

Direction territoriale Méditerranée

**PCI 57 : « Vulnérabilité des ouvrages de Génie Civil
aux aléas sismiques et hydrauliques »**

**Cadre d'Actions pour la Prévention du Risque Sismique (CAPRiS)
Déclinaison en région PACA**

**Vulnérabilité des itinéraires stratégiques
à l'aléa sismique en région PACA**

**Priorisation des itinéraires de la région PACA vis-à-vis du risque sismique
et capitalisation d'études déjà menées sur certains itinéraires et ouvrages**



Figure 25 : Analyse de la vulnérabilité sismique des ouvrages couvrant le triangle autoroutier A7-A8-A54 (ASF)

Triangle autoroutier A7-A8-A54

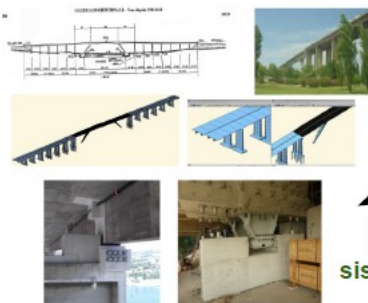
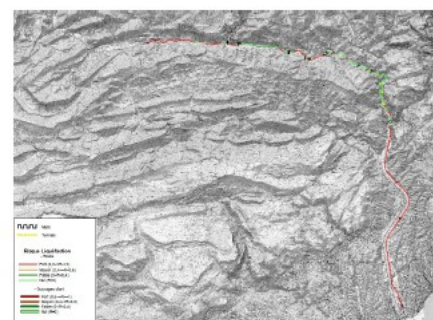
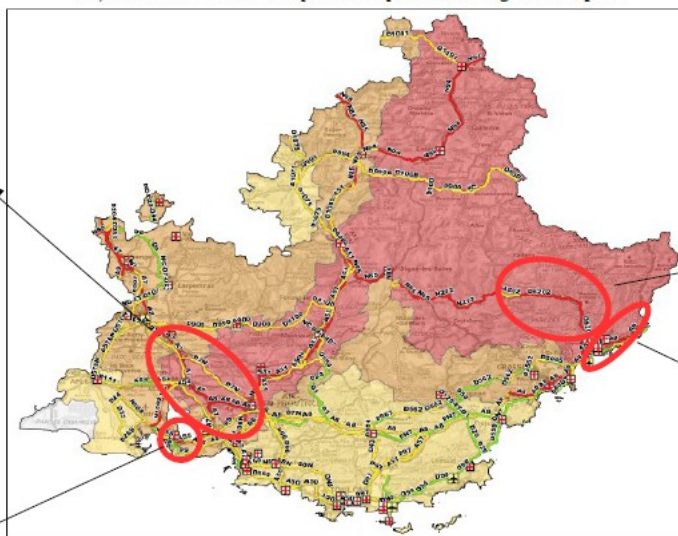


Figure 28 : Diagnostic et renforcement sismique du viaduc de Caronte à Marseille (PCI)

**Diagnostic et renforcement
sismiques du viaduc de Caronte
(A55)**

11) Attribut Priorité + aéroports + hopitaux + zonage + fond plan



**RD6202 : itinéraire test des
méthodes Sismoa/Sisroute...**



**Desserte et contournement Nord
de Nice par l'autoroute A8**



Historique des versions du document

Commentaire	Date	Auteurs	Vérfié	Approuvé	Version
Version initiale	22/11/2016	D. Davi		J.-C. Carlès	V1

Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement PACA
Service de Prévention des Risques / Unité des Risques Naturels Majeurs

Adresse physique : 36 Boulevard des Dames - 13002 Marseille

Adresse postale :
16 Rue Zattara - CS 70248
13331 MARSEILLE CEDEX 3

Ghislaine VERRHIEST
Tél. : 04 88 22 63 90
mél: ghislaine.verrhiest@developpement-durable.gouv.fr

Vulnérabilité des itinéraires stratégiques à l'aléa sismique en région PACA

Priorisation des itinéraires de la région PACA vis-à-vis du risque sismique et capitalisation d'études déjà menées sur certains itinéraires et ouvrages

date : novembre 2016

auteur : Cerema Méditerranée

responsable de l'étude : Denis Davi, DCEDI/DOA

participants : Silvio Rousic, DCEDI/AGIL

Nicolas Joly, DCEDI/DOA (stagiaire 2^{ème} année ENTPE)

Jean-Luc Genois, DREAL PACA/SPR/URNM

Alan Kelbel, DREAL PACA/MSD

résumé de l'étude :

Dans le cadre de la déclinaison du Cadre national d'actions pour la prévention du risque sismique, dit « CAPRiS », en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA), le service Prévention des Risques de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) PACA a passé commande au Cerema Méditerranée, et plus particulièrement au PCI « Vulnérabilité des ouvrages de Génie Civil aux aléas sismiques et hydrauliques », d'une étude d'évaluation préliminaire de la sensibilité des itinéraires stratégiques du territoire régional à l'aléa sismique. Cette commande s'inscrit dans le cadre de la priorité n°4 du CAPRiS : « Amélioration de la connaissance de l'aléa, de la vulnérabilité et du risque sismique ».

Le présent rapport constitue la synthèse de l'étude qui a consisté d'une part à établir et à appliquer démarche méthodologique de hiérarchisation des itinéraires (ou tronçons d'itinéraires) de la région sur la base d'une analyse très simplifiée (« analyse macro grande maille ») croisant différents indices d'enjeux, d'exposition à l'aléa, et de vulnérabilité très sommaire ; d'autre part à présenter et capitaliser les résultats d'analyses de vulnérabilité plus approfondies déjà menées dans la région sur certains itinéraires ou ouvrages spécifiques. Il s'accompagne d'un certain nombre de fichiers numériques (tableurs et fichiers de données cartographiques) permettant de capitaliser et ré-exploiter les principales données et résultats de l'étude. L'ensemble de ces documents a vocation à alimenter le répertoire de l'Observatoire des Risques Majeurs (ORRM) en PACA.

zone géographique : Région PACA

nombre de pages : 87 (hors annexes)

référence : Pré-programmation locale Cerema 2016 - DREAL PACA - Cadre d'affaires Sigma C16MI0129

maître d'ouvrage : DREAL PACA/SPR/URNM (Mme Verrhiest)

SOMMAIRE

1 CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.....	8
2 DÉMARCHE GÉNÉRALE PROPOSÉE POUR LA PRISE EN COMPTE DU RISQUE SISMIQUE SUR LES RÉSEAUX D'ITINÉRAIRES EXISTANTS.....	10
2.1 Introduction / exposé de la problématique.....	10
2.2 Cadre législatif, références normatives et méthodologiques applicables aux infrastructures routières.....	12
2.2.1 Cadre législatif.....	12
2.2.1.1 Nouveau zonage et classement général des ouvrages et constructions en classes de risque et catégories d'importance.....	12
2.2.1.2 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 ».....	15
2.2.1.3 Autres documents officiels faisant référence à la problématique de la prise en compte du risque sismique sur les ponts existants. .	15
2.2.2 Références normatives.....	16
2.2.2.1 Normes de calcul : les Eurocodes et leurs annexes nationales.....	16
2.2.2.2 Normes produits.....	16
2.2.3 Références et outils méthodologiques.....	16
2.2.3.1 Méthodes Sismoa/Sismur/Sisroute.....	16
2.2.3.2 Guide « Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants » (à paraître).....	22
2.2.3.3 Autres références nationales.....	24
2.2.3.4 Approches développées à l'étranger.....	25
2.3 Logigramme général : une approche multi-échelles.....	25
2.4 Réflexion à l'échelle d'un territoire étendu : priorisation des itinéraires ou tronçons d'itinéraires routiers les uns par rapport aux autres.....	28
2.4.1 Exposé de la problématique et démarche générale proposée.....	28
2.4.2 Indices d'importance associés aux itinéraires.....	31
2.4.3 Indices d'aléas « régionaux ».....	33
2.4.4 Indices de vulnérabilité (très) sommaires.....	35
2.5 Réflexion à l'échelle locale : Priorisation des ouvrages le long d'un itinéraire donné.....	37
(Extrait du Guide méthodologique Cerema : « Diagnostic et renforcement sismique des ponts existants »).....	37
2.5.1 Critères d'importance associés aux ouvrages d'art et classification.....	37
2.5.2 Choix des ouvrages devant faire l'objet d'une analyse détaillée.....	43
2.6 Réflexion à l'échelle d'un ouvrage donné : objectifs de performance sismique et choix d'une solution de renforcement optimale.....	44
(Extrait du Guide méthodologique Cerema : « Diagnostic et renforcement sismique des ponts existants »).....	44
2.6.1 Problématique générale.....	44
2.6.2 États-limites et niveaux sismiques de référence.....	45
2.6.2.1 États-limites pour le diagnostic sismique des ponts.....	45
2.6.2.2 Niveaux d'accélération de référence.....	46

