d'agglomération...) - Cibles : Sociétés concessionnaires d'autoroute, DIRs, collectivités territoriales... - Critères de hiérarchisation privilégiés : Enjeux stratégiques, aléas locaux, présomption de vulnérabilité (ou « indices » de vulnérabilité sommaire) - Méthode proposée : Analyse qualitative reposant sur des critères géométriques ou typologiques - Outils : Sismoa/Sisroute, matrices d'importance « itinéraires » + « OA », guide Sétra « Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants » - Chapitre de la note : §5</p> | | |
| <p>Échelle OA</p> |  | | <p style="text-align: center;">Cas général</p> <p>- Objectifs : Diagnostic et éventuel renforcement sismique des ouvrages prioritaires</p> <p>- Cible : Maître ou gestionnaire de l'ouvrage</p> <p>- Méthode proposée : Analyse numérique dynamique + Étude Préliminaire de renforcement sismique</p> <p>- Outils : Guide Sétra « Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants »</p> <p>- Chapitres de la note : §6</p> | <p style="text-align: center;">Cas particulier des élargissements/remplacements de tabliers</p> <p>Diagnostic et éventuel renforcement sismique pour les ouvrages prioritaires + non aggravation de la vulnérabilité dans tous les cas</p> <p>Analyse numérique dynamique + Étude Préli. renf. sismique ou approche « abaques » pour les ouvrages non-prioritaires</p> <p>Guide Sétra « Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants » + Abaques présente note</p> <p style="text-align: center;">§7 + Annexe</p> |

Figure 10 : Logigramme général

4. RÉFLEXION À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE NATIONAL : PRIORISATION DES ITINÉRAIRES OU TRONÇONS D'ITINÉRAIRES ROUTIERS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

4.1 - Exposé de la problématique

Depuis 2010, le service de la Direction Générale des Infrastructures, de Transports et de la Mer (DGITM/DIT/GRN/GRA3) en charge du contrôle des concessions d'autoroutes a initié une campagne visant à évaluer et à réduire le risque sismique sur le réseau des autoroutes concédées. Dans cette optique, en tant qu'autorité concédante, elle a demandé aux différentes sociétés concessionnaires d'autoroutes (ASF, Escota, APRR, AREA) dont les réseaux se trouvent exposés au risque sismique au sens de la nouvelle législation sismique nationale et du nouveau zonage), de mener une analyse de la vulnérabilité de leur infrastructures vis-à-vis de cet aléa, assortie d'une réflexion sur la stratégie à mettre en œuvre en vue de définir une politique raisonnée et étalée dans le temps de durcissement des itinéraires jugés les plus sensibles (à la fois exposés, présumés vulnérables et à fort enjeu).

L'appropriation des outils Sismoa/Sisroute par ces sociétés concessionnaires et les bureaux d'études missionnés par elles pour réaliser ces études ont rapidement conduit au constat que l'application des outils Sismoa/Sisroute s'avérait très difficile voire impossible (car très consommatrice de temps et de moyens), compte tenu :

- du linéaire de réseau à traiter et du nombre très important d'ouvrages associés à ce linéaire (Figure 11),
- du fait que l'application exhaustive de l'outil Sismoa nécessite une analyse individuelle de chaque dossier d'ouvrage, éventuellement complétée par une visite de terrain pour chaque entité (cf. §2.3.1). ;

En conséquence, la définition et l'application d'un pré-filtre, plus « grossier » que Sismoa, applicable à l'échelle du territoire national ou inter-régionale et permettant de concentrer les efforts et les moyens sur les enjeux et les infrastructures (itinéraires ou tronçons d'itinéraires) les plus sensibles et/ou les plus exposées, est apparue indispensable.

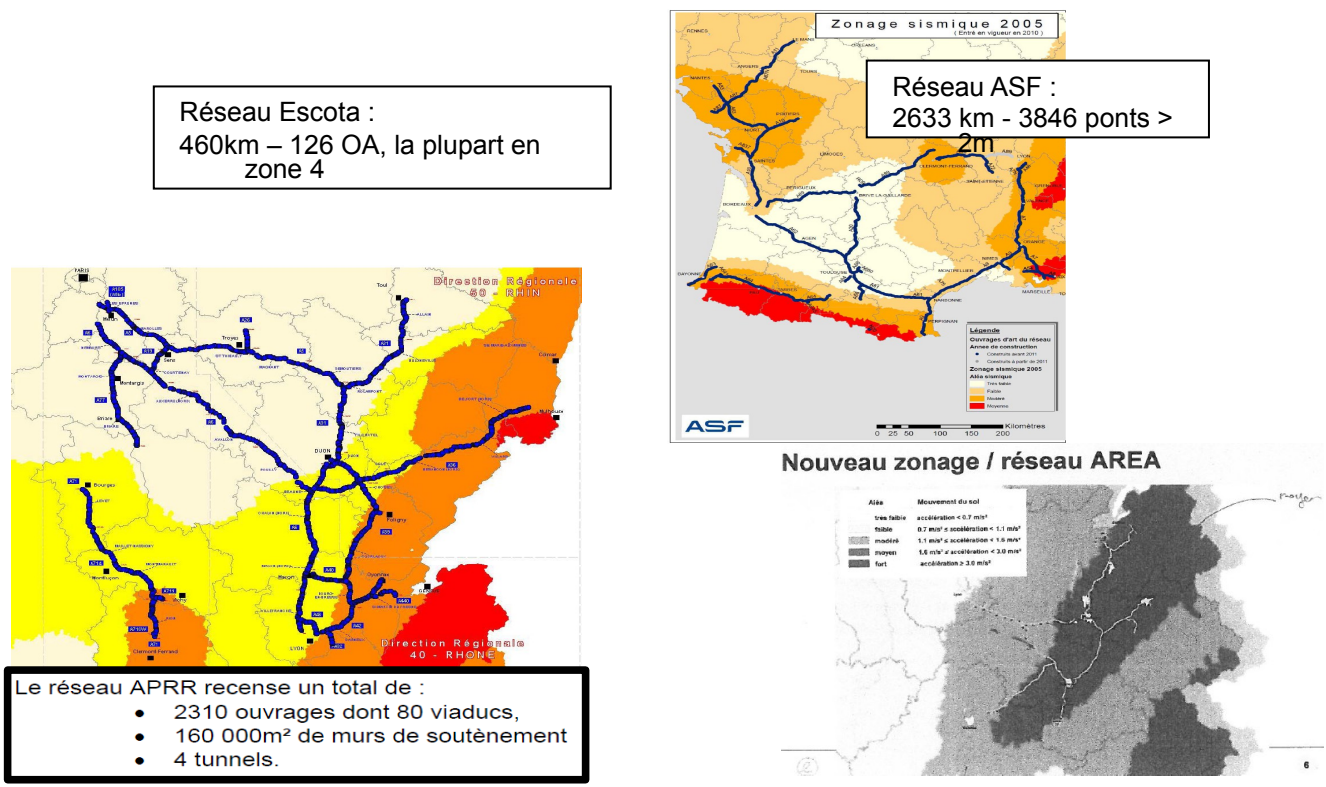


Figure 11 : Principaux réseaux de concessionnaires d'autoroutes exposés à l'aléa sismique (linéaire d'infrastructure et nombre d'ouvrages associés)

4.2 - Éléments de réflexion et recommandations

4.2.1 - Démarche générale

Les éléments de problématique exposés ci-dessus ont fait apparaître la nécessité de définir un pré-filtre de dégrossissage, préliminaire à l'application de la méthode Sismoa permettant de prioriser les itinéraires (ou tronçons d'itinéraires) les uns par rapport aux autres...

Les réflexions menées en partenariat notamment avec la société ASF ont conduit à envisager pour ce pré-filtre une **approche restant basée sur les trois critères d'aléa, de vulnérabilité et d'importance, mais en privilégiant :**

- **une cohérence de la prise en compte du risque le long d'itinéraires continus plutôt que des études distinctes « éparpillées » sur différents tronçons ;**
- **une méthodologie visant à attribuer une pondération maximale aux considérations d'enjeu** (importance stratégique dans une perspective de gestion de crise et d'organisation des secours ou de continuité de l'activité socio-économique) qui peuvent être définies sur la base de critères assez objectifs et consensuels, par rapport aux indices d'aléa et surtout de vulnérabilité forcément très imprécis à une telle échelle.

Nota : La notion d'itinéraire s'entend ici comme un tronçon de route compris entre deux échangeurs (cas d'un tronçon autoroutier) ou deux villes -ou concentrations urbaines à fort enjeu- importantes (cas des voiries autres que autoroutes) et en distinguant chaque sens de circulation. Elle peut également correspondre à une configuration de site particulière et cohérente (zone de relief marqué, limite du zonage sismique national...). Il convient en outre de privilégier un découpage assez uniforme des tronçons en terme de longueur, de manière à disposer d'une comparaison objective de certains critères (nombre d'ouvrages par exemple).

A cette échelle, la priorisation P peut être établie selon le format général :

$$P = \alpha_A \cdot A \otimes \alpha_V \cdot V \otimes \alpha_I \cdot I \quad \text{avec} \quad \alpha_I > \alpha_A \gg \alpha_V$$

où :

- α_I , α_A et α_V représentent les coefficients de pondération des trois critères « aléa » (A), « vulnérabilité » (V) et « importance » (I)
- \otimes représente une combinaison mathématique (au sens large) des différents critères.

Sur la base des travaux menés dans le cadre du groupe de travail « Analyse de risques » du Sétra, une échelle de valeurs peut être établie, permettant de classer chacun des indices associés aux trois critères « aléa », « vulnérabilité » et « importance » en cinq catégories :

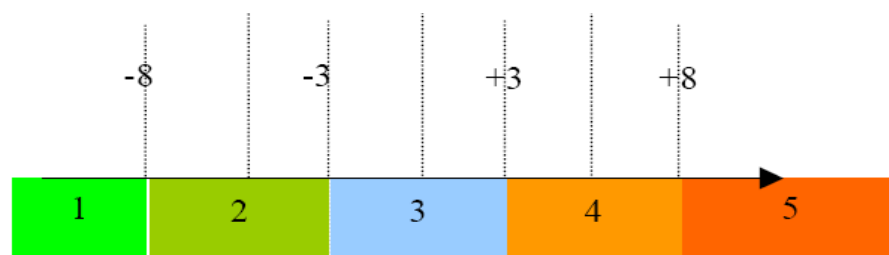


Figure 12 : Classement des critères en 5 catégories

Le croisement des indices d'« aléa » et de « vulnérabilité » conduit alors aux indices de « risque » (risque de rupture ou d'interruption d'itinéraire), tandis que le croisement de l'indice de « risque » avec l'indice d'« importance » (associé aux conséquences de cette rupture) conduit à définir le niveau de priorité 1, 2 ou 3 (conformément aux matrices d'analyse de risque illustrées par la Figure 13) en vue d'une analyse plus précise (via les outils Sismoa/Sisroute) du risque sismique sur l'itinéraire et éventuellement au diagnostic détaillé et le cas échéant au renforcement structurel des ouvrages les plus sensibles.

| | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | V 1 | V 2 | V 3 | V 4 | V 5 | | I 1 | I 2 | I 3 | I 4 | I 5 |
| A 1 | R 1 | R 1 | R 1 | R 2 | R 2 | R 1 | P 1 | P 1 | P 1 | P 2 | P 2 |
| A 2 | R 1 | R 2 | R 2 | R 3 | R 3 | R 2 | P 1 | P 1 | P 2 | P 2 | P 1 |
| A 3 | R 2 | R 3 | R 3 | R 4 | R 4 | R 3 | P 1 | P 2 | P 2 | P 1 | P 1 |
| A 4 | R 3 | R 4 | R 4 | R 4 | R 5 | R 4 | P 2 | P 2 | P 1 | P 1 | P 1 |
| A 5 | R 4 | R 4 | R 5 | R 5 | R 5 | R 5 | P 2 | P 1 | P 1 | P 1 | P 1 |

Légende :

- A1 à A5 : indices croissants d'aléas
- V1 à V5 : indices croissants de vulnérabilités
- R1 à R5 : indices croissants de risques
- I1 à I5 : indices croissants d'importances
- P1 à P5 : indices croissants de priorités

Figure 13 : Matrices de risques et de priorités associées aux cinq catégories d'aléa, de vulnérabilité et d'importance

Les matrices décrites ci-dessus traduisent les poids respectifs associés aux différents critères d'aléa, de vulnérabilité présumée et d'importance ($\alpha_i > \alpha_A \gg \alpha_V$). En pratique, on se rend compte que l'éventail des possibilités est plus large et que l'on peut calibrer différemment les niveaux pour être plus ou moins sévère. **Ici peut donc intervenir le niveau de sensibilité du maître d'ouvrage par rapport au risque. Dans tous les cas, le choix des matrices présentées ci-dessus est à l'appréciation de celui qui réalise l'analyse des risques, et des conséquences qu'il en attend. Ceci veut dire que ces choix supposent une calibration préalable qui constitue une étape très importante de l'analyse.**

4.2.2 - Indices d'importance associés aux itinéraires

Le classement des itinéraires par ordre d'importance ou de priorité de renforcement peut être réalisé conformément à l'approche définie dans le projet de guide Sétra « Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants », au regard de la gestion de crise immédiate et du rétablissement d'une situation d'exploitation normale après séisme (cf. Figure 14). L'approche doit également intégrer l'évaluation globale du renforcement de l'itinéraire étudié par rapport à celui d'itinéraires parallèles voisins assurant en mode plus ou moins dégradé le même niveau de service : s'il est plus "facile" de renforcer un itinéraire parallèle, il est plus « rentable » de concentrer les efforts sur ce dernier et l'itinéraire étudié devient par conséquent comparativement moins important.

| | Gestion de crise (Court terme) | Rétablissement de l'activité socio-économique (Moyen ou long termes) |
|--|---|--|
| Critères d'importance des itinéraires | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Potentiel de victimes directes (effondrements, sur-accidents, éboulements...) ▪ Rôle dans l'évacuation des populations sinistrées ▪ Nombre de personnes « enclavées » en cas de rupture d'itinéraire ▪ Rôle dans l'organisation des secours (itinéraires vitaux au sens des plans d'intervention et de secours (PIS), desserte d'équipements stratégiques (casernes, hôpitaux...) ▪ Réseaux portés (eau, gaz, électricité, communication fibres optiques...) ▪ Absence d'itinéraires parallèles et/ou impossibilité de mise en place rapide de rétablissements provisoires d'urgence | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Rôle dans l'activité socio-économique (type de voirie, nombre de voies, trafic supporté, rôle de desserte, nombre de personnes enclavées, réseaux portés...) ▪ Absence d'itinéraires parallèles suffisamment proches et redondants pour offrir le même niveau d'attractivité et de service ▪ Facilité de renforcement ou de réparations post-sismiques par rapport aux itinéraires parallèles ▪ Aspects environnementaux (embouteillages, émission de gaz à effets de serre...) ▪ Manque à gagner pour le gestionnaire (Etat ou concessionnaire) en cas de rupture |

Figure 14 : Critères d'importance pour le classement des itinéraires existants

La façon dont chaque critère contribue quantitativement à l'évaluation de l'indice d'importance global et le poids respectif associé à chacun d'eux font l'objet de la matrice d'importance « itinéraire » décrite par la Figure 15 ci-après.

| | | | | | | |
|--|--|----------------|--------------------------|--------------------------|---|------------------|
| itinéraire porté | Victimes directes | | | | $I_{Vict_itin} = \dots$ | |
| | Trafic (en véh/j) | <1000 : 2 | 1k<..<10k : 4 | >10 000 : 7 | | |
| | Fréquence des embouteillages | nulle : 0 | moyenne : 1,5 | élevée : 3 | | |
| | Evacuation des populations | | | | $I_{Evac_itin} = \dots$ | |
| | 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 | | | | $I_{Res_itin} = \dots$ | |
| | 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 | | | |
| $I_{itin1} = \dots$ (= $I_{Vict_itin} + I_{Evac_itin} + I_{Sec_itin} + I_{Res_itin} + I_{Para1_itin}$) | | | | | | |
| itinéraire porté | 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 ? | | | | $I_{Para2_itin} = \dots$ (= $\gamma_{para2} \times I_{Soc}$) | |
| | Perte de temps engendrée : | < 30 mn : 0 | 30 < < 90 mn : 0,5 | > 90 mn : 1 | | |
| | Facilité de renforcement par rapport aux itinéraires parallèles | | | | $I_{Para3_itin} = \dots$ | |
| | 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 | | | | $I_{Env_itin} = \dots$ | | |
| Embouteillages, émissions CO ₂ prévisibles sur itin para | | oui : 3 | non : 0 | | | |
| Retombées pour le gestionnaire | | | | $I_{Gest_itin} = \dots$ | | |
| Coûts induits | Faibles : 0,5 | Modérés : 1 | Forts : 1,5 | | | |
| Retombées médiatiques | régionales : 0,5 | nationales : 1 | internationales : 1,5 | | | |
| $I_{itin2} = \dots$ (= $I_{Soc_itin} + I_{Para2_itin} + I_{Para3_itin} + I_{Env_itin} + I_{Gest_itin}$) | | | | | | |

Figure 15 : Matrice de détermination de l'importance d'un itinéraire dans le cas d'une crise sismique

La méthode définie à partir du tableau ci-dessus, conduit à calculer, pour chaque itinéraire ou tronçon d'itinéraire étudié, un indice d'importance I_{itin} , compris entre 0 et 90 et associé à sa valeur socio-économique. Cet indice d'importance traduit l'importance associée à l'itinéraire, tant à court terme (gestion de crise, sauvegarde des vies humaines), qu'à moyen terme (rétablissement de la situation normale, fluidité du trafic, reprise de l'activité socio-économique de la région sinistrée...). Il est donné par l'équation ci-dessous :

$$I_{itin} = I_{itin1} + I_{itin2}$$

où :

- I_{itin1} qualifie l'importance à court terme de l'itinéraire, notée sur 60,
- I_{itin2} qualifie l'importance à moyen et long terme de l'itinéraire, notée sur 30.

Les indices I_{itin1} et I_{itin2} sont obtenus par sommation de tous les critères qui les composent. Comme c'est généralement le cas dans la gestion des risques de grande ampleur (catastrophes naturelles), la pondération des critères d'importance privilégie donc la gestion de

crise, l'organisation des secours et la sauvegarde des vies humaines par rapport à des considérations d'ordre plus économique. Ce choix est conforme aux objectifs explicitement formulés dans les réglementations parasismiques en vigueur dans la plupart des pays exposés, que ce soit pour la définition des catégories d'importance des constructions ou pour les choix et principes de dimensionnement structurels. Le classement en catégories d'importance tel que défini dans les arrêtés « bâtiments » et « ponts », de même que les exigences de base définies aux §2.1 de l'Eurocode 8-1 et §2.2 de l'Eurocode 8-2 sont assez illustratifs et révélateurs de cette philosophie.

A partir de la note I_{itin} précédemment calculée, le classement en 5 catégories est assez automatique :

- Cat. 1 : $0 \leq I_{itin} \leq 18$
- Cat. 2 : $18 < I_{itin} \leq 36$
- Cat. 3 : $36 < I_{itin} \leq 54$
- Cat. 4 : $54 < I_{itin} \leq 72$
- Cat. 5 : $72 < I_{itin} \leq 90$

4.2.3 - Indices d'aléas « régionaux »

Le classement de l'aléa sismique en cinq catégories doit intégrer à la fois l'**aléa vibratoire (accélération sismique intégrant le cas échéant les amplifications de sites liées à la géologie et au relief) et les potentiels effets induits (liquéfaction, chutes de blocs, glissements de terrain...)**.

Nous recommandons de baser l'analyse sur le **nouveau zonage sismique national** tel que défini par le décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010 et sur les valeurs des **accélération de référence a_{gr} et les paramètres de sol définis conformément à l'arrêté spécifique « ponts » du 26 octobre 2011**, indépendamment d'une quelconque prise en compte de l'importance associée aux ouvrages ou aux itinéraires (prise en compte par ailleurs dans la matrice d'importance définie ci-avant) et théoriquement associées à une période de retour de référence de 475 ans.

A l'échelle envisagée (nationale ou inter-régionale), la prise en compte des potentiels effets de site ou induits sera nécessairement basée sur une analyse « en grandes mailles » : bassin sédimentaire, vallée alluvionnaire, plages et zones lacustres, zones de relief prononcé... Le découpage des tronçons d'itinéraire devra dans ce cas intégrer les limites de ces « grandes mailles » au même titre que les limites des zones de sismicité telles que définies dans le nouveau zonage sismique national.

Dans le cadre de la présente note, nous recommandons d'établir le classement en 5 catégories d'aléas à partir de l'échelle définie par la Figure 12 et des pondérations suivantes :

- Localisation de l'ouvrage dans le nouveau zonage :
 - zone 1 - très faible ($a_{gr} = 0 \text{ m/s}^2$) => sans objet
 - zone 2 - faible ($a_{gr} = 0,7 \text{ m/s}^2$) => - 8
 - zone 3 - modéré ($a_{gr} = 1,1 \text{ m/s}^2$) => - 5
 - zone 4 - moyen ($a_{gr} = 1,6 \text{ m/s}^2$) => + 1
 - zone 5 - fort ($a_{gr} = 3,0 \text{ m/s}^2$) => + 6
- Classe de sol :
 - A (S=1,0) => + 0
 - B (S=1,35) => + 1
 - C (S=1,5) => + 2
 - D (S=1,6) => + 3
 - E (S=1,8) => + 4
- Effet topographique :
 - absence de relief ($S_T=1,0$) => + 0
 - relief défavorable ($S_T=1,2$) => + 2
 - relief très défavorable ($S_T=1,4$) => + 4
- Sols liquéfiables (uniquement pour zones ≥ 3) :
 - non => + 0
 - oui => + 6

- Chutes de blocs ou glissements de terrain possibles :
 - non $\Rightarrow + 0$
 - oui $\Rightarrow + 6$

De cette façon, si on se réfère uniquement aux accélérations sans considération de liquéfaction ou chutes de blocs ou glissement de terrain :

- Un pont situé en zone de sismicité faible reste à aléa faible tant que le coefficient de sol et le coefficient topographique ne le font pas passer à une accélération supérieure à celle correspondant à la sismicité modérée, soit $a_{gr.S.S_T} = 1,1 \text{ m/s}^2$:
 - $0,7*1,5*1,0 = 1,05 \text{ m/s}^2 < 1,1 \text{ m/s}^2 \Rightarrow - 8 + 2 + 0 = - 6$: aléa faible
 - $0,7*1,6*1,0 = 1,12 \text{ m/s}^2 \geq 1,1 \text{ m/s}^2 \Rightarrow - 8 + 3 + 0 = - 5$: aléa moyen
 - $0,7*1,35*1,2 = 1,13 \text{ m/s}^2 \geq 1,1 \text{ m/s}^2 \Rightarrow - 8 + 1 + 2 = - 5$: aléa moyen
- Un pont situé en zone de sismicité modérée ou moyenne reste à aléa moyen tant que le coefficient de sol et le coefficient topographique ne le font pas passer à une accélération supérieure à celle correspondant à la sismicité forte, soit $a_{gr.S.S_T} = 3,0 \text{ m/s}^2$:
 - $1,1*1,0*1,0 = 1,1 \text{ m/s}^2 \geq 1,1 \text{ m/s}^2 \Rightarrow - 5 + 0 + 0 = - 5$: aléa moyen
 - $1,1*1,8*1,2 = 2,38 \text{ m/s}^2 < 3,0 \text{ m/s}^2 \Rightarrow - 5 + 4 + 2 = + 1$: aléa moyen
 - $1,6*1,8*1,0 = 2,88 \text{ m/s}^2 < 3,0 \text{ m/s}^2 \Rightarrow + 1 + 4 + 0 = + 5$: aléa moyen
 - $1,6*1,5*1,2 = 2,88 \text{ m/s}^2 < 3,0 \text{ m/s}^2 \Rightarrow + 1 + 2 + 2 = + 5$: aléa moyen
 - $1,6*1,5*1,4 = 3,36 \text{ m/s}^2 \geq 3,0 \text{ m/s}^2 \Rightarrow + 1 + 2 + 4 = + 7$: aléa fort
 - $1,6*1,6*1,2 = 3,07 \text{ m/s}^2 \geq 3,0 \text{ m/s}^2 \Rightarrow + 1 + 3 + 2 = + 6$: aléa fort
- Un pont situé en zone de sismicité forte est systématiquement en aléa fort même avec tous les autres critères au minimum :
 - $3,0*1,0*1,0 = 3,0 \text{ m/s}^2 \geq 3,0 \text{ m/s}^2 \Rightarrow + 6 + 0 + 0 + 0 + 0 = 6$: aléa fort

Les effets induits (liquéfaction, chutes de blocs et glissement de terrain) :

- font systématiquement passer en aléa fort un pont situé en sismicité moyenne ou en sismicité modérée si forts effets de site :
 - $+ 1 + 0 + 0 + 6 = + 7$: aléa fort pour sismicité moyenne sans effet de site avec effet induit
 - $- 5 + 4 + 2 + 6 = + 7$: aléa fort pour sismicité modérée avec effets de site topo + sol E et effet induit
 - $- 5 + 3 + 4 + 6 = + 8$: aléa fort pour sismicité modérée avec effets de site topo maxi + sol D et effet induit
- font systématiquement passer en aléa moyen un pont situé en sismicité faible :
 - $- 8 + 0 + 0 + 6 = - 2$: aléa moyen pour sismicité faible sans effet de site avec effet induit (chutes de blocs ou glissement de terrain)

4.2.4 - Indices de vulnérabilité (très) sommaires

A l'échelle d'étude envisagée (nationale ou inter-régionale), l'évaluation de la vulnérabilité des itinéraires ne pourra être que très sommaire. Dans le cadre de la présente note, nous proposons de l'établir à partir des seuls critères suivants :

- Conception ou non à partir d'un règlement parasismique (associé à la date du marché de travaux)
- État de santé structurel global des ouvrages
- Nombre d'ouvrages d'art sur le tronçon (ponts et murs) : n_{OA}
- Nombre d'ouvrages non-courants : n_{OA-NC}
- Nombre de passages inférieurs (hors cadres et portiques) : n_{PI}

Le classement en 5 catégories de vulnérabilité peut alors être établi à partir de l'échelle définie par la Figure 12 et des pondérations suivantes :

- Conception ou non à partir d'un règlement parasismique (associé à la date du marché de travaux) :
 - PS92 ou EC8 (travaux post 1995) $\Rightarrow - 12$
 - PS69 (travaux entrepris entre 1975 et 1995) $\Rightarrow - 3$
 - Aucune conception parasismique $\Rightarrow + 0$

Notas :

(1) La prise en compte forfaitaire de l'application d'un règlement parasismique ancien uniquement basée sur la date de construction de l'ouvrage n'a de sens que dans le cas où la zone concernée était déjà identifiée comme sismique dans l'ancien zonage associé (zonage PS92 – cf. Figure 2). Dans le cas contraire et même pour les ouvrages les plus récents (avant 2010), il convient de considérer, à défaut de justification spécifique basée sur les dossiers d'ouvrages, qu'aucune conception parasismique n'a été appliquée ;

(2) Il est rappelé que les itinéraires sont ici définis en distinguant chaque sens de circulation (cf. noat §4.2.1), ce qui permet de tenir compte d'un éventuel phasage transversal de mise en service dans la définition des catégories de vulnérabilité.

- État de santé structurel global des ouvrages :
 - Bon état => + 0
 - État moyen => + 1
 - Mauvais état => + 3

- Nombre d'ouvrages d'art sur le tronçon (ponts et murs) :
 - $n_{OA} < 20$ => + 0
 - $20 \leq n_{OA} < 60$ => + 1
 - $60 \leq n_{OA} < 100$ => + 2
 - $n_{OA} \geq 100$ => + 3

- Nombre d'ouvrages d'art non-courants au sens de la circulaire du 5 mai 1994 (notamment travées > 40 m, surfaces tablier > 1200 m², murs de hauteur > 9 m ou ouvrages ne dépassant pas les seuils précédents mais dont la conception présente des difficultés particulières) :
 - aucun => - 3
 - $0 < n_{OA-NC} < 5$ => + 3
 - $n_{OA-NC} \geq 5$ => + 6

- Nombre de passages inférieurs (hors cadres et portiques) :
 - aucun => - 3
 - $0 < n_{PI} < 5$ => + 3
 - $n_{PI} \geq 5$ => + 6

De cette façon :

- **Un itinéraire en bon état et construit en prenant en compte les règles PS92 est classé en catégorie de vulnérabilité ≤ 2 indépendamment des autres critères** ($- 12 + 0 + 3 + 3 + 3 = - 3 \Rightarrow \text{cat.} \leq 2$) ;
- **Un itinéraire ne comprenant ni ouvrage non-courant, ni passage inférieur hors cadre ou portique, et moins de 100 ouvrages au total même en mauvais état, est classé en catégorie de vulnérabilité ≤ 2** ($+ 0 + 3 + 2 - 4 - 4 = - 3 \Rightarrow \text{cat.} \leq 2$) ;
- **Un itinéraire construit sans prise en compte de l'aléa sismique selon les règles PS92 a minima et comprenant au moins 5 ouvrages non courants ou 5 passages inférieurs hors cadre ou portique est classé en catégorie de vulnérabilité ≥ 4** ($- 3 + 0 + 0 + 6 + 0 = + 3 \Rightarrow \text{cat.} \geq 4$).

Nota : L'approche générale décrite ci-dessus a été définie pour pré-hiérarchiser les besoins en analyses plus précises à l'échelle du réseau routier national (priorisation des grands itinéraires les uns par rapport aux autres). Elle peut également être déclinée à des échelles plus locales : Région, Département, communauté d'agglomérations en y associant tous les partenaires et gestionnaires, dans une perspective de préparation à la gestion de crise ou de planification de travaux de durcissement intégrant les principaux enjeux locaux (densité d'urbanisation, équipements stratégiques tels que hôpitaux, de pompiers...), les potentielles redondances des réseaux et redistributions possibles et permettre ainsi une couverture régionale plus complète.

5. RÉFLEXION À L'ÉCHELLE LOCALE : PRIORISATION DES OUVRAGES LE LONG D'UN ITINÉRAIRE

(Extrait du Guide méthodologique Sétra : « Diagnostic et renforcement sismique des ponts existants » - version de mai 2013)

A l'échelle d'un itinéraire ou tronçon d'itinéraire identifié comme prioritaire (cf. chapitre précédent), l'application de la méthodologie générale définie dans le cadre des approches Sismoa/Sisroute et du guide Sétra : « Diagnostic et renforcement sismique des ponts existants » est recommandée. Cette méthodologie se décrit de la façon suivante :

5.1 - Critères d'importance associés aux ouvrages d'art et classification

La Figure 16 ci-dessous rappelle les critères de classification des ouvrages neufs tels que définis dans l'Arrêté du 26 octobre 2011 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux ponts de la classe dite « à risque normal ».

Il est rappelé que cet arrêté (cf. §2.1.3) précise que les ponts neufs de catégorie d'importance I ne sont pas soumis à l'application des règles parasismiques.

Par ailleurs, et comme précédemment indiqué au §2.1.1, les notions et critères d'importance définis ci-dessus concernent exclusivement le "risque normal". Certains ponts, si les conséquences de leur effondrement peuvent avoir des effets de grande ampleur, non circonscrits au pont lui-même (ponts surplombant une installation classée de type usine chimique par exemple...) pourraient relever du "risque spécial", avec nécessité d'une étude spécifique de l'aléa et prise en compte de niveaux de séisme sensiblement majorés.

Sont visés par le présent arrêté les ponts nouveaux définitifs, incluant les passerelles, publics ou privés, ainsi que les murs de soutènement qui en sont solidaires.

Article 2

Pour l'application du présent arrêté, les ponts de la classe dite « à risque normal » sont classés comme suit :

En catégorie d'importance I : les ponts qui n'appartiennent pas au domaine public et ne desservent pas d'établissement recevant du public et ne sont rangés ni en catégorie d'importance III ni en catégorie d'importance IV.

En catégorie d'importance II : les ponts qui n'appartiennent pas au domaine public mais qui desservent un établissement recevant du public, ainsi que les ponts qui appartiennent au domaine public et ne sont rangés ni en catégorie d'importance III ni en catégorie d'importance IV.

En catégorie d'importance III :

- les ponts qui appartiennent au domaine public et qui portent, franchissent ou longent au moins une des voies terrestres ci-après :
 - autoroutes mentionnées à l'article L. 122-1 du code de la voirie routière ;
 - routes express mentionnées à l'article L. 151-1 du code de la voirie routière ;
 - voies à grande circulation définies à l'article L.110-3 du code de la route ;
 - liaisons ferroviaires à grande vitesse mentionnées au décret du 1er avril 1992 susvisé ;
- les pont-canaux qui n'appartiendraient pas à la classe à risque spécial ;
- les ponts situés dans les emprises des ports maritimes et fluviaux, à l'exclusion des ports de plaisance ;
- les ponts des pistes d'aérodrome et les ponts de voies de circulation d'aéronefs situés aux abords des pistes d'aérodrome qui ne sont pas rangés en catégorie d'importance IV.

En catégorie d'importance IV :

- les ponts des pistes d'aérodrome ayant un code lettre C, D, E ou F au sens de l'arrêté du 10 juillet 2006 relatif aux caractéristiques techniques de certains aérodromes terrestres utilisés par les aéronefs à voilure fixe ;
- les ponts des voies de circulation d'aéronefs et situés aux abords d'une piste, ayant un code lettre C, D, E ou F au sens de l'arrêté du 10 juillet 2006 cité ci-dessus ;
- les ponts dont l'utilisation est primordiale pour les besoins de la sécurité civile, de la défense nationale ainsi que pour le maintien de l'ordre public. Le classement en catégorie d'importance IV est prononcé par le préfet chaque fois que l'ouvrage constitue un point essentiel pour l'organisation des secours.

Tout pont nouveau définitif de catégorie d'importance II ou III dont l'endommagement pourrait provoquer des dommages à un bâtiment, un équipement ou une installation de catégorie d'importance IV reçoit le classement de pont de catégorie d'importance IV.

Figure 16 : Extrait de l'Arrêté du 26 octobre 2011 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux ponts de la catégorie dites "à risque normal" définissant les quatre catégories d'importance applicables aux ponts neufs

Nous proposons ci-après une adaptation de ces notions définies pour les ouvrages neufs au cas particulier des ouvrages existants, qui consiste à nuancer légèrement la définition des catégories précédentes par l'examen au cas par cas des scénarii sismiques prévisibles et la prise en compte de la durée acceptable des restrictions d'utilisation après un séisme important.