2.6.3 Bilan du diagnostic sismique : définition des indices de robustesse (ou vulnérabilité sismique calculée).....	48
2.6.4 Décision de renforcement et niveau de performance à atteindre.....	49
2.6.4.1 Décision de renforcement.....	49
2.6.4.2 Choix d'une solution de renforcement optimale.....	51
3 APPLICATION DE LA DÉMARCHE AUX ITINÉRAIRES DE LA RÉGION PACA (ÉCHELLE D'UN TERRITOIRE ÉTENDU « MULTI-GESTIONNAIRES »).....	55
3.1 Introduction de la démarche et définition du périmètre d'étude.....	55
3.2 Implémentation de la démarche.....	56
3.3 Principaux résultats et sorties graphiques associés aux différentes étapes de l'analyse.....	58
3.3.1 Évaluation des niveaux d'aléas.....	58
3.3.1.1 Localisation dans le zonage sismique national.....	58
3.3.1.2 Effets de site géologiques (ou classes de sol rencontrées).....	59
3.3.1.3 Effets de site topographiques (amplifications liées au relief).....	59
3.3.1.4 Effet induit relatif à la liquéfaction des sols.....	60
3.3.1.5 Effets induits relatifs aux instabilités de versants (chutes de blocs et glissements de terrains).....	61
3.3.1.6 Synthèse des niveaux d'aléa.....	62
3.3.2 Évaluation des vulnérabilités.....	63
3.3.3 Évaluation des enjeux.....	65
3.3.4 Évaluation des niveaux de risque.....	67
3.3.5 Évaluation des niveaux de priorités.....	69
3.4 Conclusions et principaux enseignements de l'étude.....	71
4 EXEMPLES D'ÉTUDES DÉJÀ MENÉES À DES ÉCHELLES PLUS PRÉCISES EN RÉGION PACA.....	72
4.1 Études menées sur des itinéraires ou tronçons d'itinéraires.....	72
4.1.1 Analyse de la vulnérabilité sismique des ouvrages courants du triangle autoroutier A7-A8-A54 (ASF).....	72
4.1.2 Évaluation du risque sismique l'itinéraire de la RD6202 entre Nice et Digne.....	73
4.1.3 Estimation et priorisation du diagnostic des vulnérabilités au séisme des Ouvrages d'Art du réseau ESCOTA.....	76
4.1.4 Évaluation de la vulnérabilité au séisme des ouvrages d'art existants du projet de rocade L2 à Marseille (DREAL PACA).....	80
4.2 Études menées sur des ouvrages « isolés ».....	81
4.2.1 Diagnostic et renforcement sismique du viaduc de Caronte à Martigues (A55).....	81
4.2.2 Diagnostic et projet de renforcement sismique du Centre Commercial du Merlan (L2 – Marseille).....	82
5 CONCLUSIONS.....	83
RÉFÉRENCES.....	85
LISTE DES ANNEXES.....	88
Annexe 1 : Exemple d'application de la méthode de hiérarchisation des ouvrages à des portions d'itinéraires autoroutiers (triangle A7-A8-A54 entre Cavailon, Aix-en-Provence et St-Martin-de-Crau).....	88

Annexe 2 : Évaluation du risque sismique sur l’itinéraire de la RD6202 entre Nice et Digne.....	88
Annexe 3 : Estimation et Priorisation du Diagnostic des Vulnérabilités au séisme des Ouvrages d’Art du réseau ESCOTA.....	88
Annexe 4 : Évaluation préliminaire de la vulnérabilité sismique des ouvrages de la L2 à Marseille.....	88
Annexe 5 : Fiches synthétiques d’études de cas et d’analyse de coûts d’investigations et/ou renforcements.....	88
- Annexe 5-1 : Sections autoroutières ASF – A7 / A8 / A54.....	88
- Annexe 5-2 : Sections autoroutières ESCOTA – A8 / A500.....	88
- Annexe 5-3 : Section autoroutière DIR Med - Viaduc de Caronte à Martigues (A55).....	88
- Annexe 5-4 : Déviation urbaine liaison L2 (Marseille – 13) – Dalle du Merlan.....	88
- Annexe 5-5 : Reconnaissances géotechniques en sites sismiques (Pont du Jaï et viaduc de Caronte).....	88
- Annexe 5-6 : Tableau récapitulatif.....	88

1 Contexte et objectifs de l'étude

Dans le prolongement du Plan séisme national 2005-2010, le Cadre d'actions pour la prévention du risque sismique, dit « CAPRiS », vise à poursuivre les actions de prévention du risque sismique sur le territoire national. Prévu sur une période de 5 ans (2013-2017), ce cadre, qui repose sur 4 grandes priorités d'actions, a notamment vocation à être décliné en programmes d'actions territorialisés à l'échelle régionale.

Dans le cadre de la déclinaison du CAPRiS en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA), l'Unité Risques Naturels Majeurs du Service Prévention des Risques (SPR/URNM) de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Provence-Alpes-Côte d'Azur (DREAL PACA) a passé commande au Cerema Méditerranée, et plus particulièrement au PCI « Vulnérabilité des ouvrages de Génie Civil aux aléas sismiques et hydrauliques », d'une étude d'évaluation préliminaire de la sensibilité des itinéraires stratégiques du territoire régional à l'aléa sismique. L'objectif de cette étude, qui s'inscrit dans le cadre de la priorité n°4 du CAPRiS : « Amélioration de la connaissance de l'aléa, de la vulnérabilité et du risque sismique », consiste à dresser un état des lieux de la connaissance en matière de vulnérabilité des itinéraires et des ouvrages d'art stratégiques.

Cette étude s'appuie très largement sur les démarches développées par le Cerema depuis plusieurs années pour la prise en compte du risque sismique sur le patrimoine OA existant [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18], qui consistent pour un volume très conséquent d'ouvrages à traiter, à procéder en plusieurs phases d'analyse successives, de niveau de raffinement croissant :

- La première phase (dite « analyse macro grande maille ») consiste, à l'échelle d'un parc d'ouvrages étendu, à prioriser les itinéraires (ou tronçons d'itinéraires) sur la base d'une analyse très simplifiée croisant différents indices d'enjeux, d'exposition à l'aléa, et de vulnérabilité très sommaire ;
- la deuxième phase (dite « analyse macro maille moyenne ») consiste, sur les itinéraires identifiés comme les plus sensibles lors de la phase précédente, à estimer la vulnérabilité sismique des ouvrages à l'aide de la méthode Sismoa spécifiquement développée par le Cerema pour ce type d'évaluation préliminaire à grande échelle ;
- enfin, la troisième phase consiste le cas échéant à établir un diagnostic sismique détaillé et à réaliser les éventuelles études de renforcement des ouvrages identifiés comme les plus stratégiques et sensibles lors des phases précédentes.