L'importance propre des ouvrages d'art existants peut ainsi se définir à la fois par le risque de victimes potentielles directement associées à leur effondrement, par leur valeur intrinsèque (coût de la structure ou valeur patrimoniale), ainsi que par le risque qu'ils engendrent le cas échéant sur l'itinéraire franchi (autoroutes, grands itinéraires régionaux, voies ferrées de type fret ou TGV... ou toute autre installation : habitations, voie navigable, réseaux...) en cas d'effondrement. En outre, leur caractère plus ou moins primordial dans le cadre de la gestion de crise à court ou moyen terme (notamment en terme de desserte de centres vitaux situés à proximité immédiate, tels que hôpitaux, casernes de pompiers, commissariats de police, aéroports...) est à nuancer en fonction des possibilités ou non de rétablissements d'urgence (pont de secours, déviations locales...).

Ces aspects sont synthétisés dans le tableau de la Figure 17 ci-dessous :

| | Gestion de crise (Court terme) | Rétablissement de l'activité socio-économique (Moyen ou long termes) |
|---|---|--|
| Critères d'importance propres aux ouvrages d'art | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Potentialité de victimes directes (trafic, surface de tablier, ouvrage fréquemment embouteillé, caractéristiques de la voie franchie...) ▪ Rôle dans l'organisation des secours (desserte immédiate de centre vital (caserne pompier, base militaire, hôpital, préfecture) ou franchissement d'un itinéraire vital au sens des PIS) ▪ Possibilité de rétablir la circulation à court terme (pour les véhicules de secours) au droit de l'ouvrage (pont de secours, réparabilité, déviation locale...) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Rôle dans l'activité socio-économique de la voie franchie (type de voirie, nombre de voies, trafic supporté, rôle de desserte, réseaux portés...) ▪ Difficulté de reconstruction (accessibilité, coût et durée des travaux) ▪ Valeur intrinsèque de l'ouvrage (coût, dimensions, valeur patrimoniale historique) |

Figure 17 : Critères d'importance pour le classement des ouvrages d'art portant un même itinéraire

La façon dont chacun des critères contribue quantitativement à l'évaluation de l'indice d'importance global, de même que leur poids respectif, font l'objet de la matrice d'importance « ouvrage » décrite par la Figure 18 ci-dessous.

| | | | | | | |
|---|--|--------------------------------------|--------------------------|-------------------|--|---|
| Ouvrage | I _{OA1} (court terme) | Victimes directes | | | | I _{Vict_OA} = |
| | | Trafic sur l'ouvrage (en véh/j) | <1000 : 1 | 1k<..<10k : 2 | >10 000 : 4 | |
| | | Surface de tablier (m ²) | < 200 : 1 | 200< <4000 : 2 | > 4000 : 3 | |
| | | Fréq embouteillages sur ouvrage | nulle : 0 | moyenne : 1,5 | élevée : 3 | |
| | | Voie franchie : | | | | |
| | | Type de voirie | RD, frêt ferrov. : 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 | moyenne : 1,5 | élevée : 3 | |
| | | 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 | | | | I _{Rétab_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 _{VICT_OA} + I _{Sec_OA} + I _{Rétab_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 | aggl, 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 | | | | | I _{Val_OA} = |
| Coût | < 1 M € : 0,5 | 1 < < 15 M € : 1 | 15 < < 60 M € : 2 | > 60 M € : 4 | | |
| Valeur patrimoniale historique (ouvrage classé) | | oui : 2 | non : 0 | | | |
| I _{OA2} = ... (= I _{Soc_OA} + I _{Rec_OA} + I _{Val_OA}) | | | | | | |

Figure 18 : Matrice de détermination de l'importance d'un ouvrage dans le cas d'une crise sismique

Ces indices d'importance, spécifiques à l'ouvrage étudié, se cumulent alors à ceux relatifs à l'itinéraire porté, définis à partir de la même matrice d'importance d'itinéraire que celle décrite au §4.2.2). Il convient ici de bien dissocier les notions d'itinéraires porté et franchi. En particulier, l'importance associée à l'itinéraire dans le cas des passages supérieurs (PS) n'est pas définie en rapport avec l'infrastructure principale étudiée mais bien vis-à-vis de celle portée, y compris s'il s'agit d'une voirie secondaire. Cette particularité, qui peut sembler un peu déroutante pour le gestionnaire d'un itinéraire donné (portion d'autoroute par exemple), s'explique par le fait qu'il est généralement plus facile et rapide de dégager les ruines d'un ouvrage effondré sur la chaussée (passage supérieur : PS) en vue de rétablir une fonctionnalité d'urgence, que d'enjamber un maillon manquant (dans le cas de l'effondrement d'un passage inférieur : PI).

La méthode définie à partir des matrices décrites par les Figure 15 et Figure 18, conduit ainsi à calculer, pour chaque ouvrage d'art d'une zone géographique donnée (liaison entre deux villes, tronçon d'autoroute entre deux échangeurs...), un indice d'importance global I associé à sa valeur socio-économique. Cet indice d'importance global traduit à la fois l'importance associée à l'itinéraire porté et l'importance intrinsèque de l'ouvrage, tant à court terme (gestion de crise, sauvegarde des vies humaines), qu'à moyen terme (rétablissement de la situation normale, fluidité du trafic, reprise de l'activité socio-économique de la région sinistrée...). Il est donné par l'équation ci-dessous :

$$I = (I_{itin1} + I_{OA1}) + (I_{itin2} + I_{OA2}) = I_1 + I_2$$

Dans cette équation,

- I_{itin1} qualifie l'importance à court terme de l'itinéraire porté par l'ouvrage ; I_{itin1} est notée sur 60 ;

- I_{itin2} qualifie l'importance à long terme de l'itinéraire porté par l'ouvrage ; I_{itin2} est notée sur 30 ;
- I_{OA1} qualifie l'importance à court terme, intrinsèque à l'ouvrage ; I_{OA1} est notée sur 40 ;
- I_{OA2} qualifie l'importance à long terme, intrinsèque à l'ouvrage ; I_{OA2} est notée sur 20 ;
- I_1 caractérise l'importance globale à court terme ; $I_1 = I_{itin1} + I_{OA1}$, notée sur 100
- I_2 caractérise l'importance globale à long terme ; $I_2 = I_{itin2} + I_{OA2}$, notée sur 50

Chacun des indices I_{itin1} , I_{itin2} , I_{OA1} et I_{OA2} est obtenu par sommation de tous les critères qui le composent. Au final, la valeur socio-économique globale de chaque ouvrage (itinéraire porté + valeur intrinsèque) est évaluée par un **indice d'importance I global (ou note d'importance) compris entre 0 et 150** résultant de la somme de deux termes I_1 (compris entre 0 et 100) et I_2 (compris entre 0 et 50) représentant respectivement l'importance de l'ouvrage dans le cadre de la gestion de crise (court terme) et son importance dans le cadre de la reprise de l'activité socio-économique de la zone sinistrée (moyen et long terme).

Nota : Comme évoqué précédemment, la pondération des critères d'importance privilégie la gestion de crise, l'organisation des secours et la sauvegarde des vies humaines par rapport à des considérations d'ordre plus économiques. Ce choix est conforme aux objectifs explicitement formulés dans les réglementations parasismiques en vigueur dans la plupart des pays exposés, que ce soit pour la définition des classes d'importance des constructions ou pour les choix et principes de dimensionnement structurels.

En fonction de l'indice d'importance global I associé à chaque ouvrage, il est alors possible de définir différentes catégories d'importance pour les ouvrages existants sur le même format que celui établi par la réglementation pour les structures nouvelles.

Dans le cadre de la présente note, nous proposons de nous conformer à la classification en quatre catégories (cat. I, II III et IV) telle que définie par l'Arrêté du 26 octobre 2011 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux ponts de la catégorie dites "à risque normal" pour les ouvrages neufs, en se basant pour les ouvrages existants sur les indices calculés précédemment et les valeurs limites suivantes :

- Catégorie « équivalente » ≤ II : $0 \leq I < 50$ (importance socio-économique faible)
- Catégorie « équivalente » III : $50 \leq I < 100$ (importance socio-économique moyenne)
- Catégorie « équivalente » IV : $100 \leq I \leq 150$ (importance socio-économique élevée)

A noter que la matrice d'importance relativement détaillée définie précédemment a uniquement pour objectif de répartir les ouvrages en trois catégories d'importance. Une certaine latitude d'interprétation des différents paramètres, basée sur le bon sens, est donc possible au cas par cas. Par exemple, pour un ouvrage surplombant une zone urbanisée (cas non prévu dans la matrice), le critère correspondant à la voie franchie sera calé au maximum (analogie en terme de risque au franchissement d'une autoroute ou d'une ligne ferroviaire importante) ; si l'ouvrage franchit une vallée déserte, le coefficient correspondant sera pris nul, etc. L'évaluation des pertes de temps engendrées par l'effondrement de l'ouvrage pourra quant à elle être évaluée à partir de simulateurs de temps de parcours facilement disponibles sur Internet.

Notas :

(1) La classification proposée ci-dessus reflète principalement les enjeux portés par la puissance publique. Les indices d'importance socio-économique ainsi calculés peuvent évidemment être revus à la hausse selon l'intérêt que le Maître d'Ouvrage attache à la conservation de ses biens ou de ses revenus.

(2) Dans le cas des ouvrages ayant déjà fait l'objet d'une classification par une réglementation sismique précédente (PS69 ou PS92), la catégorie d'importance devra être choisie comme le maximum de celle calculée à partir de la matrice précédemment définie et de la classification précédemment attribuée, en utilisant les équivalences suivantes :

- Groupe I des PS69 ou classes A et B des PS92 ⇒ Cat. « équivalente » ≤ II
- Groupe II des PS69 ou classe C des PS92 ⇒ Cat. « équivalente » III
- Groupe III des PS69 ou classe D des PS92 ⇒ Cat. « équivalente » IV

Par ailleurs, lorsque la classification est ancienne et que les paramètres de classement ont évolué, on pourra être amené à la réviser.

5.2 - Choix des ouvrages devant faire l'objet d'une analyse détaillée

Le choix ou non de procéder à un diagnostic plus précis d'un ouvrage donné de façon à obtenir la quantification de sa vulnérabilité au risque sismique et, le cas échéant d'envisager un éventuel projet de renforcement, s'appuiera sur le croisement des indices « aléa », « vulnérabilité » et « importance ».

Dans le cadre du projet de guide Sétra, il est proposé d'asseoir ce choix sur les niveaux de risque issus des approches Sismoa et Sisroute (cf. §2.3.1) et les indices d'importance évalués précédemment.

Il est ainsi préconisé de passer en deuxième phase d'analyse (diagnostic détaillé) les ouvrages tels que :

$$R \times I \geq 50$$

Où :

- R est l'indice de risque (compris entre 0 et 1) évalué par croisement des vulnérabilités calculées dans Sismoa et des aléas définis dans Sisroute sur la base du nouveau zonage sismique de la France publié par décret n°2010-1255 du 22 octobre 2010 : $R = \max (R_{\text{vib}}, R_{\text{liq}}, R_{\text{gliss}}, R_{\text{bloc}})$;
- I est l'indice d'importance global pour l'ouvrage, évalué au paragraphe précédent.

La méthode conduit donc implicitement à exclure de la 2^{ème} phase d'étude les ouvrages des catégories d'importance « équivalentes » \leq II (importance faible caractérisée par $I < 50$), y compris ceux pour lesquels le risque (combinaison de l'« aléa » et de la « vulnérabilité ») est maximum ($R=1$).

A contrario, le calibrage retenu conduira systématiquement à préconiser un diagnostic détaillé des ouvrages dont l'indice d'importance est associé à la catégorie IV :

- en zone de sismicité forte (5) ou en zone de sismicité moyenne (4) pour un sol de classe E à partir d'un indice de vulnérabilité Sismoa de 0,2/1,
- en zone de sismicité forte (5) pour un sol de classe B ou plus, à partir d'un indice de vulnérabilité Sismoa de 0,1/1 , qui correspond à l'indice minimal pour un pont à deux travées conçu avant l'application des règles PS92.

Ce diagnostic sismique détaillé, à l'échelle de la structure de l'ouvrage (2^{ème} phase d'évaluation), devra cette fois non plus reposer sur une simple approche qualitative sommaire, mais s'appuyer sur des méthodes d'analyse plus scientifiques et précises, dont le niveau de raffinement sera ajusté en fonction du type d'ouvrage et de sa complexité structurelle.

Rappelons enfin que la méthode Sismoa demeure une approche sommaire qualitative essentiellement basée sur des critères géométriques et typologiques, et calée à partir d'un échantillon jugé représentatif (mais non exhaustif) des typologies et géométries d'ouvrages rencontrées sur le territoire national (y compris Antilles). **Par conséquent, les résultats devront dans la mesure du possible être calibrés quantitativement par l'analyse détaillée (diagnostic – cf. Figure 19) de quelques ouvrages représentatifs ou particulièrement sensibles de l'itinéraire étudié (calibrage local).**

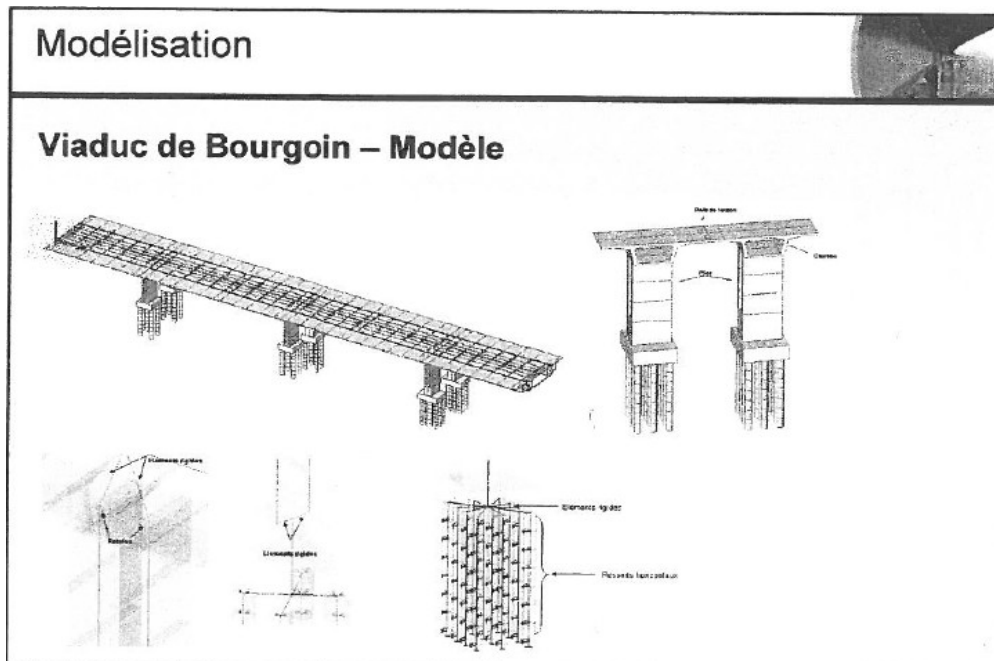


Figure 19 : Exemple de modèle détaillé pour le calibrage local des résultats Sismoa sur un ouvrage représentatif d'un itinéraire (AREA/Egis JMI – Vulnérabilité sismique des OA – juin 2012)

5.3 - Exemples d'application ou tests déjà réalisés

5.3.1 - Analyse de la vulnérabilité sismique des ouvrages courants du triangle autoroutier A7-A8-A54 (ASF)

Cette première application, à portée uniquement méthodologique, avait pour objectif de valider, et éventuellement calibrer, la méthode proposée en terme de faisabilité (pourcentage d'ouvrages ressortant comme nécessitant un diagnostic détaillé sur un parc donné et moyens nécessaires associés à leur renforcement).

L'étude a été menée dans le cadre d'une collaboration entre le CETE Méditerranée, le Sétra et la société concessionnaire ASF. Elle a mobilisé l'activité d'un stagiaire (Travail de Fin d'Étude ENTPE – Clément Gastaud) sur une durée de trois mois.

Sur les différents tronçons d'itinéraires autoroutiers étudiés, principalement situés en zone de sismicité moyenne (zone 4) et composés quasi exclusivement d'ouvrage courants (63 au total pour un linéaire de 80 km), seulement 4 (soit 6% environ) ressortent comme nécessitant un diagnostic détaillé. Pour la plupart d'entre eux (essentiellement passages inférieurs et nœuds d'échangeurs), une amélioration significative du comportement sismique peut être obtenue par quelques mesures relativement simples et peu coûteuses : remplacement des appareils d'appui, ajout de butées parasismiques, renforts locaux de piles...

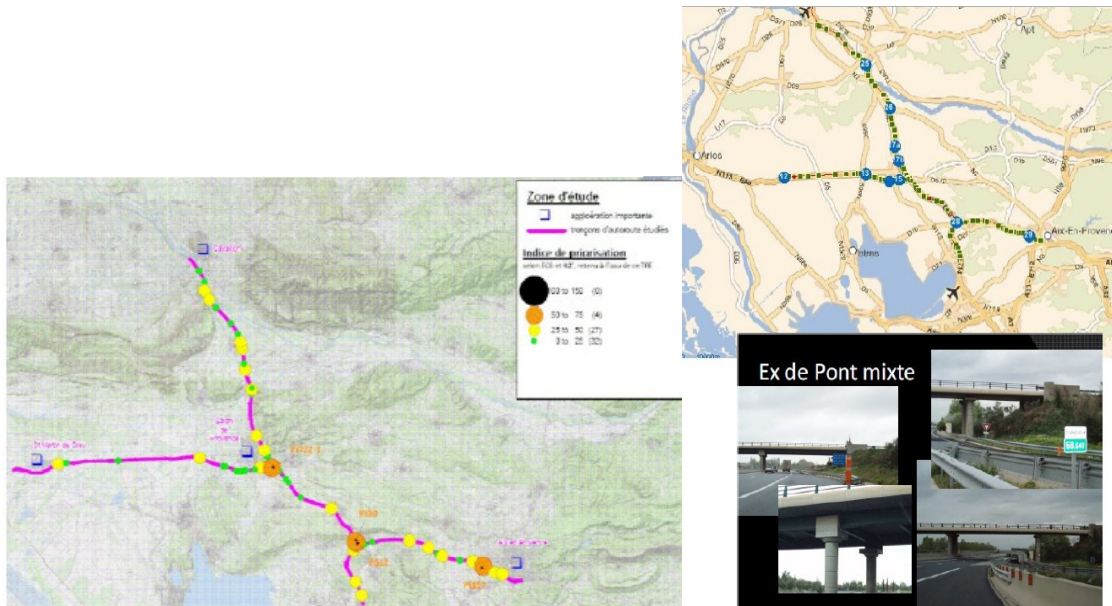


Figure 20 : Analyse de la vulnérabilité sismique des ouvrages courants du triangle autoroutier A7-A8-A54 (ASF)

5.3.2 - Évaluation de la vulnérabilité au séisme des ouvrages d'art existants du projet de rocade L2 à Marseille (DREAL PACA)

Cette deuxième application, à portée opérationnelle, a été menée par un service spécialiste de l'application de la méthode (CETE Méditerranée). Elle a porté sur 18 ouvrages d'art, tous situés en zone de sismicité faible (zone 2), pour une durée d'étude d'environ 3 semaines et un coût d'étude évalué à environ 16 k€, répartis en 7 k€ pour le recueil des données et visites sur site, 4 k€ pour le traitement Sismoa et 5 k€ pour le post-traitement et rédaction du rapport d'étude.

Sur les 18 ouvrages étudiés, et pour un séisme associé à une période de retour de référence de 475 ans, un ouvrage ressort comme étant associé à un risque de défaillance élevé, deux sont associés à un risque moyen et 15 à un risque faible.

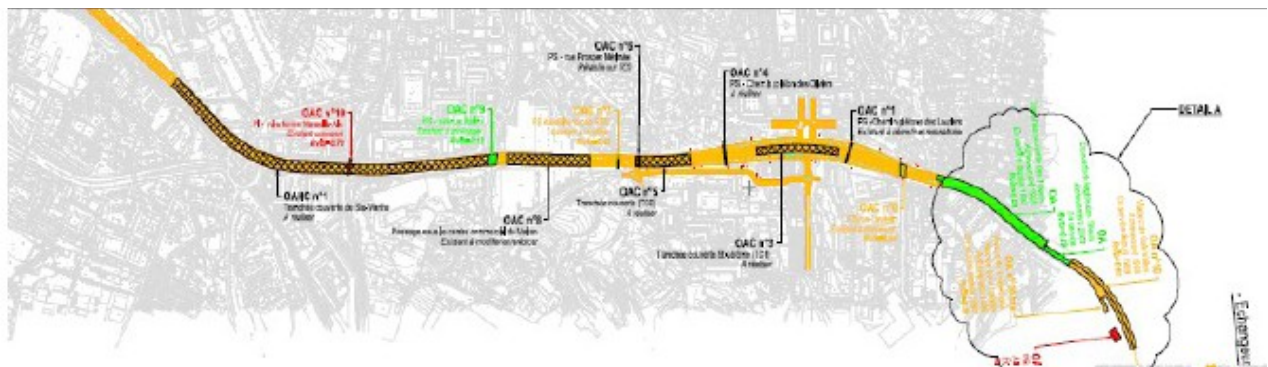


Figure 21 : Évaluation de la vulnérabilité au séisme des ouvrages d'art existants du projet de rocade L2 à Marseille (DREAL PACA)

5.3.3 - Évaluation du risque sismique sur les itinéraires de desserte de l'agglomération Grenobloise (DREAL Rhône-Alpes)

Cette troisième application, également à portée opérationnelle, a été menée par un service non spécialiste de l'application de la méthode (CETE de Lyon). Elle a porté sur 10 ouvrages d'art stratégiques de desserte de l'agglomération grenobloise (Rocade Sud, A48 et A480 – cf. Figure 7), située en zone de sismicité moyenne (zone 4) exposée à l'aléa induit « liquéfaction ». L'étude a été menée sur une durée d'environ 4 semaines pour un coût évalué à environ 46 k€, répartis en 7 k€ pour la formation à l'outil et le compagnonnage par le CETE Méditerranée, 16 k€ pour le recueil des données et visites sur site, 7 k€ pour l'analyse de la liquéfaction des sols (recueil de données géologiques et visites de terrain), 6 k€ pour le traitement Sismoa et 10 k€ pour le post-traitement et rédaction du rapport d'étude.

Sur les 10 ouvrages étudiés, et pour un séisme associé à une période de retour de référence de 475 ans, 3 ouvrages ressortent comme étant associés à un risque de défaillance élevé, 5 sont associés à un risque moyen et 2 à un risque faible.

5.3.4 - Test de la méthode suite au séisme de l'Aquila (Italie, avril 2009)

Suite au séisme de l'Aquila qui a frappé la région des Abruzzes en Italie en avril 2009, la méthode Sismoa a été testée sur les ouvrages d'art des principaux itinéraires structurant de la zone touchée. Le séisme, d'une magnitude de 5,8 sur l'échelle de Richter s'est notamment caractérisé par une accélération au rocher atteignant localement 0,67g (soit de l'ordre de deux fois l'accélération nominale réglementaire) et d'importants dégâts sur les bâtiments. Comparativement, les ponts, à l'exception de quelques ouvrages isolés, se sont relativement bien comportés, permettant l'acheminement rapide des secours sur la zone.

Le test a démontré gradation des dégâts observés par rapports aux indices de vulnérabilité calculés à l'aide de Sismoa. En revanche, les résultats de l'analyse se sont avérés globalement très conservatifs (beaucoup moins de dommages observés que n'aurait pu le laisser craindre les résultats de l'analyse Sismoa). Ce caractère (très) sécuritaire de la méthode est toutefois à analyser au regard de certaines particularités très spécifiques du séisme de l'Aquila, en termes de contenu fréquentiel (séisme hautes fréquences sollicitant préférentiellement les structures raides) et directivité (forte directivité NO-SE s'étant traduite par une sollicitation principalement transversale des grands viaducs associée à une plus grande robustesse des ouvrages dans cette direction).



| Pont 1 : Pont caisson béton | Pont 3 : Pont caisson béton | Pont 4 : Pont caisson béton |
|--|--|--|
| Eclatement en pied de piles | Aucun dommage | Décalage transversal ? |
| | | |
| $V_{\text{métré}} 0,75$ $V_{\text{tablier}} 0,70$ $V_{\text{culées}} 0,05$ $V_{\text{voies}} 1,00$ $V_{\text{vitra}} 0,75$ | $V_{\text{métré}} 0,70$ $V_{\text{tablier}} 1,00$ $V_{\text{culées}} 0,75$ $V_{\text{voies}} 0,35$ $V_{\text{vitra}} 0,70$ | $V_{\text{métré}} 0,60$ $V_{\text{tablier}} 1,00$ $V_{\text{culées}} 0,19$ $V_{\text{voies}} 0,30$ $V_{\text{vitra}} 0,60$ |

| Pont 2 : Pont béton | Pont d'Onna : Pont à nervures | Pont d'Aquila centre : Pont nervures béton | SS80 km 55 | SS80 km 40 | SS80 km 20 |
|--|--|--|---|---|---|
| Aucun dommage | Fissures de cisaillement sur piles Eclatement du béton sur piles Fissures sur le tablier Encastrement culées | Décalage transversal ? Chocs tablier/culées | Fissures tympan Chutes de blocs | SSI7 pont 9 Aucun dommage | Fissures tympan et piédroits Chutes de blocs |
| | | | | | |
| $V_{\text{métré}} 0,40$ $V_{\text{tablier}} 0,10$ $V_{\text{culées}} 0,19$ $V_{\text{voies}} 0,35$ $V_{\text{vitra}} 0,14$ | $V_{\text{métré}} 0,55$ $V_{\text{tablier}} 1,00$ $V_{\text{culées}} 0,01$ $V_{\text{voies}} 0,60$ $V_{\text{vitra}} 0,55$ | $V_{\text{métré}} 0,55$ $V_{\text{tablier}} 1,00$ $V_{\text{culées}} 0,19$ $V_{\text{voies}} 1,00$ $V_{\text{vitra}} 0,55$ | $V_{\text{métré}} 0,80$ $V_{\text{tablier}} 1,00$ $V_{\text{culées}} -$ $V_{\text{voies}} 0,80$ $V_{\text{vitra}} 0,80$ | $V_{\text{métré}} 0,85$ $V_{\text{tablier}} 0,37$ $V_{\text{culées}} -$ $V_{\text{voies}} 0,31$ $V_{\text{vitra}} 0,31$ | $V_{\text{métré}} 0,80$ $V_{\text{tablier}} 0,75$ $V_{\text{culées}} -$ $V_{\text{voies}} 0,60$ $V_{\text{vitra}} 0,60$ |

Figure 22 : Test de la méthode Sismoa suite au séisme de l'Aquila (Italie, avril 2009)

5.4 - Tendances observées à partir des résultats des premières études menées

5.4.1 - Vis-à-vis de la classification des ouvrages existants en catégories d'importance

Dans la plupart des cas, les résultats des analyses menées ont conduit à classer dans la catégorie III (importance moyenne) ou IV (importance élevée) les ouvrages autoroutiers et du réseau structurant des routes nationales à 2x2 voies. Par indices d'importance décroissants, on a ainsi pu identifier les nœuds d'infrastructures principales, les passages inférieurs (PI), les échangeurs autoroutiers, etc.

Plus généralement, et sans que cela ne dispense de procéder au remplissage de la matrice d'importance, le classement des ouvrages selon les trois catégories a semblé correspondre plus ou moins à la répartition suivante :

Catégories « équivalente » ≤ II : Ponts des réseaux secondaires et ponts d'importance moindre (ex : ponts pour piétons et ponts utilisés pour l'agriculture et l'exploitation des forêts), dès lors qu'ils n'enjambent pas de voies de circulation importantes ou qu'ils ne puissent pas servir d'ouvrage de contournement en cas d'effondrement d'un itinéraire essentiel proche ;

Catégorie « équivalente » III : Ponts portant des voies de circulation importantes (autoroutes, nationales à 2x2 voies, voies express...) en cas d'itinéraire de remplacement acceptable, ainsi que ponts enjambant des itinéraires associés à une catégorie IV et pouvant être « facilement » déblayés ;

Catégorie « équivalente » IV : Ponts portant une autoroute sans itinéraire de remplacement acceptable, ponts faisant partie des voies d'accès aux équipements du réseau vital (hôpitaux, centres de secours, services de la sécurité civile, casernes, etc.), ponts importants pour l'accès à une région après un séisme, sans itinéraire de déviation acceptable, ponts assurant un nœud entre deux infrastructures associées à des catégories III ou plus.

5.4.2 - Vis-à-vis du choix des ouvrages devant faire l'objet d'une analyse détaillée

En général, l'approche proposée dans le projet de guide (sans caractère normatif) a conduit à préconiser un diagnostic détaillé uniquement des ouvrages à fort enjeu socio-économique situés en zones d'aléa modéré à fort (zones 3 à 5 au sens du nouveau zonage sismique national, caractérisées par des accélérations au rocher a_{gr} supérieures ou égales à $1,1 \text{ m/s}^2$), ainsi que de certains ouvrages situés en zone de sismicité faible (zone 2, $a_{gr} = 0,7 \text{ m/s}^2$) mais reposant sur des sols particulièrement défavorables et présentant une présomption de vulnérabilité et un enjeu particulièrement élevés.

En revanche, les ouvrages réputés peu sensibles au risque sismique (PICF, PIPO, ponts-cadre, voûtes...) et caractérisés par un très faible indice de vulnérabilité Sismoa ont généralement été exclus de la 2^{ème} phase d'étude.

6. RÉFLEXION À L'ÉCHELLE D'UN OUVRAGE DONNÉ : OBJECTIFS DE PERFORMANCE SISMIQUE ET CHOIX D'UNE SOLUTION DE RENFORCEMENT OPTIMALE

(Extrait du Guide méthodologique Sétra : « Diagnostic et renforcement sismique des ponts existants » - version mai 2013)

6.1 - Problématique générale

Les études de diagnostic sismique sont relativement peu classiques. Elles nécessitent en effet d'évaluer de façon aussi réaliste que possible le comportement dynamique de l'ouvrage au cours d'un tremblement de terre de référence et son niveau d'endommagement à l'issue de la secousse.

Ce type d'approche, basé sur les capacités de résistance réelles de la structure et des matériaux (analyses dans le domaine plastique de comportement des matériaux, redistributions d'efforts après endommagement de certaines parties de la structure, etc.), se décompose généralement en plusieurs phases :

- Définition des niveaux de performance de référence pour l'ouvrage,
- Évaluation des capacités résistantes (structure et fondations),
- Analyse des sollicitations sismiques dans la structure et ses fondations,
- Diagnostic,
- Étude préliminaire et projet de renforcement les cas échéants.

Chacune de ces différentes phases ou étapes de l'analyse sont décrites plus en détail dans les différents chapitres du guide.

En règle générale, le diagnostic et l'étude préliminaire de renforcement sismiques pourront déboucher sur différentes orientations et permettront de conclure, soit :

- Sur la non-nécessité ou la non-pertinence de renforcement (ouvrage considéré suffisamment résistant en l'état ou coûts de renforcement considérés prohibitifs au regard des enjeux et des risques associés à l'effondrement en cas de séisme : acceptation du risque ou transfert du risque dans le cas d'un déclassement au profit d'une autre infrastructure) ;
- Sur le besoin de renforcer l'ouvrage pour un niveau de performance à adapter en fonction des enjeux et des moyens disponibles :
 - Remise à niveau parasismique réglementaire, qui conduirait la structure au même niveau de protection (ou performance sismique) qu'une construction neuve de même importance et exposée au même aléa (atténuation maximale ou « suppression » du risque) ;
 - Ou renforcement permettant à la construction de satisfaire une para-sismicité adaptée aux enjeux, aux coûts et à la faisabilité technique (atténuation « optimisée » du risque) ;
- Sur une impossibilité technique ou financière de renforcer l'ouvrage conduisant à la proposition d'abaisser le niveau de performance minimal visé. Dans ce cas, il conviendra de s'interroger sur le rôle que l'ouvrage était susceptible de jouer en situation de crise sismique et sur les possibilités de report envisageables.

6.2 - États-limites et niveaux sismiques de référence

6.2.1 - États-limites pour le diagnostic sismique des ponts

L'Eurocode 8-3 relatif au renforcement et à la réparation des bâtiments en zones sismiques définit des niveaux d'exigences fondamentales basés sur trois états-limites de référence :

- l'état limite de « Limitation des Dommages » (EL-LD) ;
- l'état limite de « Dommages Significatifs » (EL-DS) ;
- l'état limite de « Quasi-Effondrement » (EL-QE).

Cette approche, mise au point pour les bâtiments, est directement extrapolable aux ouvrages d'art. Des définitions qualitatives des états-limites (ou niveaux d'endommagements) spécifiques au cas des ponts sont proposées ci-dessous :

6.2.1.a - État-limite de « Limitation des Dommages » (EL-LD)

L'état-limite de limitation des dommages (EL-LD) correspond à une structure n'ayant subi que des dommages légers. Les éléments structurels n'ont pas dépassé leur limite élastique et conservent l'intégralité de leurs capacités en résistance et en déformation. Certains éléments secondaires comme les superstructures ou les joints de chaussée peuvent avoir souffert et certaines parties d'ouvrage peuvent présenter un degré de fissuration plus ou moins étendu. Néanmoins, seules de légères réparations post-sismiques concernant essentiellement ces éléments secondaires sont éventuellement à prévoir et on ne constate pas de déformation résiduelle.

6.2.1.b - État-limite de « Dommages Significatifs » (EL-DS)

L'état-limite de dommages significatifs (EL-DS) correspond à une structure endommagée de manière significative, mais permettant une utilisation limitée dans le cadre de l'organisation des secours et de supporter des répliques d'intensité modérée. Elle présente des déformations résiduelles modérées mais parfois suffisantes à rendre les réparations post-sismiques non rentables en comparaison des coûts de démolition/reconstruction.

6.2.1.c - État-limite de « Quasi-Effondrement » (EL-QE)

L'état-limite de quasi-effondrement (EL-QE) correspond à un ouvrage lourdement endommagé après séisme. Les résistances et rigidités horizontales résiduelles sont faibles, même si le pont est encore capable de soutenir son poids propre. Les éléments non-structuraux (joints de chaussée, garde-corps, corniches...) sont fortement endommagés ou effondrés et on observe de larges déformations permanentes. L'ouvrage est proche de la ruine et ne survivrait vraisemblablement pas à un autre séisme, même modéré.

6.2.2 - Niveaux d'accélération de référence

En génie parasismique, l'accélération du sol est le paramètre le plus utilisé car directement relié aux forces exercées par le sol sur les fondations des ouvrages.

L'Eurocode 8-2 relatif au calcul des ponts neufs définit l'action sismique de calcul pour un ouvrage neuf, A_{Ed} (résultant de l'accélération de calcul a_g définie dans l'« arrêté ponts »), sur la base d'une approche probabiliste, comme le produit de deux termes :

$$A_{Ed} = \gamma_I \times A_{Ek}$$

$$(a_g = \gamma_I \times a_{gr} \text{ selon les notations de l'arrêté « ponts »})$$

où :

- A_{Ek} est l'action sismique de référence associée à une probabilité de dépassement de référence, P_{NCR} , sur une période de 50 ans ou à une période de retour de référence T_{NCR} ;
- γ_I est le coefficient d'importance permettant de prendre en compte la différenciation du niveau de sécurité exigée pour les différentes catégories d'importance des ouvrages.