Le présent rapport d'étude constitue l'application de cette démarche aux itinéraires stratégiques de la région PACA, regroupant différents gestionnaires : réseau national Etat, routes départementales ou voies communales structurantes, réseau autoroutier concédé... Il présente successivement :

- **une description de la démarche générale proposée pour la prise en compte du risque sismique sur les réseaux d'itinéraires existants ;**
- **l'application de cette démarche aux itinéraires de la région PACA (échelle d'un territoire étendu « multi-gestionnaires ») ;**
- **la synthèse des analyses Sismoa déjà menées ou contrôlées par le Cerema Méditerranée dans la région (triangle autoroutier A7-A8-A54 délimité par les villes de**

Saint-Martin-de-Crau, Cavaillon, Aix-en-Provence et Rognac ; RD6202 Nice-Digne ; L2 Marseille ; réseau autoroutier géré par la société Escota) ainsi que certaines opérations ou études de renforcement menées sur certains ouvrages spécifiques (viaduc de l'autoroute A55 à Martigues sur la passe de Caronte ; dalle du centre commercial du Merlan sur la liaison L2 à Marseille).

Le présent rapport s'accompagne d'un certain nombre de fichiers numériques (tableurs et fichiers de données cartographiques) permettant de capitaliser et ré-exploiter les principales données et résultats de l'étude. L'ensemble de ces documents a vocation à alimenter le répertoire de l'Observatoire des Risques Majeurs (ORRM) en PACA.

Ces documents pourront par la suite être complétés au fur et à mesure des études spécifiques qui seront menées sur certains itinéraires ou ouvrages de la région en vue d'incrémenter la base de données.

2 Démarche générale proposée pour la prise en compte du risque sismique sur les réseaux d'itinéraires existants

2.1 Introduction / exposé de la problématique

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 rendue 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 [3], les normes européennes (NF EN 1998 dites Eurocode 8 [4] [5] [6] [7]) 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 [9]) 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 [2] (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 ce premier paragraphe consiste à présenter une réflexion globale relative à la prise en compte du risque sismique sur le patrimoine d'ouvrages d'art existant. Il traite successivement des aspects suivants :

- présentation du cadre législatif en vigueur et des référentiels normatifs et méthodologiques applicables aux infrastructures routières,
- réflexion à l'échelle d'un territoire étendu (national, inter-régional ou régional associant divers gestionnaires...) 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 donné,
- réflexion à l'échelle d'un ouvrage donné visant à définir des objectifs de renforcement sismique efficaces et réalistes et à proposer des solutions optimales pour les ouvrages jugés les plus sensibles.

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 [2]) 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 ce paragraphe introductif (§2.5 et §2.6) sont directement extraites du projet de guide « Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants » du Cerema [12] (en phase d'édition). Le §2.4 apporte en revanche des compléments de réflexion sur un aspect non traité dans ce guide et qui concerne la question de la hiérarchisation des itinéraires entre eux (approche « grande échelle » faisant l'objet d'une autre note spécifique [14]). Les extractions du guide précité ont pour objectif de conférer au présent rapport un caractère autoportant permettant d'appréhender de manière complète l'ensemble de la problématique.

2.2 Cadre législatif, références normatives et méthodologiques applicables aux infrastructures routières

2.2.1 Cadre législatif

Depuis 2010, la nouvelle législation sismique nationale est publiée [1] [2] [3], 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)...

2.2.1.1 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 [1] 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.

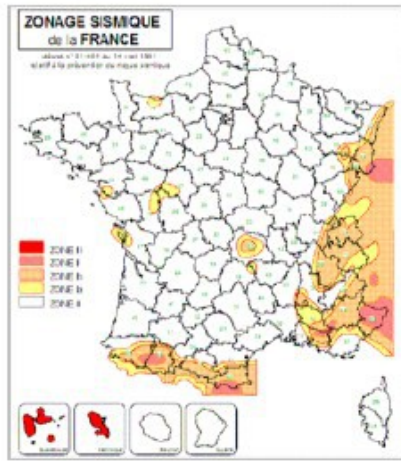
La classe dite "à risque spécial" comprend les bâtiments, les équipements et les installations pour lesquels les effets sur les personnes, les biens et l'environnement de dommages même mineurs résultant d'un séisme peuvent ne pas être circonscrits au voisinage immédiat des-dits bâtiments, équipements 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 (révisé janvier 2015) [2] portant délimitation des zones de sismicité du territoire français** divise le territoire national en cinq zones de sismicité croissante :

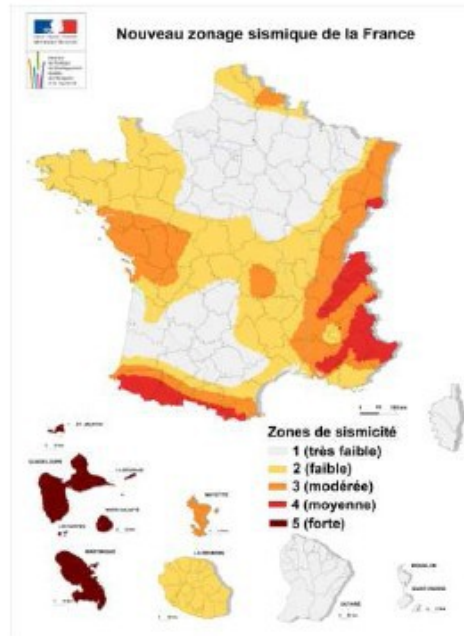
- Zone de sismicité 1 (très faible) ;
- Zone de sismicité 2 (faible) ;
- Zone de sismicité 3 (modérée) ;
- Zone de sismicité 4 (moyenne) ;
- Zone de sismicité 5 (forte).

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).



Ancien zonage sismique de la France selon les PS92



Nouveau zonage sismique de la France publié par décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010 [8]

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 dont l'arrêté « ponts » mentionné ci-dessous, pour les sites caractérisés par la présence de sols de mauvaise qualité au sens de l'Eurocode 8).

Anciennes				
Zones	Classes			
	A	B	C	D
0	X	X	X	X
Ia	X	1,0	1,5	2,0
Ib	X	1,5	2,0	2,5
II	X	2,5	3,0	3,5
III	X	3,5	4,0	4,5

Nouvelles				
Zones	Catégories			
	I	II	III	IV
1	X	X	X	X
2	X	0,7	0,84	0,98
3	X	1,1	1,32	1,54
4	X	1,6	1,92	2,24
5	X	3,0	3,6	4,2

Figure 3 : Évolution des accélérations de calcul au rocher

2.2.1.2 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 »

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 » [3] (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 », cet arrêté 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 [1]. Il impose l'application de l'Eurocode 8-2 [5] 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 (accélérations 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.

À 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.

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

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 (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. »

Certains Plans de Prévention des Risques Sismiques (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...

2.2.2 Références normatives

2.2.2.1 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. À 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 [4] (chapitres relatifs aux règles générales et actions sismiques), 2 [5] (Ponts), et 5 [7] (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...) dans la conception et le dimensionnement des ouvrages d'art.

A noter que l'Eurocode 8-3 « Évaluation et renforcement des bâtiments » [6] 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 spécifiques en fonction des matériaux constitutifs et de la technique de renforcement ;**
- **les objectifs et principes minimums de renforcement.**

2.2.2.2 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" [8] ; et dans une moindre mesure la 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 ».

2.2.3 Références et outils méthodologiques

2.2.3.1 Méthodes Sismoa/Sismur/Sisroute

En règle générale, l'évaluation quantitative de la vulnérabilité d'un ouvrage requiert une analyse structurale 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 [13] [15].

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.