Dans la plupart des cas, la période de retour T_{NCR} sera prise égale à 475 ans, ce qui correspond à une probabilité de dépassement P_{NCR} de 10% sur 50 ans. Le coefficient d'importance correspondant a alors pour valeurs respectives, selon les catégories d'importance « équivalentes » d'ouvrages considérées telles que définies précédemment :

- $\gamma_I = 1,0$ pour les ponts de la catégorie dite « inférieure à une importance moyenne » (catégorie « équivalente » $\leq II$) ;

- $\gamma_I = 1,2$ pour les ponts de la catégorie dite « d'importance moyenne » (catégorie « équivalente » III) ;
- $\gamma_I = 1,4$ pour les ponts de la catégorie dite « supérieure à une importance moyenne » (catégorie « équivalente » IV).

A noter également que l'accélération a_g correspond au mouvement « mesuré » au rocher. Le passage de cette valeur à l'accélération ressentie à la surface du sol doit prendre en compte le coefficient de sol S ainsi le cas échéant qu'un coefficient d'amplification topographique S_T , qui sont directement intégrés dans le spectre de calcul.

En conservant cette approche probabiliste, l'EC8-3 exprime en terme de période de retour le niveau d'agression sismique vis-à-vis duquel les structures existantes doivent être diagnostiquées en fonction de l'état-limite considéré et de leur catégorie d'importance.

Ainsi, pour la catégorie d'importance II, la logique probabiliste de l'Eurocode 8 amène à envisager les cas de figure suivants (cf. EC8-3 §2.1(3)P – valeurs de périodes de retour proposées) :

- pour l'état-limite de « Limitation des Dommages » (EL-LD) : diagnostic vis-à-vis d'un séisme de période de retour de 225 ans, soit une probabilité de dépassement de 20% sur 50 ans ;
- pour l'état-limite de « Dommages Significatifs » (EL-DS) : diagnostic vis-à-vis d'un séisme de période de retour de 475 ans, soit une probabilité de dépassement de 10% sur 50 ans ;
- pour l'état-limite de « Quasi-Effondrement » (EL-QE) : diagnostic vis-à-vis d'un séisme de période de retour de 2 475 ans, soit une probabilité de dépassement de 2% sur 50 ans).

Pour les ouvrages des catégories d'importance « équivalentes » III et IV, l'application des coefficients d'importance γ_I conduit alors indirectement à réajuster à la hausse ces objectifs de performance de référence (puisque l'accélération de calcul majorée correspondant au niveau de protection de référence visé peut être associée à une valeur de période de retour plus élevée).

Pour les ouvrages existants, dont la catégorie d'importance a été préalablement définie selon la démarche présentée au §5.1 (matrices d'importance), nous recommandons de diagnostiquer les ouvrages de la catégorie III vis-à-vis de l'état-limite de « Dommages Significatifs » (EL-DS) ainsi que ceux de la catégorie IV vis-à-vis de l'état-limite de « Dommages Significatifs » (EL-DS) et de l'état-limite de « Limitation des Dommages » (EL-LD) compte tenu du rôle primordial que pourraient jouer ces ponts dans la gestion de crise immédiatement après le séisme. Les niveaux d'accélération de référence à considérer pour le diagnostic sismique sont donc les suivants :

- **Pour les ouvrages de la catégorie « équivalente » III : $a_{\text{ref-DS}} = 1,2 \times A_{\text{Ek}}$;**
- **Pour les ouvrages de la catégorie « équivalente » IV : $a_{\text{ref-DS}} = 1,4 \times A_{\text{Ek}}$ et $a_{\text{ref-LD}} = 0,4 \times 1,4 \times A_{\text{Ek}}$.**

A noter que la vérification de l'état-limite de quasi-effondrement (EL-QE) n'est pas envisagée, cet état-limite n'étant pas considéré ici comme un objectif de performance acceptable.

Dans les équations ci-dessus, le coefficient 0,4 (dit de réduction des effets de l'action sismique associée à l'exigence de limitation des dommages) est extrait de l'arrêté du 22 octobre 2010 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal ». Ce coefficient est applicable à toutes les catégories d'importance. Il relève d'une décision de la puissance publique française et n'est pas cohérent d'un point de vue strictement « mathématique » avec les périodes de retour indiquées dans l'Eurocode 8-3.

Pour les maîtres d'ouvrages désireux d'expertiser également leurs ouvrages de catégorie « équivalente » I ou II, on pourra se baser respectivement sur les niveaux d'accélération de référence représentés par $a_{\text{ref-DS}} = 0,8 \times A_{\text{Ek}}$ (cat. I) et $a_{\text{ref-DS}} = 1,0 \times A_{\text{Ek}}$ (cat. II).

Notons que les accélérations de référence définies ci-dessus correspondent au niveau de protection réglementaire applicable dans le cadre du dimensionnement des ouvrages neufs. **Pour le renforcement des ouvrages existants, ces objectifs servent uniquement de référence de base et sont généralement recalibrés en fonction du contexte socio-économique et des moyens disponibles ou des contraintes budgétaires spécifiques à chaque ouvrage.**

Dans le cadre de la présente note, nous préconisons d'établir les valeurs des accélérations de référence A_{Ek} en fonction de la zone d'implantation des ouvrages sur la base du nouveau zonage sismique de la France publié par décret n°2010-1255 du 22 octobre 2010, avec les valeurs d'accélérations au rocher prescrites pour les ouvrages neufs par l'arrêté « ponts ». Une approche plus locale de définition de l'aléa sismique est néanmoins également envisageable.

6.3 - Bilan du diagnostic sismique : définition des indices de robustesse (ou vulnérabilité sismique calculée)

La robustesse (ou inversement, la vulnérabilité) sismique d'une structure caractérise sa capacité (ou son incapacité) à résister aux sollicitations induites par un tremblement de terre. Plusieurs approches permettent de quantifier cette performance ou vulnérabilité :

- Accélération maximale admissible par la structure (ou accélération au seuil de ruine ou d'intégrité structurelle) ;
- Accélération maximale admissible garantissant un certain niveau de service (accélération au seuil de service) ;
- Capacité ou non à résister à un séisme de référence (approche déterministe) ;
- Probabilité de ruine en cas de séisme de niveau donné (approche probabiliste)...

Nous proposons ici, sur l'exemple des approches développées en Californie et en Suisse, de définir des indices dits de « conformité » (ou de « performance »). Ces indices sont obtenus par le rapport entre :

- l'accélération maximale admissible $a_{\max \text{ adm-EL}}$ correspondant à l'atteinte d'un niveau d'endommagement de l'ouvrage associé à un état-limite de référence (« dommages significatifs » ou « limitation des dommages ») ;
- et l'accélération de référence $a_{\text{ref-EL}}$, ou niveau de séisme réglementaire pour lequel un ouvrage neuf de même catégorie d'importance et implanté au même endroit, devrait être dimensionné vis-à-vis de cet état-limite.

Ainsi pour chaque état-limite, un indice de conformité, noté α_{conf} et exprimé en pourcents, peut être établi par la relation :

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

En pratique, pour chacun des états-limites étudiés, plusieurs indices de conformité seront calculés qui correspondent aux différents éléments de structure (piles, fondations, appareils d'appui...) ou aux différents modes de ruine ou d'endommagement (rupture en flexion, en cisaillement, échappement d'appui...) pour chaque direction de séisme. L'indice de conformité à retenir pour la structure complète correspondra alors à l'indice le plus faible parmi tous ceux calculés. Cet indice de conformité traduit donc la robustesse de l'ouvrage vis-à-vis de l'aléa sismique et donc l'urgence plus ou moins grande de son renforcement : plus l'indice de conformité est faible et plus la période de retour correspondant au niveau de séisme que l'ouvrage est capable de supporter est petite. En revanche, il ne préjuge pas a priori des coûts ou difficultés techniques associés à ce renforcement.

Le bilan du diagnostic consistera alors à dresser un inventaire et une graduation par vulnérabilité croissante des points faibles structurels, ainsi qu'à évaluer leurs conséquences en termes d'intégrité structurelle, d'étendue de dommages, d'éventuels coûts de réparation, de niveau de service ou de sécurité des usagers.

6.4 - Décision de renforcement et niveau de performance à atteindre

6.4.1 - Décision de renforcement

La décision de renforcement et les objectifs de performance à atteindre pour la structure renforcée sont à envisager sur la base d'une analyse coût/bénéfice réaliste intégrant des paramètres tels que :

- la valeur socio-économique de l'ouvrage,
- sa durée d'utilisation restante prévue,
- les renforcements envisageables et leurs coûts.

Pour un ouvrage existant non dimensionné au séisme, l'atteinte d'un indice de conformité égal à 1, n'est en général guère judicieuse car elle nécessite souvent, lorsqu'elle s'avère techniquement réalisable, un investissement très lourd, voire disproportionné par rapport à la valeur de l'ouvrage.

La décision ou non de renforcer l'ouvrage et le niveau de ce renforcement relèvent de la responsabilité du maître d'ouvrage, du gestionnaire ou de l'autorité concédante. Elle résultera généralement d'un compromis entre le niveau des coûts de renforcement et la recherche d'une réduction optimale du risque.

L'approche proposée ci-dessous pour la recherche de ce compromis s'inspire de la méthode développée en Suisse, en reprenant notamment le principe de décroissance du niveau de performance visé avec l'augmentation de l'âge de la structure.

Cette décroissance reflète le fait que d'un point de vue statistique, la probabilité pour un ouvrage d'être soumis à un niveau de tremblement de terre donné diminue en même temps que sa durée d'utilisation restante prévue. Elle peut être établie par une approche probabiliste telle que celle définie par l'annexe A de l'Eurocode 8-2 pour la détermination du niveau de séisme réduit à prendre en compte pendant la phase de construction des ouvrages (avec une période de retour T_{NCR} de 475 ans et une probabilité de dépassement $p = 0,19$ associée à une durée de vie théorique de 100 ans).

On définit ainsi un coefficient $\gamma_{\text{âge}}$, établi en fonction du rapport entre la durée d'utilisation restante théorique (ou prévue) de l'ouvrage et la période de retour associée au séisme de référence à prendre en compte (cf. Figure 23 ci-dessous).

| Durée d'utilisation théorique restante (années) | <10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\gamma_{\text{âge}}$ | 0,44 | 0,56 | 0,64 | 0,71 | 0,77 | 0,82 | 0,86 | 0,90 | 0,94 | 0,98 |

Figure 23 : Valeurs du coefficient $\gamma_{\text{âge}}$, fonction de la durée d'utilisation restante théorique (ou prévue) de l'ouvrage

L'application du coefficient $\gamma_{\text{âge}}$ conduit donc implicitement à un recalibrage de la période de retour à prendre en compte, de façon à aboutir, quelle que soit la durée d'utilisation restante de l'ouvrage, à un même niveau de protection en terme de probabilité de dépassement de l'événement sismique de référence.

La détermination des niveaux de performance visés, préconisés dans le cadre du guide, s'appuie sur le diagramme de la Figure 24 ci-dessous :

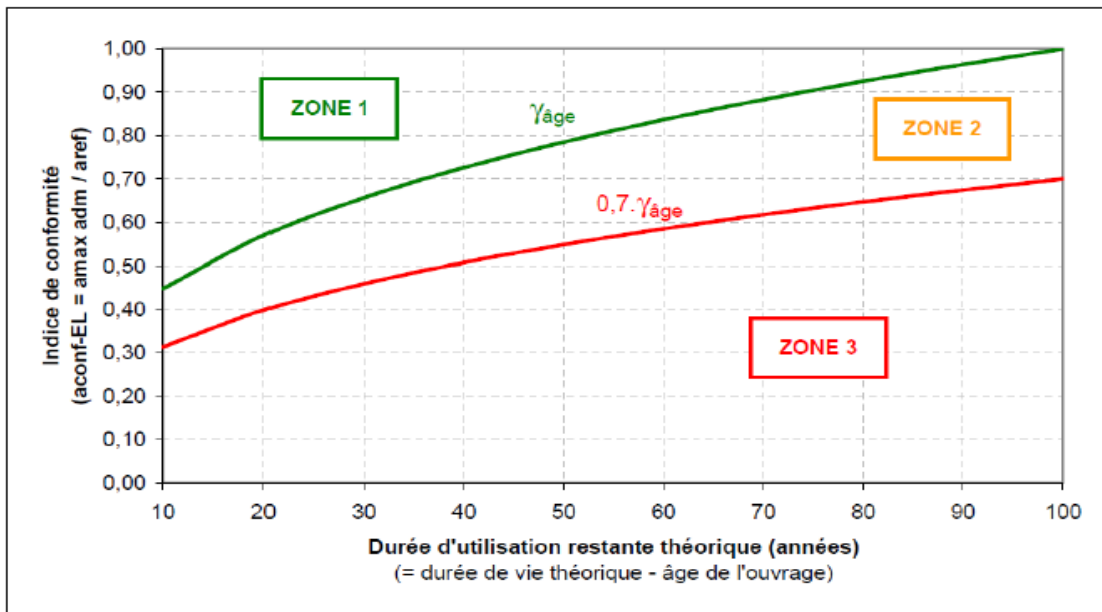


Figure 24 : Indices de conformité « cibles » préconisés

Sur ce diagramme :

- La zone 1 est définie comme « zone de risque acceptable pour l'ouvrage en l'état » : pour les ouvrages dont le niveau de performance initial (avant renforcement) se situe dans cette zone ($\alpha_{\text{conf}} \geq \gamma_{\text{âge}}$), aucun renforcement n'est préconisé ;
- La zone 2 est définie comme « zone de risque à réduire de manière optimale » : pour les ouvrages dont le niveau de performance initial (avant renforcement) se situe dans cette zone ($0,7 \gamma_{\text{âge}} \leq \alpha_{\text{conf}} < \gamma_{\text{âge}}$), il convient d'envisager toutes les mesures permettant de réduire significativement le niveau de risque sismique pour un coût raisonnable ;
- La zone 3 est définie comme « zone de risque intolérable » : pour les ouvrages dont le niveau de performance se situe dans cette zone ($\alpha_{\text{conf}} < 0,7 \gamma_{\text{âge}}$), un renforcement est impératif, qui doit permettre d'atteindre au minimum la zone 2. A défaut d'une faisabilité technique ou financière de renforcer l'ouvrage, un déclassement pourra être envisagé qui aboutira à abaisser le niveau de l'accélération de référence a_{ref} .

Dans la pratique, la détermination de la durée d'utilisation restante théorique (ou prévue) n'est pas sans difficulté (prise en compte de l'état actuel, des éventuelles campagnes d'entretien, réfection ou réparations/renforcements passés, élargissements, etc.). Typiquement, on considère que la durée d'usage d'un pont correctement conçu, construit et entretenu est de l'ordre de 100 ans. Pour l'évaluation du coefficient γ_{age} , il conviendra de considérer que la durée d'utilisation restante théorique de l'ouvrage peut être rallongée d'une durée pouvant aller jusqu'à une trentaine d'années pour un pont existant âgé et en bon état (noté 2 selon le classement IQOA) et/ou faisant l'objet d'un suivi de maintenance et d'un entretien régulier. Ce sera également le cas pour les ponts ayant fait l'objet de réparations ou de travaux d'élargissement récents.

Nous rappelons par ailleurs que certains ouvrages, comme les ponts-voûtes, les portiques et les ponts cadres, les ponts de petite portée (< 4 mètres) équipés de butées latérales ont une présomption de bon comportement en cas de séisme, sauf s'ils sont en mauvais état (note structurale 3 ou 3U selon le classement IQOA). Dans les zones de sismicité faible à modérée, on pourra considérer que ces ouvrages n'ont pas besoin d'être renforcés.

6.4.2 - Choix d'une solution de renforcement optimale

Plusieurs stratégies ou techniques de renforcement sismique permettent de réduire significativement le risque sismique sur les ouvrages d'art. Le choix entre l'une ou l'autre dépendra en pratique de la typologie de l'ouvrage, de ses spécificités et de la ou des zones identifiées comme les plus vulnérables. Parmi les plus classiques, on peut citer :

- Les attelages de travées indépendantes permettant d'éviter les entrechoquements et de limiter ainsi les risques d'échappement d'appui ;
- La mise en place de butées latérales ;
- Les chemisages de piles destinés à augmenter leur résistance ou leur ductilité ;
- La mise en place de dispositifs antisismiques, dissipateurs d'énergie ;
- Les renforcements de fondations par ajout de pieux ou traitement de sol ;
- La mise en œuvre de tirants stabilisateurs des murs de culées ou des tympans de ponts en maçonnerie.

Nous proposons d'établir le choix de la technique et du niveau de renforcement optimums sur l'étude sommaire de différentes solutions de renforcement envisageables (différentes stratégies et différents niveaux) sous la forme d'une « **étude préliminaire de renforcement sismique** ».

Cette étude s'appuie sur une analyse comparative multicritères des différentes solutions envisageables, basée sur des paramètres techniques (dimensionnement et faisabilité), financiers (coût du renforcement) ou socio-économiques (analyse qualitative des enjeux, des risques associés à un dépassement du niveau de séisme considéré). Toute solution de renforcement est également à comparer aux solutions extrêmes que constituent la « non-intervention » et la solution de « démolition/reconstruction ». Par ailleurs, pour chacune des solutions envisagées, il convient de s'assurer de sa compatibilité avec le bon fonctionnement en service de l'ouvrage (notamment vis-à-vis des effets thermiques).

En outre, l'analyse de confortement résultera généralement d'un processus itératif délicat. Dans ce processus, chaque étape ou niveau de renforcement) devra généralement être suivie d'une nouvelle analyse complète car les renforts préconisés sont susceptibles de modifier les caractéristiques mécaniques et donc le comportement dynamique de la structure.

Le schéma général suivant (Figure 25) peut ainsi être adopté :

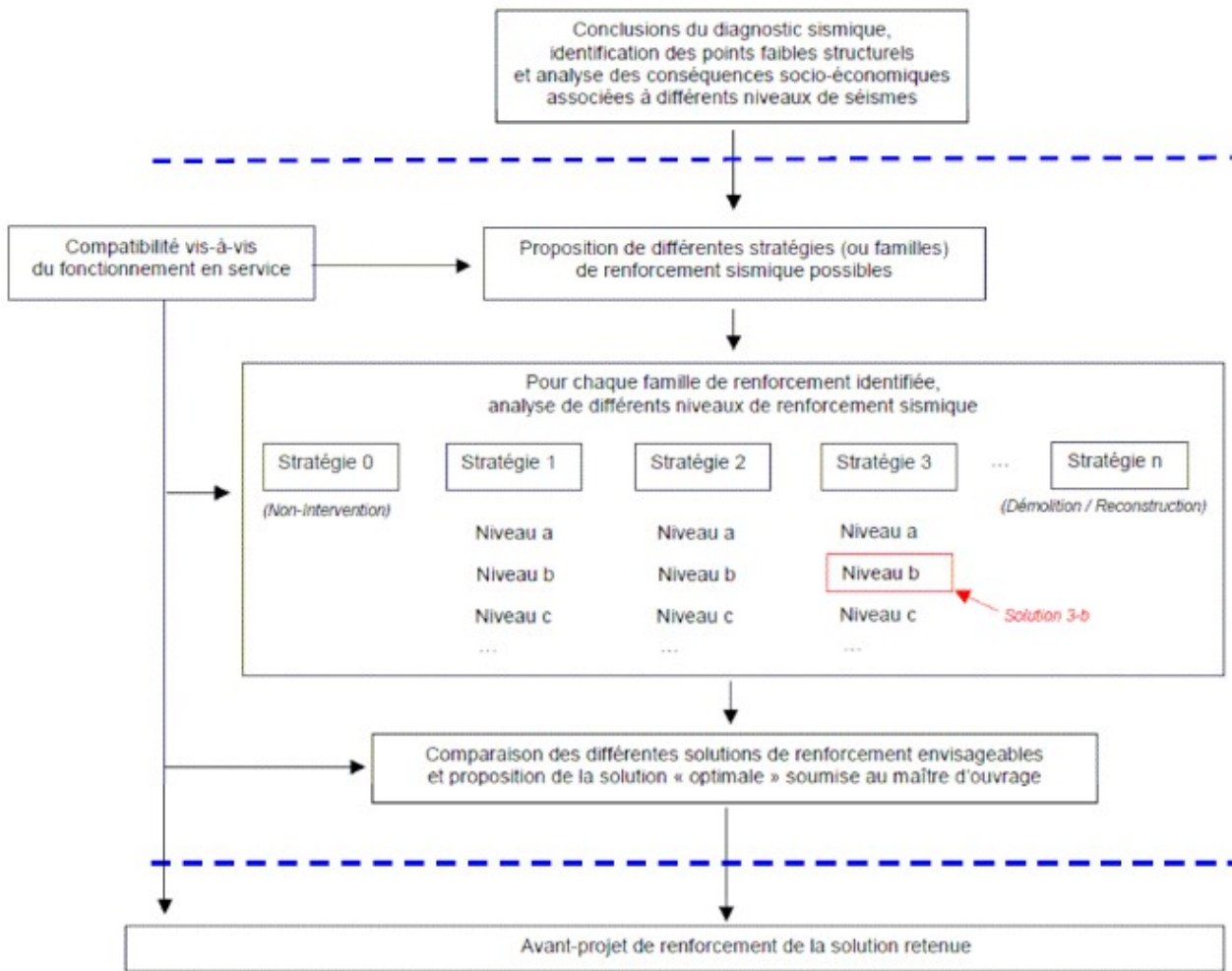


Figure 25 : Format général des « Études Préliminaires de Renforcement Sismique »

Pour chacune des stratégies (ou familles de solutions) envisagées, plusieurs niveaux de renforcement peuvent être étudiés, soit par amélioration (augmentation du dimensionnement ou du niveau de performance) du dispositif relatif à la stratégie proposée, soit par « mixage » de différentes stratégies de confortement, jusqu'à atteindre le niveau de performance sismique réglementaire de référence pour les ouvrages neufs ou une infaisabilité technologique de renforcer au-delà du niveau atteint.

Par ailleurs, chaque étape de confortement étant susceptible de modifier le comportement dynamique sismique de la structure, elle devra généralement être suivie d'une nouvelle analyse structurelle dans le cadre d'un processus itératif.

A l'issue de cette analyse, et à moins de procéder à un « déclassement » de l'ouvrage associé à un report de fonctionnalité sur d'autres infrastructures parallèles, seules les solutions permettant d'atteindre au minimum un niveau de performance associé à un indice de conformité $\gamma_{conf} > 0,7 \gamma_{\text{âge}}$ (zone 2 de la Figure 24) seront retenues. A défaut de solution optimale évidente parmi celles restantes, le choix de la solution à retenir pourra être établi sur la base de l'indice de rentabilité « R » défini par l'équation ci-dessous, en fonction :

- de l'importance stratégique de l'ouvrage,
- du gain de performance apporté par le renforcement, relativement au « défaut » ou « manque » de robustesse initial de la structure,
- du coût du renforcement, rapporté à celui de la solution extrême de démolition/reconstruction :

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

où :

- γ_{enjeu} est associé à la valeur socio-économique de l'ouvrage (cf. § 6.2.2) :
 - $\gamma_{\text{enjeu}} = 1,4$ pour un ouvrage de catégorie « équivalente » IV ($100 \leq I \leq 150$)
 - $\gamma_{\text{enjeu}} = 1,2$ pour un ouvrage de catégorie « équivalente » III ($50 \leq I < 100$)
 - $\gamma_{\text{enjeu}} = 1,0$ pour un ouvrage de catégorie « équivalente » \leq II ($0 \leq I < 50$)(valeurs recommandées basées sur les coefficients d'importance γ_i , cf. § 6.2.2)

- a_{ref} est le niveau d'accélération de référence associé à l'état-limite ou niveau d'endommagement considéré ;
- $a_{\text{max adm}}$ est le niveau d'accélération maximale au seuil de l'état-limite considéré pour l'ouvrage en l'état (avant renforcement) ;
- Δa_{renf} est le gain apporté par le renforcement envisagé en terme de niveau d'accélération maximale admissible, pour le niveau d'endommagement ou état-limite considéré, et borné à $\gamma_{\text{âge}} \cdot a_{\text{ref}}$;
- C_{renf} est le coût du renforcement projeté ;
- C_{rempl} est le coût de remplacement (démolition/reconstruction) de l'ouvrage ;
- $\gamma_{\text{âge}}$ est fourni par la Figure 23 et permet de prendre en compte la durée d'utilisation restante théorique (ou prévue) de l'ouvrage.

Au final, l'étude préliminaire de renforcement sismique aboutira à un tableau d'analyse multicritères dont un format possible et non exhaustif en terme de paramètres est présenté par la Figure 26 ci-dessous :

| Solutions | 0 <i>(non-intervention)</i> | 1-a | 1-b | 2-b | 2-c | 2-d | 3-a | ... | n <i>(démolition /reconstruction)</i> |
|---|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|---|
| Accélération admissible $\Delta_{max adm EL}$ | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | |
| 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 avec fonctionnement en 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 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | $\gamma_{enjeu} - 1$ |
| ... | | | | | | | | | |
| Bilan des avantages | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| Bilan des inconvénients | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

Descriptif sommaire des différentes solutions :

1-a : Attelage des travées

1-b : Attelage des travées + dispositifs antisismiques

2-b : Modification des appareils d'appui

2-c : Modification des appareils d'appui + augmentation des souffles des culées

2-d : Modification des appareils d'appui + dispositifs antisismiques

3-a : Butées parasismiques + chemisage des piles + renforcement des fondations

...

Figure 26 : Exemple de tableau d'analyse multicritères pour la comparaison de solutions dans le cadre de l'étude préliminaire de renforcement sismique

Nota : La méthodologie développée n'a qu'une valeur informative et non normative ; elle a vocation à éclairer les arbitrages.

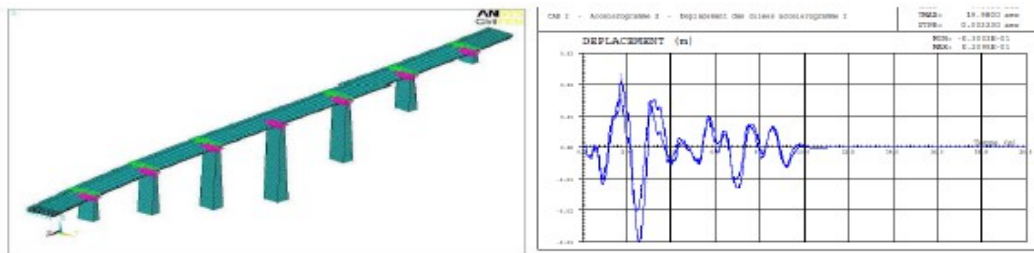
6.5 - Exemples d'application déjà réalisées

6.5.1 - Application aux ouvrages élargis de l'A9 (ASF) entre Perpignan et l'Espagne

Dans le cadre de l'élargissement de 6 viaducs de l'autoroute A9 entre Perpignan et l'Espagne, il a été décidé (décision ministérielle du 15 octobre 2008) de procéder à leur renforcement sismique selon la méthodologie du guide Sétra en cours d'élaboration.

En effet, ces ouvrages non-courants construits entre 1970 et 1976 (soit 20 ans environ avant la publication des règles PS92) présentaient une vulnérabilité importante à l'aléa sismique. Les diagnostic menés sur ces ouvrages ont ainsi conduit à un facteur de cohérence α_{conf} (rapport entre l'accélération maximale admissible et l'accélération règlementaire de calcul pour les OA neufs) compris entre 10% et 49%.

Les projets de renforcement menés par Setec-TPI pour le compte de la société ASF (AMO CETE Méditerranée) sur la base d'une étude préliminaire de renforcement sismique telle que décrite précédemment, ont conduit notamment à préconiser sur ces ouvrages l'emploi de dispositifs parasismiques de type amortisseurs, permettant d'atteindre un facteur de cohérence optimal (égale ou proche de 100%) pour un coût associé compris entre 5 et 13% des coûts de démolition/reconstruction.



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

Figure 27: Application aux ouvrages élargis de l'A9 entre Perpignan et l'Espagne

6.5.2 - Diagnostic et renforcement sismique du viaduc de Caronte à Martigues (A55)

Construit entre 1970 et 1972 selon les prescriptions des règles PS69 (calcul statique pour une accélération forfaitaire horizontale de 0,1g), le viaduc de Caronte qui porte l'autoroute A55 au niveau de la ville de Martigues a fait l'objet d'un diagnostic et projet de renforcement sismique dans le cadre d'une opération plus large de réparation.

L'étude a conduit à retenir une solution consistant à remplacer et assouplir le système d'appui de l'ouvrage, à réaliser des butées de blocage latéral sur les appuis d'extrémité et de sécurité sur les autres et à disposer des dispositifs amortisseurs précontraints de forte capacité au droit de chacune des culées des viaducs d'accès. Des études spécifiques menées en laboratoire (essais tri-axiaux) ont par ailleurs permis d'écarter le risque de liquéfaction sur cette zone très sensible.

Au final, la solution proposée permet de justifier un facteur de cohérence de 70% à 100% selon le signal (ou accélérogramme) de calcul utilisé (calé sur le spectre règlementaire).

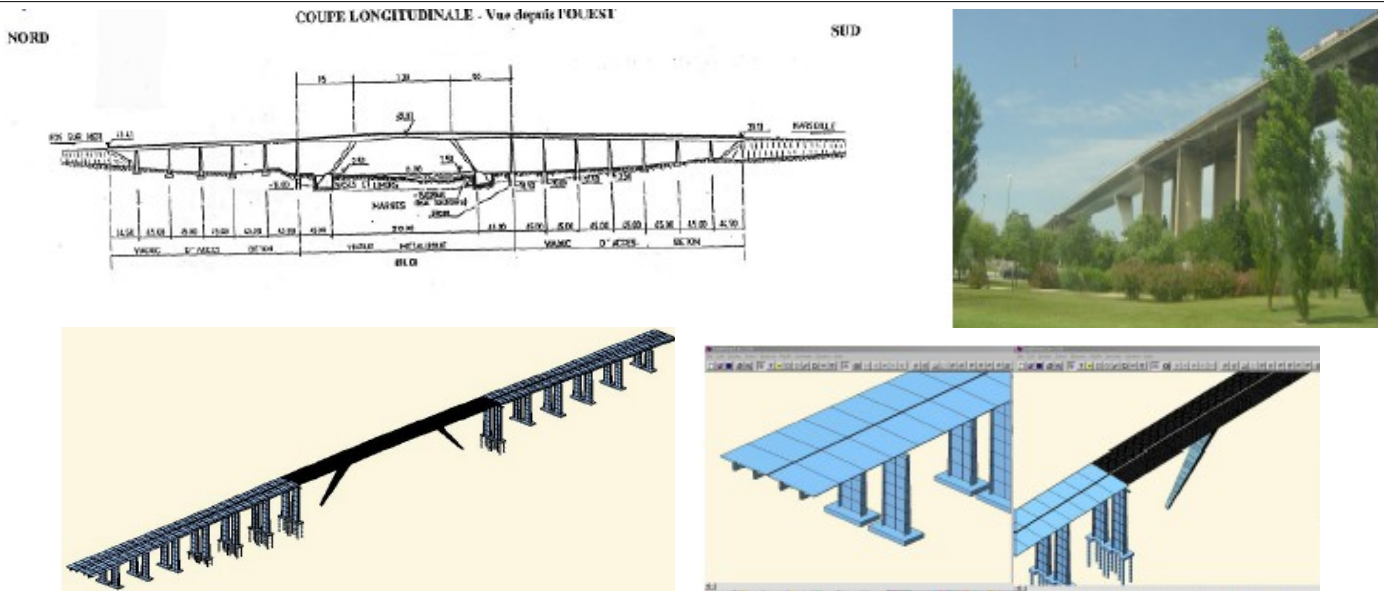


Figure 28: Diagnostic et renforcement sismique du viaduc de Caronte à Martigues (A55)

6.5.3 - Diagnostic et projet de renforcement sismique du Centre Commercial du Merlan (L2 - Marseille)

Dans le cadre du projet de liaison autoroutière de Marseille (L2), la structure du Merlan qui porte un important centre commercial en surplomb de la future infrastructure a fait l'objet d'un diagnostic sismique visant évaluer sa vulnérabilité à l'aléa sismique et à proposer des stratégies de renforcement.

L'étude a consisté en une approche itérative basée sur l'analyse des points faibles et irrégularités de cette structure très particulière (assemblage poteaux-poutres sans liaisonnement des nœuds) et a conduit à proposer une série de mesures de principe destinées à améliorer le comportement dynamique du système puis à les justifier par le calcul. Ces mesures ont notamment consisté dans le liaisonnement systématique des nœuds d'ossatures (selon le même principe que ceux décrits les documents techniques italiens pour les renforcement des structures industrielles), associé à des renforts locaux des éléments porteurs (poteaux et poutres) par fibres composites.

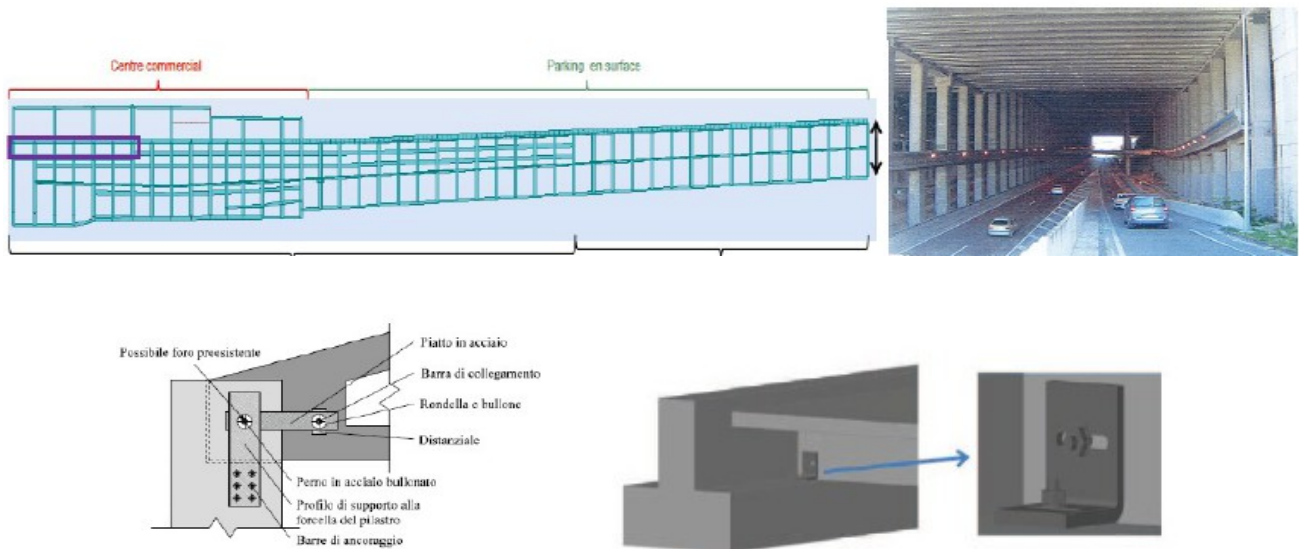


Figure 29 : Diagnostic et projet de renforcement sismique du Centre Commercial du Merlan (L2 – Marseille) et principe de liaisonnement des ossatures poteaux-poutres (sur le principe de la documentation technique italienne pour le renforcement des structures industrielles)

7. CAS PARTICULIERS DES ÉLARGISSEMENTS D'OUVRAGES ET REMPLACEMENTS DE TABLIERS

7.1 - Exposé de la problématique et démarche générale

La phrase : « 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. », ayant été supprimée de la nouvelle version de l'Arrêté « ponts » (cf. §2.1.3), une plus grande souplesse et **liberté d'interprétation** peut être attribuée aux cas particuliers des élargissements d'ouvrage et remplacements de tabliers.