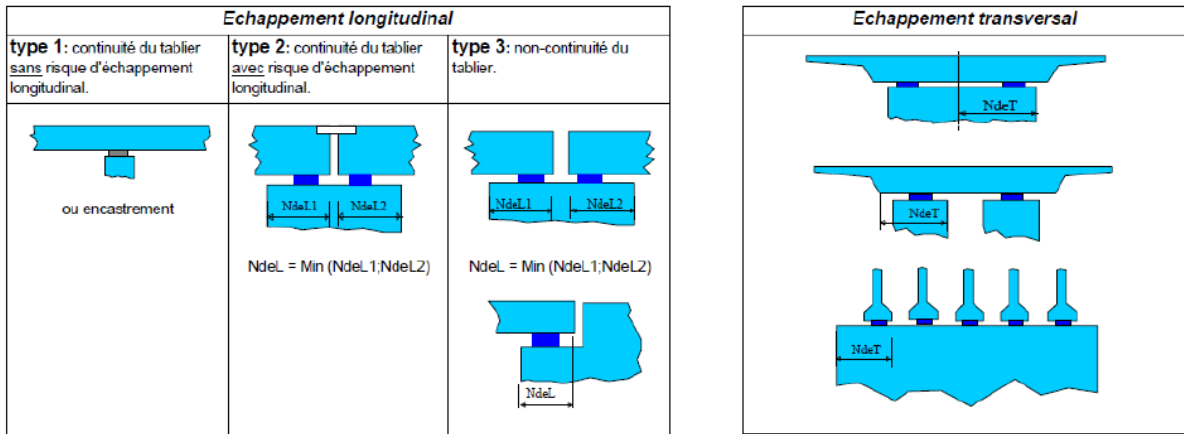
La méthodologie Sismoa est validée et téléchargeable sur le site Internet de la Direction technique infrastructures de transport et matériaux (DteciTM) du Cerema. Le présent paragraphe se contente d'en rappeler les principaux concepts.

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 structurale, présence de protections extérieures contre les 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).

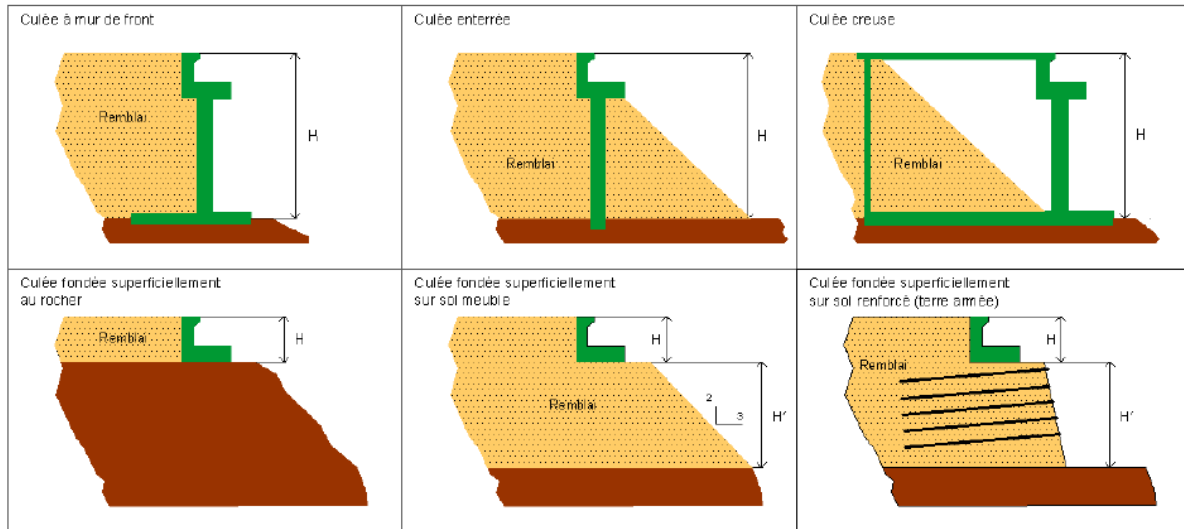
Le recensement et le traitement des données au niveau départemental s'appuient sur :

- Un traitement informatique à partir des bases de données existantes (Lagora par exemple pour les ouvrages de l'État) ;
- 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.

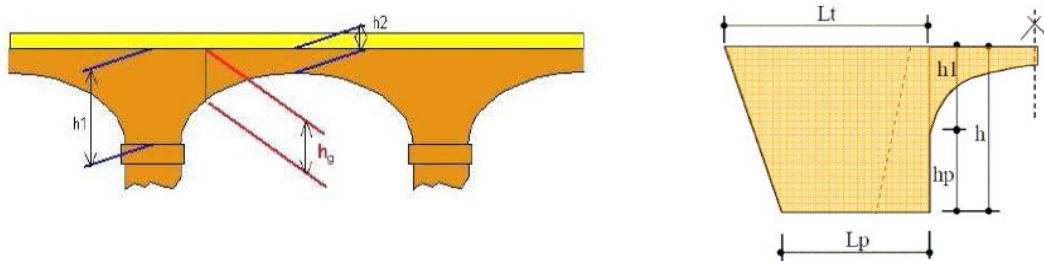
La méthode est basée sur l'analyse indépendante de la vulnérabilité des différents éléments structuraux qui composent l'ouvrage (piles, culées, tablier, fondations, voûte et tympans dans le cas d'un pont en maçonnerie... - cf. Figure 4) et l'identification pour chacun d'eux des typologies, éléments de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



Différentes configurations prises en comptes vis-à-vis du risque d'échappement du tablier



Différentes typologies de culées



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 structuraux 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 [17] et Sisroute [18].

L'outil Sismur, en cours de développement par le Cerema 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).

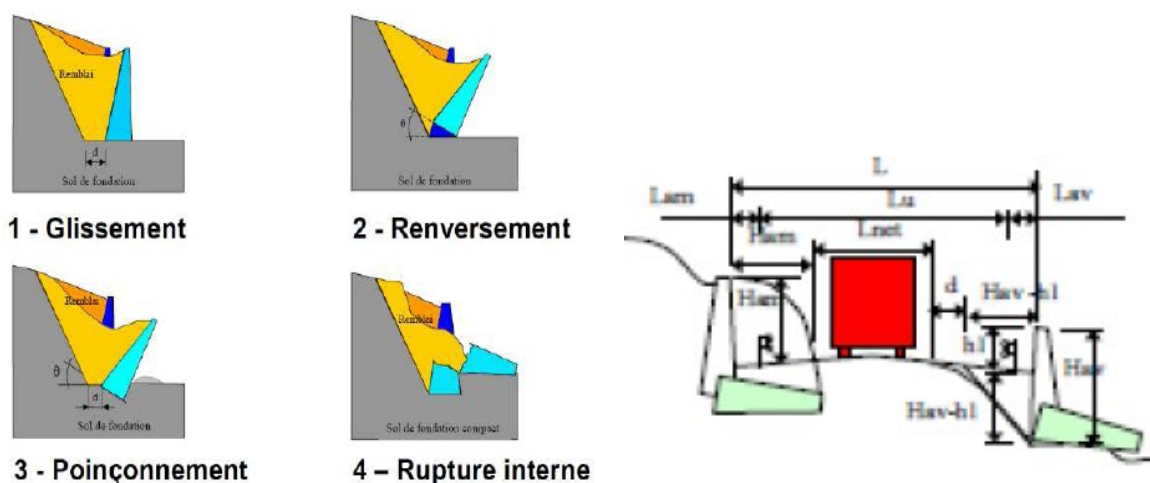


Figure 5 : Modes de rupture des murs de soutènement identifiés dans le cadre de la méthode Sismur et impact sur le niveau de service de la route

L'outil Sisroute, également en phase de développement par le Cerema Méditerranée, 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 (révisé janvier 2015) et qui associent des niveaux

d'accélération à des périodes de retour,

- études locales spécifiques d'aléa (microzonage),
- ou tout séisme, réel ou fictif, caractérisé par la position de son épicentre, 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).