En se référant à l'Arrêté « bâtiments » (cf. § 2.1.2), plus directif sur cette problématique, deux objectifs de principe peuvent être retenus :

- En cas de travaux conduisant à une modification significative de la surface d'utilisation de la structure, il conviendra de vérifier que cette dernière reste capable de supporter une certaine fraction de l'accélération de calcul de référence utilisée dans le cas des constructions neuves ;
- Les travaux, de quelque nature qu'ils soient, réalisés sur des bâtiments existants ne doivent pas aggraver la vulnérabilité de ceux-ci au séisme.

Concernant le premier point, l'approche de l'arrêté « bâtiments » consistant (de manière légèrement schématisée et simplifiée ici) à vérifier de manière forfaitaire que la structure reste capable de supporter 60% de l'accélération de référence lorsque sa surface habitable varie de 20 à 30% selon les cas, indépendamment d'autres éléments de contexte ou d'enjeu, paraît perfectible. Nous proposons dans le cadre de la présente note de lui préférer une approche plus nuancée pour les ponts consistant à appliquer la même démarche que celle décrite précédemment et visant à déterminer le « meilleur » niveau de renforcement sur la base d'un optimum coût/performance enjeu évalué en tenant compte des trois critères « aléa », « vulnérabilité » et « importance ». Les élargissements ou remplacements de tabliers sont alors considérés comme une **simple extension du cas plus général d'analyse sismique spécifique (même stratégie et mêmes objectifs) développé au §6.**

Concernant le deuxième point **en revanche, le principe qui consiste à ne pas faire prendre à l'usager un risque supérieur à celui correspondant à la situation avant l'aménagement ou la modification de la structure de l'ouvrage semble devoir être conservé pour les ponts, et ce indépendamment de l'importance stratégique ou de l'enjeu associés à l'ouvrage.** La prescription, telle que rédigée dans l'arrêté « bâtiments » mérite néanmoins d'être précisée quantitativement (impact notamment des « petites » interventions comme les remplacements des équipements types garde-corps, portiques de signalisation, rechargements de chaussée...). Ainsi dans le cas d'un pont, on pourra considérer que la vulnérabilité de l'ouvrage est sensiblement aggravée à partir d'un **incrément d'effort sismique de l'ordre de 10%** et d'un **incrément de déplacement sismique de l'ordre de 20%** par rapport à la situation initiale.

A cette fin, l'analyse paramétrique ci-dessous et les courbes abaqes qui en découlent visent à évaluer, pour différentes gammes de fréquence (ou période propre) initiale et différents contextes géologiques (ou classes de sols), l'impact sur les sollicitations sismiques d'une modification de la masse du tablier et dans quelle mesure les augmentations de sollicitations peuvent être compensées par une modification des conditions d'appui (modification du nombre et/ou de la raideur des appareils d'appui par exemple).

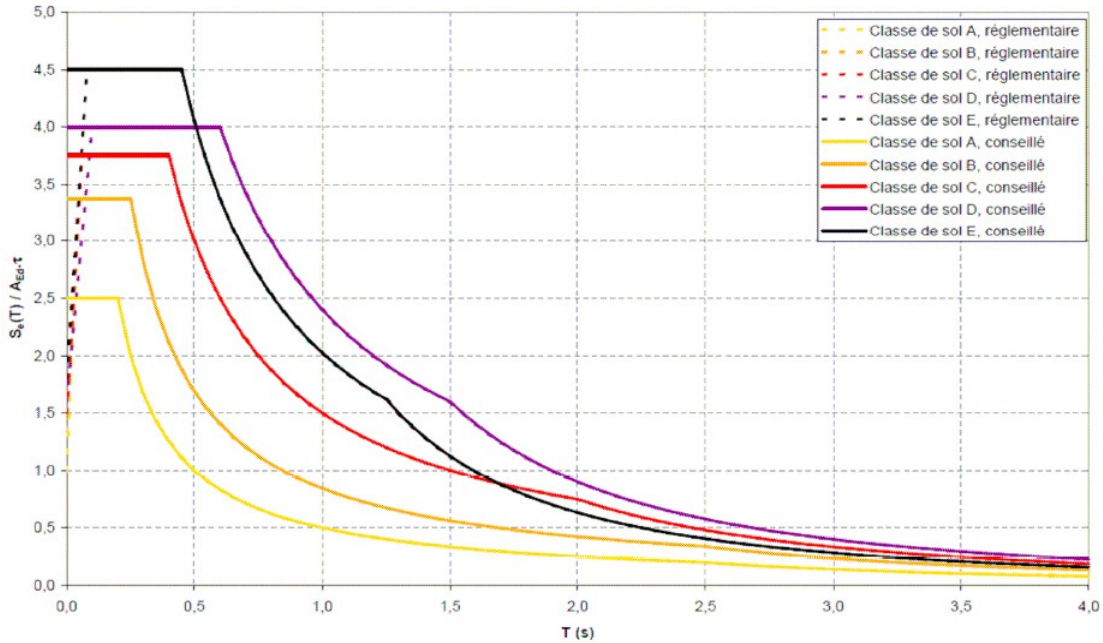
Notas :

(1) Une augmentation relative de 10% des efforts sismiques conduit à une augmentation du risque dans des proportions d'autant plus élevées que l'ouvrage présente une présomption de vulnérabilité forte. Ce critère ne constitue par conséquent qu'un premier filtre, pour décider d'engager ou non un calcul du coefficient de conformité (diagnostic sismique cf. §6.3). Si ce calcul doit être mené, on pourra par exemple considérer que le risque sismique est sensiblement aggravé à partir d'un abaissement du coefficient de conformité de l'ordre de 5 %, sans que celui-ci ne puisse descendre au-dessous de 40 %.

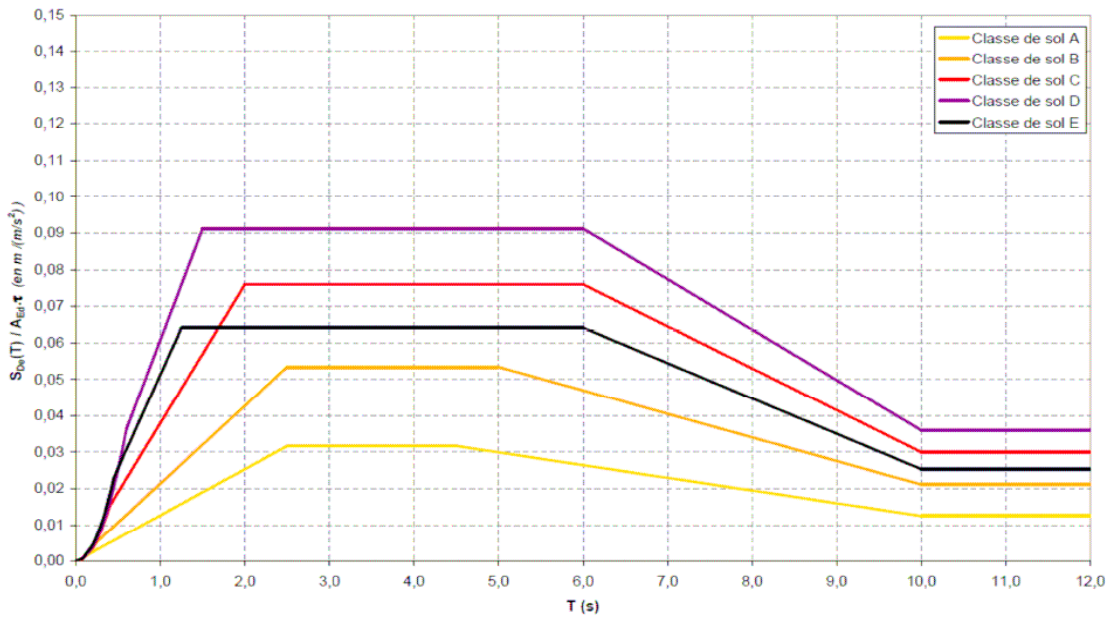
(2) La valeur forfaitaire de 20% sur les déplacements a été calée en considérant que l'ordre de grandeur des déplacements sismiques dans les cas les plus représentatifs était de l'ordre de 10 cm et qu'une variation de +/- 2 cm pouvait constituer une limite théorique pour le bon fonctionnement des appareils d'appui et joints de chaussée les plus courants.

7.2 - Évaluation de l'évolution des sollicitations sismiques en fonction des modifications de masse et de raideur

L'analyse sismique des structures repose traditionnellement sur des spectres de réponse (en accélération ou en déplacement – cf. Figure 30) qui permettent, en fonction de la période propre de vibration d'une structure et de son taux d'amortissement (généralement 5%), de connaître l'accélération totale et la déformation relative qu'elle va subir sous l'effet d'un séisme réglementaire. Ces spectres normalisés, qui dépendent de la nature du sol, traduisent l'amplification dynamique (résonance) à laquelle la structure est soumise. Ils sont ensuite multipliés par l'accélération maximale au niveau du sol, qui dépend de la zone sismique et de l'importance stratégique de l'ouvrage.



Spectres de réponses élastiques en accélération



Spectres de réponses élastiques en déplacement

Figure 30 : Spectres de réponse élastiques réglementaires normalisés ($A_{Ed} = 1 m/s^2$) - Métropole (zones 2 à 4) selon la direction horizontale, pour $\xi=5\%$ et $\tau=1$ (classes de sol A à E)

L'approche proposée et présentée ici a consisté à évaluer l'évolution des sollicitations sismiques (forces, déplacements) sur les ponts suite à une modification de la masse du tablier (élargissement ou remplacement du tablier en conservant les appuis - piles et culées - existants) ou à une modification de la raideur (condition et dispositifs d'appui), pour différentes gammes de périodes propres initiales de vibration d'ouvrages et différentes conditions de site (classes de sol).

Une fourchette de -40% à +40% par rapport à la situation initiale a été retenue pour les variations de masse et de raideur. Le calcul (automatisé) a alors consisté à déterminer à partir de ΔM et ΔK la nouvelle valeur de la période propre à partir de la relation classique $T=2\pi(M/K)^{1/2}$, puis par suite les nouvelles valeurs des réponses spectrales $a(T)$ et $d(T)$ et enfin la nouvelle valeur de l'effort sismique global à partir de l'équivalence statique : $F = M.a(T) = K.d(T)$.

Sept valeurs de périodes propres d'ouvrages jugées représentatives, réparties sur quatre gammes de période propres fondamentales de vibration d'ouvrages conformément au tableau de la Figure 31 ci-dessous ont été étudiées.



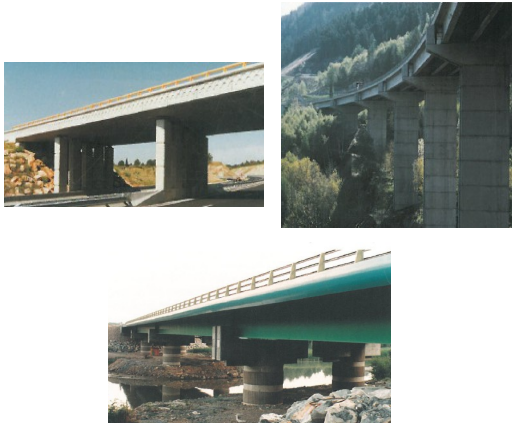
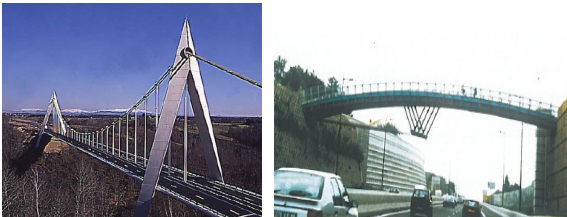
| Raideur (ou souplesse) relative | Gamme de période propre fondamentale associée | Typologies et caractéristiques d'ouvrages associées | Illustrations | Valeurs de périodes propres retenues pour l'étude |
|---------------------------------|---|--|--|---|
| Très raide | $T < 0,125$ s | Ouvrages monolithiques ou encastrés dans le sol : buses, ponts cadres, portiques |  | 0,1 s |
| Raide à moyennement souple | $0,125 \text{ s} \leq T < 0,5$ s | Ouvrages de petites dimensions, piles massives ou de faible hauteur équipées d'appareils d'appui rigides, voûtes en maçonnerie |  | 0,3 s |
| Souple | $0,5 \text{ s} \leq T < 2,5$ s | Viaducs à piles élancées, ouvrages équipés d'appareils d'appui souples ou glissants |  | 0,8 s ; 1,1 s ; 1,4 s ; 2 s |
| Très souple | $T \geq 2,5$ s | Ponts à haubans, ponts suspendus, passerelles piétonnes |  | 3 s |

Figure 31 : Gammes de périodes propres d'ouvrage et typologies associés

Au final l'étude conduit à la production de 35 tableaux (7 périodes propres x 5 classes de sol) et 70 abaques correspondantes qui permettent rapidement et simplement d'évaluer dans quelle mesure les modifications des caractéristiques structurales (masse et raideurs horizontales) sont susceptibles de modifier les sollicitations sismiques (efforts et déplacements) imposées à la structure (et donc au système d'appui existant : piles, culées, fondations...). L'intégralité de ces abaques est présentée **en annexe**. Des interpolations linéaires peuvent être réalisées entre les différentes valeurs de périodes propres fondamentales proposées.

A noter que ces abaques traduisent cependant uniquement l'évolution des sollicitations globales à l'échelle du pont (effort total et déformation globale) et ne peuvent être déclinées appui par appui que si les modifications de masses ou de raideurs sont uniformes sur la longueur de l'ouvrage.

7.3 - Éléments de synthèse et recommandations générales

Dans le cas des élargissements ou remplacements de tablier en réutilisant tout ou partie des appuis existants, et plus généralement pour toute intervention structurale sur les ouvrages d'art (en particulier réparations structurales dans le cas de pathologie ou endommagement pouvant remettre en cause le fonctionnement normal de la structure), il est loisible de mettre à profit l'opération pour se préoccuper et si possible améliorer la performance sismique de l'ouvrage.

Dans tous les cas, il convient de vérifier que la vulnérabilité sismique de l'ouvrage après travaux (élargissement ou remplacement de tablier + mesures de renforcement éventuelles) n'est pas supérieure à celle correspondant à la situation initiale (pas d'augmentation du niveau d'exposition de l'utilisateur au risque sismique) ou a minima de s'assurer que les travaux envisagés ne conduisent pas à une aggravation significative de la vulnérabilité de l'ouvrage. Dans le cadre de la présente étude, une aggravation de vulnérabilité est jugée « significative » à partir de seuils forfaitairement calés à +10% en terme d'évolution des efforts sismiques et +20% en terme d'évolution des déplacements sismiques engendrés dans la structure. **Ces seuils peuvent évidemment être adaptés au cas par cas en fonction des caractéristiques structurales de l'ouvrage, du contexte de l'opération et des moyens disponibles.**

L'analyse paramétrique, menée sur la base de ces seuils et présentée en annexe sous forme d'abaques, conduit aux conclusions suivantes :

- **Pour les remplacements de tablier**, la condition est systématiquement satisfaite si ce remplacement conduit à un allègement global de la structure à conditions d'appui identiques (même raideur horizontale des appareils d'appui) : **les remplacements par des structures de tablier plus légères (métal en remplacement de béton par exemple) sont donc systématiquement à privilégier ;**
- **Pour les élargissements de tablier**, la condition est supposée satisfaite, à raideur d'appui constante, dans les cas suivants :
 - quelque soit ΔM , pour les structures très souples ($T_{initial} \geq 2,5s$) ainsi que pour les structures souples fondées sur sols mous (à partir de $T_{initial} \geq 2s$ sur sols C, D et E, et à partir de $T_{initial} \geq 1,4s$ sur sols D et E) ;
 - si $\Delta M \leq 20\%$, pour $T_{initial} \geq 0,3s$ sur sols A et B et pour $T_{initial} \geq 0,8s$ quelque soit la classe de sol ;
 - si $\Delta M \leq 10\%$.
- Lorsque l'une ou l'autre des conditions ci-dessus n'est pas vérifiée et sauf dans les cas de structures très raides ($T_{initial} \leq 0,125s$), **une compensation du point de vue des efforts transmis aux appuis (piles, culées, fondations) sera généralement possible en diminuant la rigidité globale du système** (remplacement des appareils d'appui en place par des dispositifs plus souples par exemple). **Une vigilance particulière devra néanmoins dans ce cas être accordée à la vérification des déplacements induits**, notamment pour la justification des repos d'appui, des souffles disponibles au droit des culées (en particulier vis-à-vis des risques de chocs sur les plaques d'ancrage de la précontrainte du tablier le cas échéant), des plaques de glissement des appareils d'appui glissant ainsi dans une moindre mesure que des souffles des joints de chaussée (plus facilement remplaçables en cas de rupture sous séisme), qui pourra par exemple conduire à retenir l'emploi de dispositifs parasismiques spéciaux de type amortisseurs.