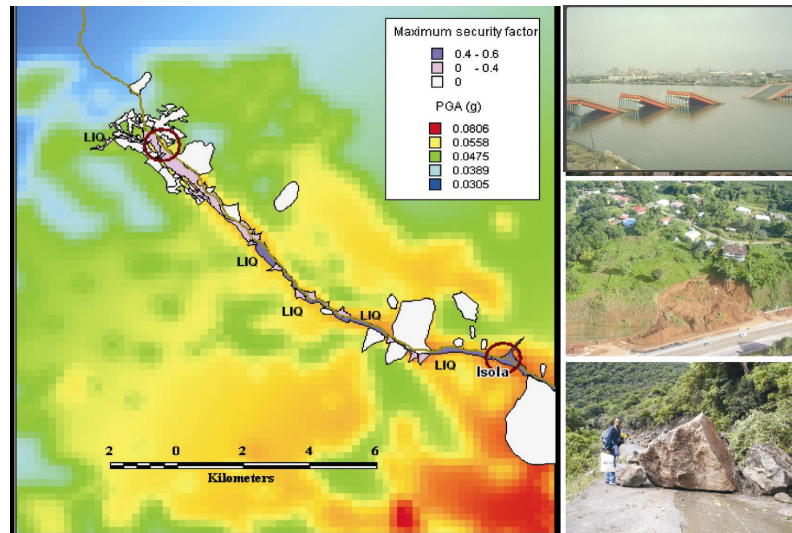


Figure 6 : Représentation de la propagation des accélérations dans Sisroute et prise en compte des effets de site et induits

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).

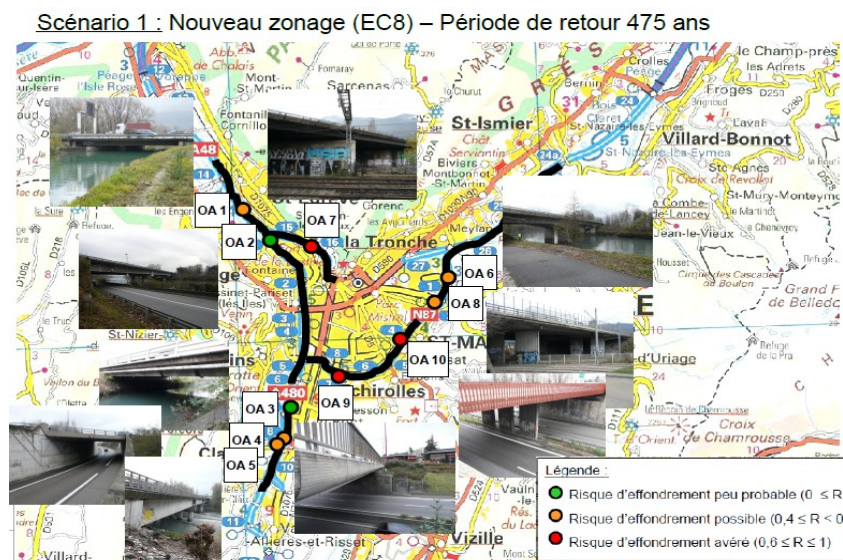


Figure 7 : Exemple d'application des méthodes Sismoa/Sisroute, pour l'évaluation préliminaire du risque sismique sur les principaux ouvrages du réseau routier national de desserte de l'agglomération Grenobloise dans le cadre de l'exercice de simulation de crise sismique « Richter 38 »

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 [19] (Figure 8). 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. **A noter la région touchée par ce séisme présente de nombreuses similitudes avec la région PACA, que ce soit en termes de niveau de séisme attendu, paysage et type d'urbanisation, culture constructive, typologie des ouvrages d'art, organisation sociétale ou encore identité culturelle... Le retour d'expérience de ce séisme est donc particulièrement riche d'enseignements dans le cadre de la présente étude.**

Le test a démontré graduation 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 conservatifs (moins de dommages observés que n'aurait pu le laisser craindre les résultats de l'analyse Sismoa). Ce caractère sécuritaire de la méthode est toutefois à analyser au regard de certaines spécificités très particulières 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 et une meilleure conception parasismique des ouvrages dans cette direction).



Pont 1 : Pont caisson béton Eclatement en pied de piles	Pont 3 : Pont caisson béton Aucun dommage	Pont 4 : Pont caisson béton Décalage transversal ?
V_{vertical} $V_{\text{horizontal}}$ V_{rotation} V_{vitesse} $V_{\text{vibration}}$ 0,75 0,70 0,05 1,00 0,75	V_{vertical} $V_{\text{horizontal}}$ V_{rotation} V_{vitesse} $V_{\text{vibration}}$ 0,70 1,00 0,75 0,35 0,70	V_{vertical} $V_{\text{horizontal}}$ V_{rotation} V_{vitesse} $V_{\text{vibration}}$ 0,60 1,00 0,19 0,30 0,60

Pont 2 : Pont béton Aucun dommage	Pont d'Onna : Pont à nervures Fissures de cisaillement sur piles Eclatement du béton sur piles Fissures sur le tablier Basculement culées	Pont d'Aquila centre : Pont à nervures béton Décalage transversal ? Chocs tablier/culées	SS80 km 55 Fissures tympans Chutes de blocs	SS80 km 40 SS17 pont 9 Aucun dommage	SS80 km 20 Fissures tympans et piédroits Chutes de blocs
V_{vertical} $V_{\text{horizontal}}$ V_{rotation} V_{vitesse} $V_{\text{vibration}}$ 0,40 0,10 0,19 0,35 0,14	V_{vertical} $V_{\text{horizontal}}$ V_{rotation} V_{vitesse} $V_{\text{vibration}}$ 0,55 1,00 0,01 0,60 0,55	V_{vertical} $V_{\text{horizontal}}$ V_{rotation} V_{vitesse} $V_{\text{vibration}}$ 0,55 1,00 0,19 1,00 0,55	V_{vertical} V_{rotation} $V_{\text{vibration}}$ 0,80 1,00 - 0,80	V_{vertical} V_{rotation} $V_{\text{vibration}}$ 0,85 0,37 - 0,31	V_{vertical} V_{rotation} $V_{\text{vibration}}$ V_{vitesse} 0,80 0,75 - 0,60

Figure 8 : Test de la méthode Sismoa suite au séisme de l'Aquila (Italie, avril 2009)

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

Dans la continuité des études Sismoa/Sisroute, un groupe de travail piloté à par le Sétra a travaillé depuis 2006 à l'édition d'un guide méthodologique intitulé « Diagnostic et renforcement sismique des ponts existants » [12] dont la publication par le Cerema est prévue fin 2016. 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) [21] [22] [23], au Japon (Légeron, 2001) [27], en Italie (PIARC C4.4, 2007) [24] [25] et surtout en Suisse (OFROU, 2005) [27] 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, qui sera édité prochainement par la Direction technique infrastructures de transport et matériaux (DteclTM) du Cerema, 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".

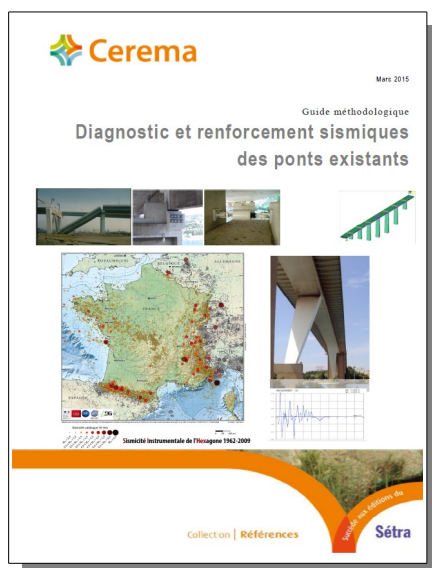


Figure 9 : Guide méthodologique Cerema (à paraître)
« Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants » [12]

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 §2.5 et 2.6 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 10) :

- 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.

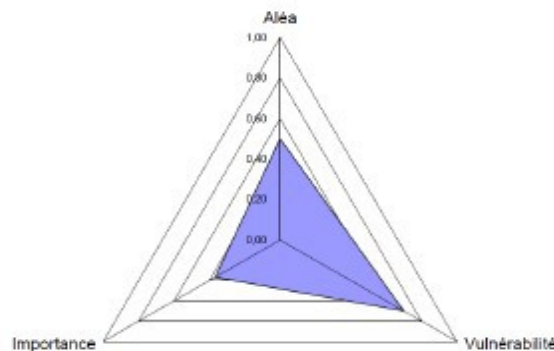


Figure 10 : Principe général de hiérarchisation des ouvrages en fonction des indices normalisés d'aléa, de vulnérabilité et d'importance

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. ».

2.2.3.3 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 notamment citer :

- Le guide Cerema « Ponts en zone sismique – Conception et dimensionnement selon l'Eurocode 8 » (sept. 2015) [9], qui traite exclusivement de la construction neuve ;
- Le cahier technique Cerema/AFPS « Recommandations sur l'emploi des dispositifs parasismiques pour les ponts » (mai 2014) [10] ;
- 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 [20] ;
- Le guide Sétra « Maîtrise des risques - Application aux ouvrages d'art » (2013) [11].

ainsi que certaines notes spécifiques rédigées par le Cerema qui permettent d'alimenter les réflexions sur cette thématique, tant sur l'évaluation du risque à l'échelle d'un patrimoine plus étendu [14] et dont s'inspirent directement les §2.3 et 2.4 ci-après, que sur l'évaluation des coûts de renforcement sismique [15].

2.2.3.4 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 Cerema « Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants » pour une description plus précise de ces différentes méthodes et de leur mise en œuvre opérationnelle.

2.3 Logigramme général : une approche multi-échelles

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 démarche proposée ici pour la prise en compte du risque sismique sur un patrimoine étendu d'ouvrages d'art existants, 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. À l'échelle globale d'une région ou d'un parc d'ouvrages étendu, 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. À l'échelle locale d'un itinéraire ou d'un tronçon d'itinéraire 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 les enjeux relatifs à la fois aux itinéraires portés et franchis ainsi que la valeur intrinsèque de la structure ou des conséquences locales de son effondrement ;
3. À l'échelle d'un ouvrage donné, 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.

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 11 ci-dessous récapitule les différentes étapes décrites ci-dessus.

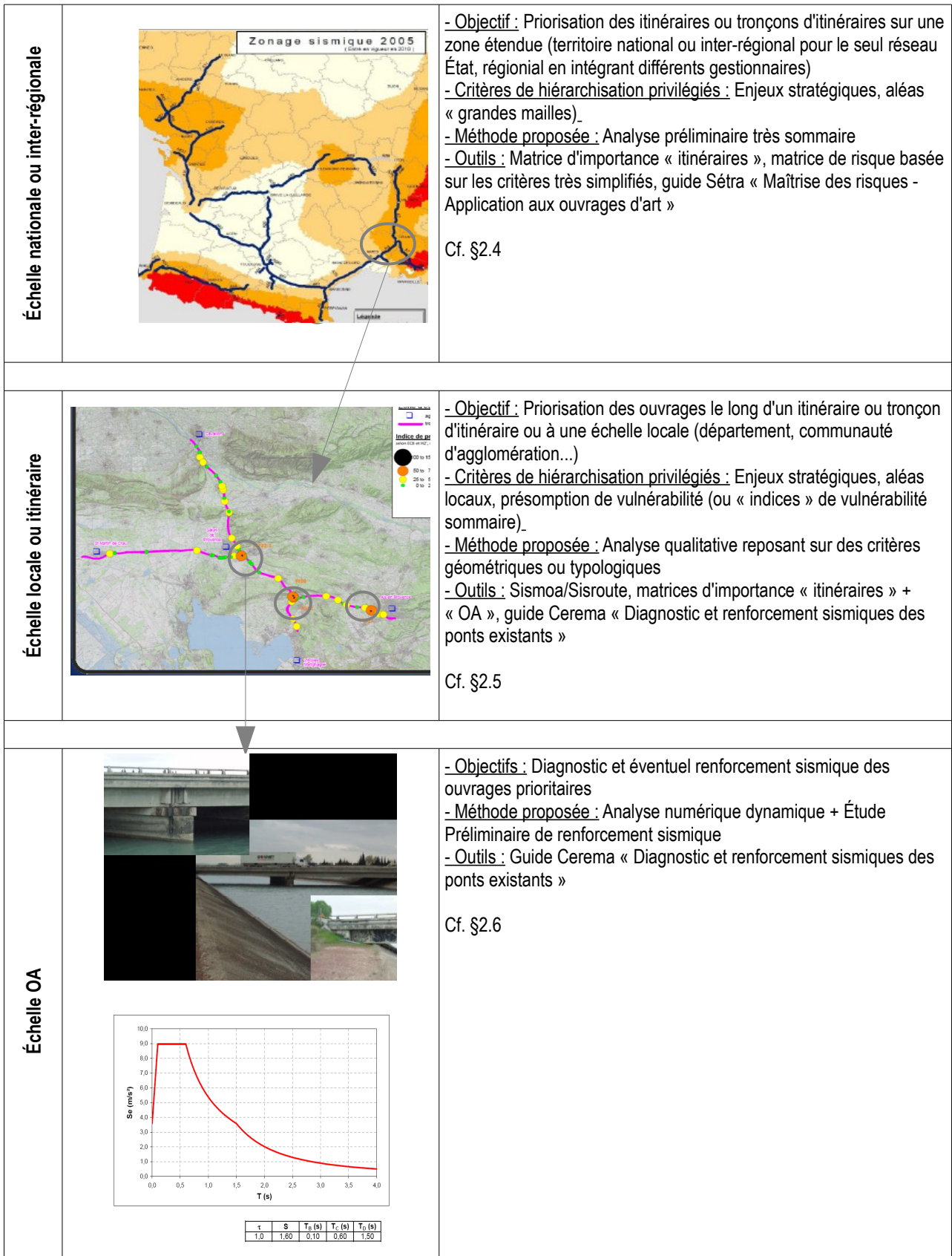


Figure 11 : Logigramme général

2.4 Réflexion à l'échelle d'un territoire étendu : priorisation des itinéraires ou tronçons d'itinéraires routiers les uns par rapport aux autres

2.4.1 Exposé de la problématique et démarche générale proposée

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 leurs 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 12),
- 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. §2.2.3.1).

Le même constat apparaît lorsque l'on s'intéresse 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, casernes de pompiers...), les potentielles redondances des réseaux (redistributions possibles) et permettant ainsi une analyse régionale plus complète.

À de telles échelles d'études, la définition et l'application d'un pré-filtre, plus « grossier » que Sismoa 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, apparaît donc indispensable.

Ces éléments de problématique font donc 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...