Une attention particulière devra également systématiquement accompagner les solutions consistant à augmenter simultanément la masse du tablier et la rigidité du système d'appuis (mise en place de butées parasismiques de blocage en complément d'un élargissement de tablier par exemple – cf. Figure 32) car une telle configuration se traduit par une augmentation

significative des efforts sismiques transmis et peut potentiellement amener certaines piles ou fondations à la rupture.

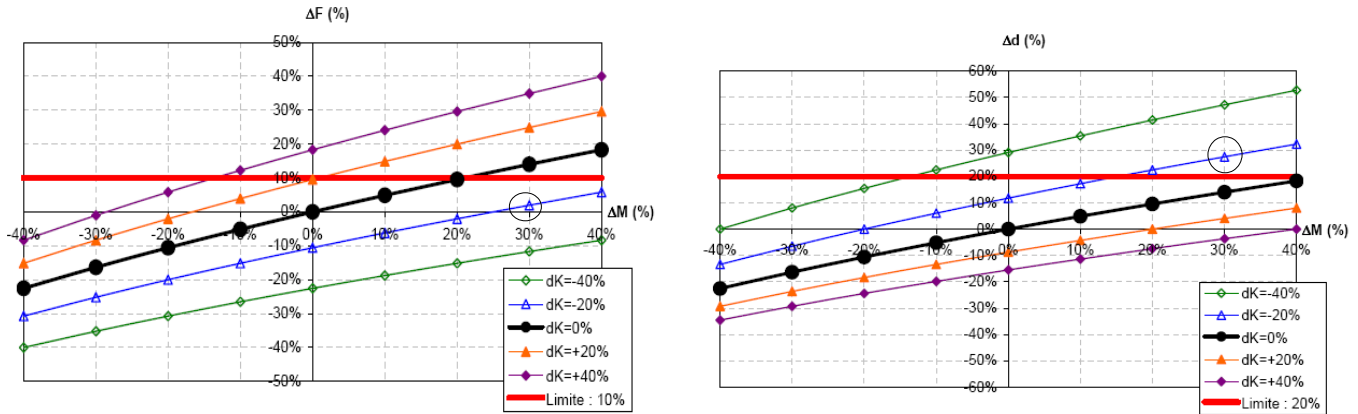


Figure 32 : Exemple d'abaque pour un ouvrage de période propre initial 1,1s et reposant sur un sol de classe C : on observe ici qu'une augmentation de la masse du tablier de 30% peut être entièrement compensée en terme d'efforts par un assouplissement de l'ordre de 20% des conditions d'appui (remplacement des appareils d'appui). Il convient en revanche de s'assurer que les dispositions d'appui (souffle de culées, repos d'appui...) sont compatibles avec une augmentation des déplacements du tablier de l'ordre de 30%

Notas :

- (1) Les parties d'ouvrage nouvellement réalisées devront en principe respecter les règles parasismiques applicables aux ouvrages neufs (dispositions constructives notamment). Une certaine cohérence « de bon sens » est néanmoins à rechercher à l'échelle globale de l'ouvrage vis-à-vis de sa performance sismique ;
- (2) La présente analyse, notamment la construction des abaques, a été établie uniquement dans le contexte de la sismicité métropolitaine (spectres associés aux zones de sismicité 2 à 4). Pour les ouvrages situés aux Antilles (zone 5), il est systématiquement recommandé de procéder à une analyse spécifique.

En outre, pour les ouvrages les plus critiques ou à plus forts enjeux, il convient d'adopter une approche s'inscrivant dans la même logique que celle définie précédemment pour l'identification des ouvrages prioritaires et pour les études spécifiques de renforcements sismiques d'ouvrages (cf. §6).

En particulier, la vérification de la condition $R \times I \geq 50$ reposera sur les trois critères « aléa », « vulnérabilité » et « importance » (cf. §5) et sur l'évaluation préliminaire du risque basé sur les approches Sismoa/Sisroute et sur le remplissage de la matrice d'importance. Cependant l'analyse devra ici être établie sur la base de la configuration de l'ouvrage **après travaux**. De la même façon, le tableau d'analyse multicritères établi dans le cadre de l'Étude Préliminaire de Renforcement Sismique devra intégrer l'analyse des trois solutions « extrêmes » suivantes :

- Situation initiale avant travaux (d'élargissement ou de remplacement de tablier) ;
- Situation après travaux d'élargissement ou de remplacement de tablier uniquement (sans renforcement sismique) ;
- Démolition/reconstruction complète de l'ouvrage pour la nouvelle configuration en prenant en compte la nouvelle réglementation sismique en vigueur ;

En fonction des conclusions du diagnostic détaillé, l'approche recommandée pour établir le projet de confortement sismique est rigoureusement identique à celle décrite au §6 et vise à définir une solution et un niveau de renforcement basés sur le **meilleur optimum « coût/performance/enjeu »** établi à partir d'une étude préliminaire de renforcement sismique.

8. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES

La récente modification du zonage sismique conduit naturellement à s'interroger sur la performance sismique des ouvrages existants. Or si la nouvelle législation sismique nationale traite (partiellement) de la problématique des bâtiments existants et de certaines installations classées existantes, rien en revanche n'est précisé en ce qui concerne les ponts existants.

La modification du zonage ne modifie en rien le risque réel qui est indépendant du règlement et on peut considérer que même si la plupart des ouvrages construits en France ne bénéficient pas d'une conception parasismique adéquate, la majeure partie du territoire métropolitain ne génère pas un aléa sismique très dangereux et la conception de la plupart des ouvrages est robuste. De ce fait, il convient de concentrer les efforts sur les ouvrages les plus « à risque », c'est à dire qui correspondent à la fois à un enjeu stratégique élevé, à une forte exposition à l'aléa (sismicité modérée à forte ou sismicité faible mais associée à des conditions de site défavorables...) et à une forte présomption de vulnérabilité.

Selon cette logique, la présente note de réflexion propose une approche générale pour la prise en compte du risque sismique sur le patrimoine d'ouvrages d'art existants, qui consiste à procéder par étapes de priorisation successives, correspondant à différentes échelles d'analyse et associées à différents niveaux de raffinement :

- Comparaison des itinéraires ou tronçons d'itinéraires à l'échelle nationale ou inter-régionale, basée essentiellement sur des critères d'enjeu et sur la carte d'aléa national ;
- Hiérarchisation des ouvrages le long d'un itinéraires ou tronçon d'itinéraire, avec prise en compte sommaire de la vulnérabilité et des aléas locaux à partir de critères qualitatifs relativement aisément accessibles ;
- Diagnostic sismique détaillé des ouvrages identifiés comme prioritaires suite aux étapes précédentes et le cas échéant, étude préliminaire de renforcement visant à définir la solution et le niveau de durcissement au séisme présentant le meilleur compromis performance/coût/enjeu.

Les premières applications de cette démarche, menées dans le cadre d'études méthodologiques ou opérationnelles, semblent aboutir à une tendance de résultats selon laquelle :

- a) Les ouvrages situés dans les zones de sismicité faible du nouveau zonage, sauf cas très particuliers (conditions de sol très défavorables, forte présomption de vulnérabilité et enjeux forts), n'ont pas à être diagnostiqués ou renforcés vis-à-vis de l'aléa sismique ;
- b) Dans les zones de sismicité modérée du nouveau zonage, seuls les axes stratégiques (autoroutes, réseau structurant) ont en général à être étudiés ou renforcés vis-à-vis de l'aléa sismique ;
- c) Les ouvrages particulièrement robustes comme les « buses », les ponts-cadres, les PIPO, les voûtes, les ouvrages de faible portée (<4m), dès lors qu'ils sont en bon état, n'ont pas à être renforcés vis-à-vis de l'aléa sismique, sauf en zones de sismicité forte et en zones de sismicité moyenne associées à une forte présomption d'effets de site ou induits (conditions géologiques ou topographiques très défavorables, présomption de risque de liquéfaction, chutes de blocs ou glissements de terrain) ;
- d) Les ouvrages de faible importance (catégories d'importance « équivalentes » \leq II selon l'approche détaillée au §5.1) n'ont pas à être renforcés ;
- e) Les ouvrages à plus fort enjeu (catégorie d'importance « équivalente » IV) à partir d'un certain niveau de sismicité (zones de sismicité moyenne et forte ou zone de sismicité modérée associée à des conditions de site très défavorables) doivent systématiquement faire l'objet d'un diagnostic détaillé (basé sur un calcul numérique).

Selon cette tendance observée (qui ne dispense nullement de procéder à l'analyse), l'application de la présente note devrait conduire à renforcer principalement les ouvrages, en particulier non-courants, présentant un enjeu socio-économique important, situés en zones d'aléa sismique modéré à fort (zones 3 à 5 au sens du nouveau zonage sismique national publié par Décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010), particulièrement sensibles au séisme et/ou reposant sur des types de sols défavorables.

Dans la plupart des cas où un renforcement sismique s'est avéré nécessaire, une solution a pu être définie pour un coût

inférieur ou égal à 10% environ du coût de reconstruction.

Nous rappelons néanmoins que la décision ou non de renforcer l'ouvrage et le niveau de ce renforcement relèvent de la responsabilité du maître d'ouvrage, sauf obligation réglementaire.

En ce qui concerne les cas particuliers des élargissements d'ouvrage et remplacements de tabliers, l'approche proposée intègre en outre l'exigence qui consiste à s'assurer que les travaux envisagés n'induisent pas à une aggravation significative de la vulnérabilité de l'ouvrage. Une étude paramétrique sous forme d'abaques a été produite, qui permet d'évaluer l'impact des modifications de masse et de raideur sur l'évolution des sollicitations sismiques (efforts et déplacement) imposées à la structure. Cette étude, basée sur des seuils critiques forfaitairement calés sur une augmentation de 10% des efforts sismiques et de 20% des déplacements sismiques (seuils éventuellement adaptables au cas par cas en fonction des caractéristiques de la structure et du contexte de l'opération), conduit aux conclusions suivantes :

- Pour les remplacements de tablier, la condition est systématiquement satisfaite si ce remplacement conduit à un allègement global de la structure à conditions d'appui identiques (même raideur horizontale des appareils d'appui) : **les remplacements par des structures de tablier plus légères (métal en remplacement de béton par exemple) sont donc systématiquement à privilégier** ;
- Pour les élargissements de tablier, la condition est supposée satisfaite, à raideur d'appui constante, dans les cas suivants :
 - quelque soit ΔM , pour les structures très souples ($T_{initial} \geq 2,5s$) ainsi que pour les structures souples fondées sur sols mous (à partir de $T_{initial} \geq 2s$ sur sols C, D et E, et à partir de $T_{initial} \geq 1,4s$ sur sols D et E) ;
 - si $\Delta M \leq 20\%$, pour $T_{initial} \geq 0,3s$ sur sols A et B et pour $T_{initial} \geq 0,8s$ quelque soit la classe de sol ;
 - si $\Delta M \leq 10\%$.
- Lorsque l'une ou l'autre des conditions ci-dessus n'est pas vérifiée et sauf dans les cas de structures très raides ($T_{initial} \leq 0,125s$), **une compensation du point de vue des efforts transmis aux appuis (piles, culées, fondations) sera généralement possible en diminuant la rigidité globale du système** (remplacement des appareils d'appui en place par des dispositifs plus souples par exemple). **Une vigilance particulière devra néanmoins dans ce cas être accordée à la vérification des déplacements induits**, notamment pour la justification des repos d'appui, des souffles disponibles au droit des culées, des plaques de glissement des appareils d'appui glissant ainsi dans une moindre mesure que des souffles des joints de chaussée, qui pourra par exemple conduire à retenir l'emploi de dispositifs parasismiques spéciaux de type amortisseurs.

Une attention particulière devra également systématiquement accompagner les solutions consistant à augmenter simultanément la masse du tablier et la rigidité du système d'appuis (mise en place de butées parasismiques de blocage en complément d'un élargissement de tablier par exemple) car une telle configuration se traduit par une augmentation significative des efforts sismiques transmis et peut potentiellement amener certaines piles ou fondations à la rupture.

9. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- NF EN 1998-1 et NF EN 1998-1-NA : Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments
- NF EN 1998-2 et NF EN 1998-2-NA : Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 2 : Ponts
- NF EN 1998-3 et NF EN 1998-3-NA : Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 3 : Évaluation et renforcement des bâtiments
- NF EN 1998-5 et NF EN 1998-5-NA : Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 5 : Fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques
- NF EN 1337-3 : Appareils d'appui structuraux. Partie 3 : Appareils d'appui en élastomère
- NF EN 15129 : Dispositifs antisismiques
- Décret n° 2010-1254 du 22 octobre 2010 relatif à la prévention du risque sismique
- Décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010 portant délimitation des zones de sismicité du territoire français
- Arrêté du 22 octobre 2010 (modifié juillet 2011 et octobre 2012) relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal »
- Arrêté du 24 janvier 2011 fixant les règles parasismiques applicables à certaines installations classées
- Arrêté du 26 octobre 2011 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux ponts de la classe dite « à risque normal »
- Guide Sétra « Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants » (*à paraître*) – version de mai 2013
- Guide Sétra « Maîtrise des risques - Application aux ouvrages d'art » (2013)
- Guide Sétra « Ponts en zone sismique – Conception et dimensionnement selon l'Eurocode 8 » - version provisoire publiée de février 2012
- Cahier Technique AFPS/Sétra « Dispositifs parasismiques pour les ponts » (*à paraître*) – version de février 2013
- Guide des dispositions constructives parasismiques des ouvrages en acier, béton, bois, et maçonnerie – AFPS, Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 2011
- Guide AFPS/CFMS « Procédés d'amélioration et de renforcement de sol sous actions sismiques » - 2012
- Priestley, Seible, Calvi : Seismic design and Retrofit of Bridges – New York : Wiley 1996
- Applied Technology Council (ATC), 1983, "Seismic Retrofitting Guidelines for Highway Bridges," FHWA/RD83/007
- Applied Technology Council, 1996, "Improved Seismic design Criteria for California Bridges : provisional Recommendations," ATC-32
- Ordonnance du président du Conseil des Ministres Italien N°3274 de 2003 relative aux interventions nécessaires à la mise aux normes et à l'amélioration du comportement des ouvrages en cas de séisme
- Extending the Service Life of Bridges : Guidelines for the Design, Construction and Maintenance Stages – AIPCR, C.4.4 Italian Technical Committee "Road Bridges and Related Structures"
- Évaluation parasismique des ponts-routes existants – Office Fédéral Suisse des Routes (OFROU), 2005
- Seismic Vulnerability and Retrofit of Bridges (Vulnérabilité et confortement sismique des ponts), fév. 2001 – F. Légeron, Sétra
- SISMOA : Évaluation préliminaire du risque sismique sur les ouvrages d'art existants – Sétra – Nov. 2010
- SISMOA : A Simplified Method to Assess the Seismic Vulnerability of Existing Bridges – Conférence ECEES Genève, Sept. 2006 - P. Marchand, D. Davi, P. Schmitt, C. Thibault, A. M. Duval, D. Criado
- SISMUR, tool for evaluation of the seismic risks on the existing retaining walls – Conférence ECEES Genève, Sept. 2006 - D. Criado, C. Thibault, P. Marchand, D. Davi
- SISROUTE: Earthquake Scenario Generation System along Roads. (Global concept and Hazard Assessment) – Conférence ECEES Genève, Sept. 2006 - A. M. Duval, E. Bertrand, C. Renou, P. Marchand, D. Davi, D. Criado

- Mission post-sismique CETE Méditerranée/Sétra suite au séisme de l'Aquila du 6 avril 2009 – Analyse du comportement des ouvrages d'art – A. Vivier, D. Davi - Bulletin Ouvrage d'Art du Sétra n°63, mars 2010
- Gastaud C., juin 2008 : Diagnostic et renforcement sismique des ponts existants – Travail de Fin d'Etudes – ENTPE, Promotion 53, VA Génie Civil
- APRR/Egis-JMI – Analyse de la vulnérabilité sismiques des ouvrages – 29/03/2012
- AREA/Egis-JMI – Vulnérabilité sismiques des OA – 26/06/2012
- Développement d'un outil pour le classement d'un parc d'Ouvrages d'Art vis-à-vis de la vulnérabilité sismique – Egis-JMI, Journées techniques GC'2013
- ESCOTA/Setec-TPI - Estimation et priorisation du diagnostic des vulnérabilités au séisme des ouvrages d'art (Document n°003-28234-ST-014-C1 du 11 juillet 2012)

ANNEXE :

Abaques traduisant l'évolution des sollicitations sismiques globales en fonction des modifications de masse et de raideur pour différentes périodes propres fondamentales initiales et différentes conditions de site



**CETE
Méditerranée**

Département DCEDI
Division Ouvrages d'Art
denis.davi@developpement-durable.gouv.fr
Tél. : 04 42 24 76 81
Fax : 04 42 24 77 83



MINISTÈRE
DE L'ÉGALITÉ
DES TERRITOIRES
ET DU LOGEMENT

MINISTÈRE
DE L'ÉCOLOGIE,
DU DÉVELOPPEMENT
DURABLE
ET DE L'ÉNERGIE