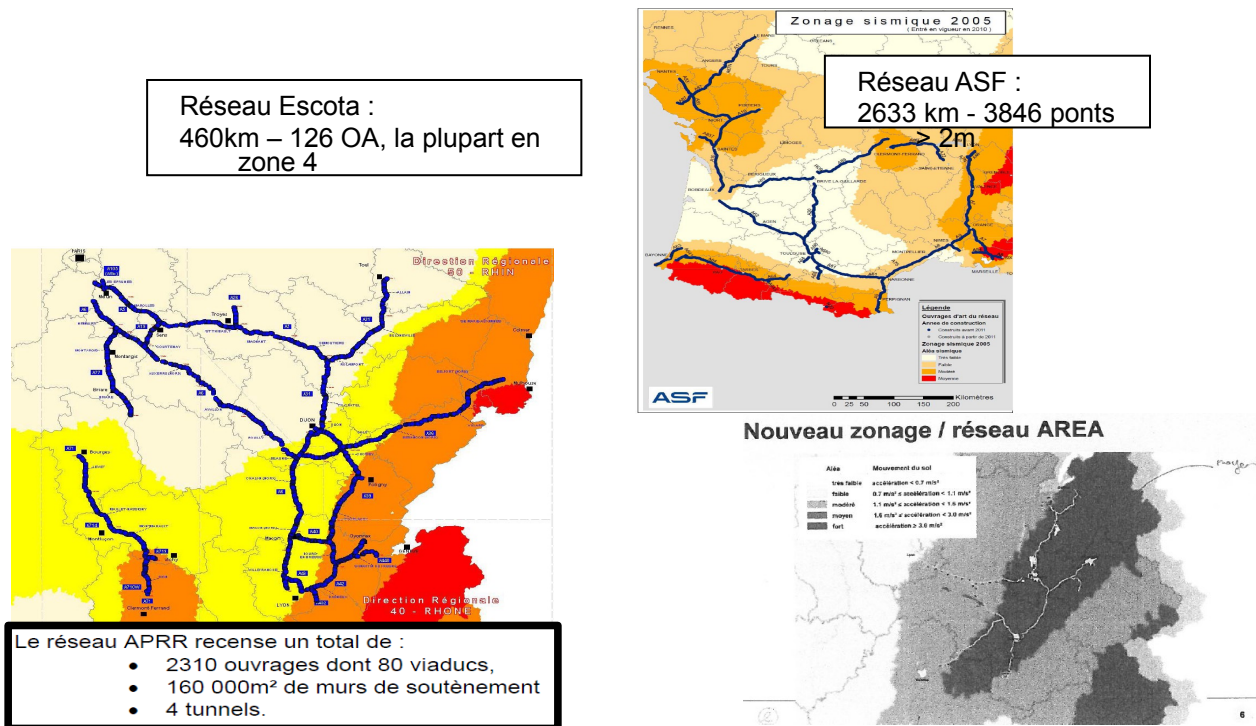


Figure 12 : Principaux réseaux de concessionnaires d'autoroutes exposés à l'aléa sismique (linéaire d'infrastructure et nombre d'ouvrages associés)

Il est ici proposé d'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 les autoroutes) et en distinguant éventuellement 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).

À 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 :

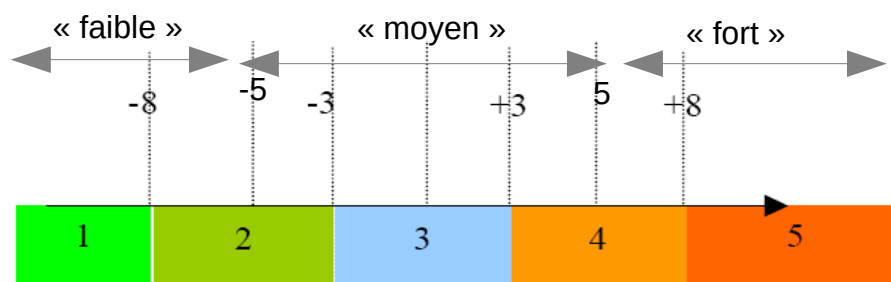


Figure 13 : Classement des critères en 5 catégories

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 14) 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 structural 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 3	P 3	P 3	P 3	P 2
A 2	R 1	R 1	R 2	R 3	R 3		R 2	P 3	P 3	P 3	P 2	P 2
A 3	R 1	R 2	R 3	R 4	R 4		R 3	P 3	P 3	P 2	P 2	P 1
A 4	R 2	R 3	R 4	R 5	R 5		R 4	P 3	P 3	P 2	P 1	P 1
A 5	R 3	R 4	R 5	R 5	R 5		R 5	P 3	P 2	P 2	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 P3 : indices décroissants de priorités

Figure 14 : 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 ou de l'autorité décisionnaire 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.**

2.4.2 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 Cerema « 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 15). 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 15 : 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 16 ci-après.

itinéraire porté	itin 1 (court terme)	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	itin 2 (long terme)	Rôle socio-économique				$I_{Soc_itin} = \dots$	
			Type voirie	VC : 0	RD : 0,5	RN : 1		Autoroute : 1,5
			Nb voies/sens	1 voie : 0,5		2 voie : 1		>= 3 voies : 1,5
Trafic (en véh/j)			<1000 : 0,5		1k<..<10k : 1	>10 000 : 1,5		
Trafic PL			faible : 0,5		normal : 1	élevé : 1,5		
Rôle de desserte			village 0	agglo, 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 16 : 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 structuraux. 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.

À 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 : $72 < I_{itin} \leq 90$

2.4.3 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 (révisé janvier 2015) et sur les valeurs des **accélérations 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, 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... Elle peut également résulter par exemple d'une étude de macrozonage.

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.

Nous proposons d'établir le classement en 5 catégories d'aléas à partir de l'échelle définie par la Figure 13 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 => + 0
 - oui => + 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 $a_{gr}.S.S_T = 1,1 \text{ m/s}^2$:
 - $0,7*1,5*1,0 = 1,05 \text{ m/s}^2 < 1,1 \text{ m/s}^2$ => - 8 + 2 + 0 = - 6 : aléa faible
 - $0,7*1,6*1,0 = 1,12 \text{ m/s}^2 \geq 1,1 \text{ m/s}^2$ => - 8 + 3 + 0 = - 5 : aléa moyen
 - $0,7*1,35*1,2 = 1,13 \text{ m/s}^2 \geq 1,1 \text{ m/s}^2$ => - 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 $a_{gr}.S.S_T = 3,0 \text{ m/s}^2$:

- $1,1 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 1,1 \text{m/s}^2 \geq 1,1 \text{m/s}^2 \quad \Rightarrow -5 + 0 + 0 = -5$: aléa moyen
- $1,1 \cdot 1,8 \cdot 1,2 = 2,38 \text{m/s}^2 < 3,0 \text{m/s}^2 \quad \Rightarrow -5 + 4 + 2 = +1$: aléa moyen
- $1,6 \cdot 1,8 \cdot 1,0 = 2,88 \text{m/s}^2 < 3,0 \text{m/s}^2 \quad \Rightarrow +1 + 4 + 0 = +5$: aléa moyen
- $1,6 \cdot 1,5 \cdot 1,2 = 2,88 \text{m/s}^2 < 3,0 \text{m/s}^2 \quad \Rightarrow +1 + 2 + 2 = +5$: aléa moyen
- $1,6 \cdot 1,5 \cdot 1,4 = 3,36 \text{m/s}^2 \geq 3,0 \text{m/s}^2 \quad \Rightarrow +1 + 2 + 4 = +7$: aléa fort
- $1,6 \cdot 1,6 \cdot 1,2 = 3,07 \text{m/s}^2 \geq 3,0 \text{m/s}^2 \quad \Rightarrow +1 + 3 + 2 = +6$: aléa fort

- Un pont situé en zone de sismicité forte est systématiquement en aléa fort même avec tous les autres critères au minimum :

$$3,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 3,0 \text{m/s}^2 \geq 3,0 \text{m/s}^2 \quad \Rightarrow +6 + 0 + 0 + 0 + 0 = 6$$
 : 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 associée à de 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)

2.4.4 Indices de vulnérabilité (très) sommaires

À l'échelle d'étude envisagée, 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 structural 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 13 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 peuvent ici être définis en distinguant chaque sens de circulation (cf. nota §2.4.1), 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 structural 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 ($-3 + 0 + 0 + 6 + 0 = +3 \Rightarrow \text{cat.} \geq 4$).

2.5 Réflexion à l'échelle locale : Priorisation des ouvrages le long d'un itinéraire donné

(Extrait du Guide méthodologique Cerema : « Diagnostic et renforcement sismique des ponts existants »)

La méthodologie générale définie dans le cadre des approches Sismoa/Sisroute et du guide Cerema : « Diagnostic et renforcement sismique des ponts existants » [12] permet de traiter la question de la prise en compte du risque sismique à l'échelle d'un itinéraire ou tronçon d'itinéraire identifié comme prioritaire (cf. chapitre précédent). Cette méthodologie est décrite succinctement ci-après.

2.5.1 Critères d'importance associés aux ouvrages d'art et classification

La Figure 17 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. §2.2.1.2) 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 §2.2.1.1, les notions et critères d'importance définis ici 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 17 : 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, etc.) 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 18 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 18 : 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 19 ci-dessous.

Ouvrage	I _{OA1} (court terme)	Victimes directes				I _{Vict_OA} =	
		Trafic sur l'ouvrage (en véh/j)	<1000 : 1	1k<.. <lt;10k 2<="" :="" td=""> <td>>10 000 : 4</td> </lt;10k>	>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<.. <lt;10k 2<="" :="" td=""> <td>>10 000 : 4</td> </lt;10k>	>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					
		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>(= I_{Vict_OA} + I_{Sec_OA} + I_{Rétab_OA})</i>							
Ouvrage	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<.. <lt;10k 0,5<="" :="" td=""> <td>>10 000 : 1</td> </lt;10k>		>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					
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>(= I_{Soc_OA} + I_{Rec_OA} + I_{Val_OA})</i>							

Figure 19 : 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 §2.4.2). 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 16 et Figure 19, 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 structuraux.

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 méthode décrite ici, il est proposé de se 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.

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.

2.5.2 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 d'aléa, de vulnérabilité et d'importance.

Dans le cadre du guide Cerema, il est proposé d'asseoir ce choix sur les niveaux de risque issus des approches Sismoa et Sisroute (cf. §2.2.3.1) 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 (révisé janvier 2015) : $R = \max (R_{\text{vib}}, R_{\text{liq}}, R_{\text{gliss}}, R_{\text{bloc}})$;
- 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 structurale.

Rappelons enfin que la méthode Sismoa [13] [16] 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 20) de quelques ouvrages représentatifs ou particulièrement sensibles de l'itinéraire étudié (calibrage local).**

Viaduc de Bourgoin – Modèle

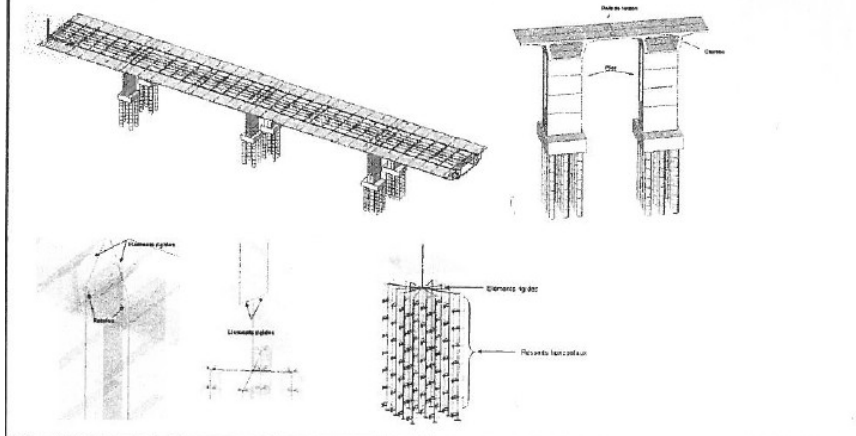


Figure 20 : Exemple de modèle détaillé pour le calibrage local des résultats Sismoa sur un ouvrage représentatif d'un itinéraire (AREA/Egis JMI – Vulnérabilité sismique des OA – juin 2012)

En général, l'approche proposée devrait généralement conduire 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.

2.6 Réflexion à l'échelle d'un ouvrage donné : objectifs de performance sismique et choix d'une solution de renforcement optimale

(Extrait du Guide méthodologique Cerema : « Diagnostic et renforcement sismique des ponts existants »)

2.6.1 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.

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.

2.6.2 États-limites et niveaux sismiques de référence

2.6.2.1 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. Il convient de noter que la définition qualitative des états-limites faite ici sur la base du texte de l'Eurocode 8-3, traduit en fait en terme de conséquences fonctionnelles différents états d'endommagement de la structure, eux-mêmes associés à des critères mécaniques traduisant l'atteinte de différents domaines de comportement des matériaux (élastique, modérément plastifié, fortement plastifié). En pratique, les trois états-limites LD, DS et QE sont associés à des niveaux de séismes croissants correspondant à des périodes de retour de plus en plus élevées. Ainsi l'état-limite de limitation des dommages (EL-LD), pour lequel les matériaux restent

globalement dans le domaine élastique de comportement, sera généralement visé pour un niveau de séisme relativement modeste (faible période de retour) ; tandis que l'état-limite de quasi-effondrement (EL-QE), dans lequel les matériaux sont sollicités jusqu'à leurs limites admissibles théoriques, correspondra à un niveau de séisme qualifié d'« extrême » et associé à une très grande période de retour.

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 structuraux 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.

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.

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.

2.6.2.2 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 §2.5.1 (matrices d'importance), il est recommandé dans le cadre de la démarche proposée 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.

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

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 démarche présentée et proposée ici, 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 (révisé janvier 2015), 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.

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

La vulnérabilité sismique d'une structure caractérise sa fragilité intrinsèque vis-à-vis des sollicitations induites par un tremblement de terre. Plusieurs approches permettent de quantifier cette vulnérabilité :

- Accélération maximale admissible par la structure (ou accélération au seuil de ruine ou d'intégrité structurale) ;
- 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)...

Il est proposé 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 $a_{\text{max adm-EL}}$ 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 :

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 structuraux, ainsi qu'à évaluer leurs conséquences en termes d'intégrité structurale, d'étendue de dommages, d'éventuels coûts de réparation, de niveau de service ou de sécurité des usagers.

2.6.4 Décision de renforcement et niveau de performance à atteindre

2.6.4.1 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 [26], 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 γ_{age} , 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 21 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 21 : 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 22 ci-dessous :

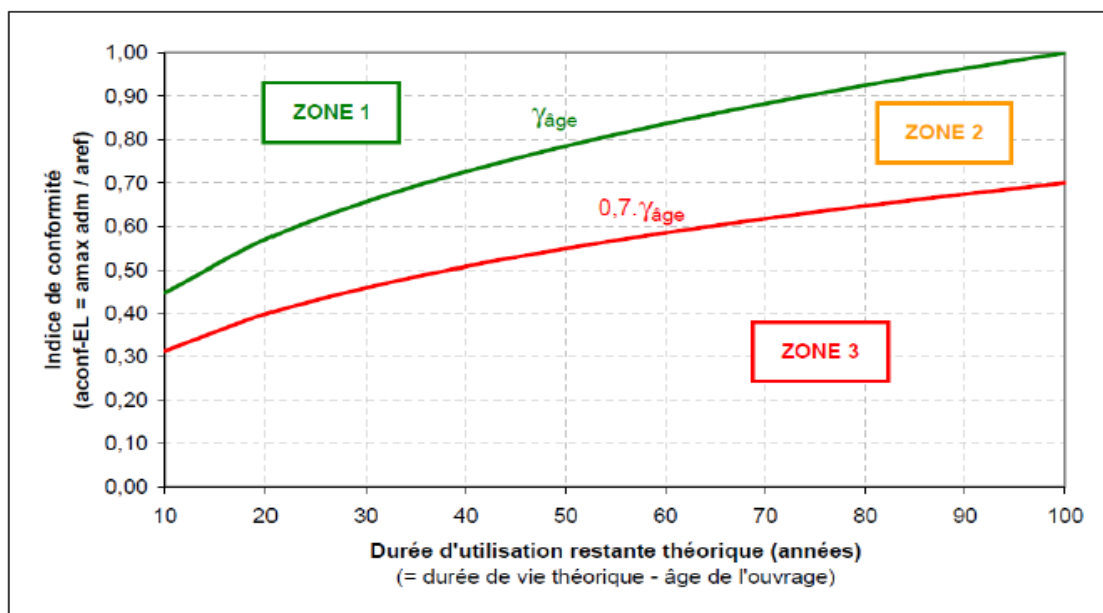


Figure 22 : Indices de conformité « cibles » préconisés

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. À 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 $\gamma_{\text{âge}}$, 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.

2.6.4.2 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.

Le choix de la technique et du niveau de renforcement optimums est alors à établir par l'étude sommaire de différentes solutions de renforcement envisageables (différentes stratégies et différents niveaux) au travers 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 23) peut ainsi être adopté :

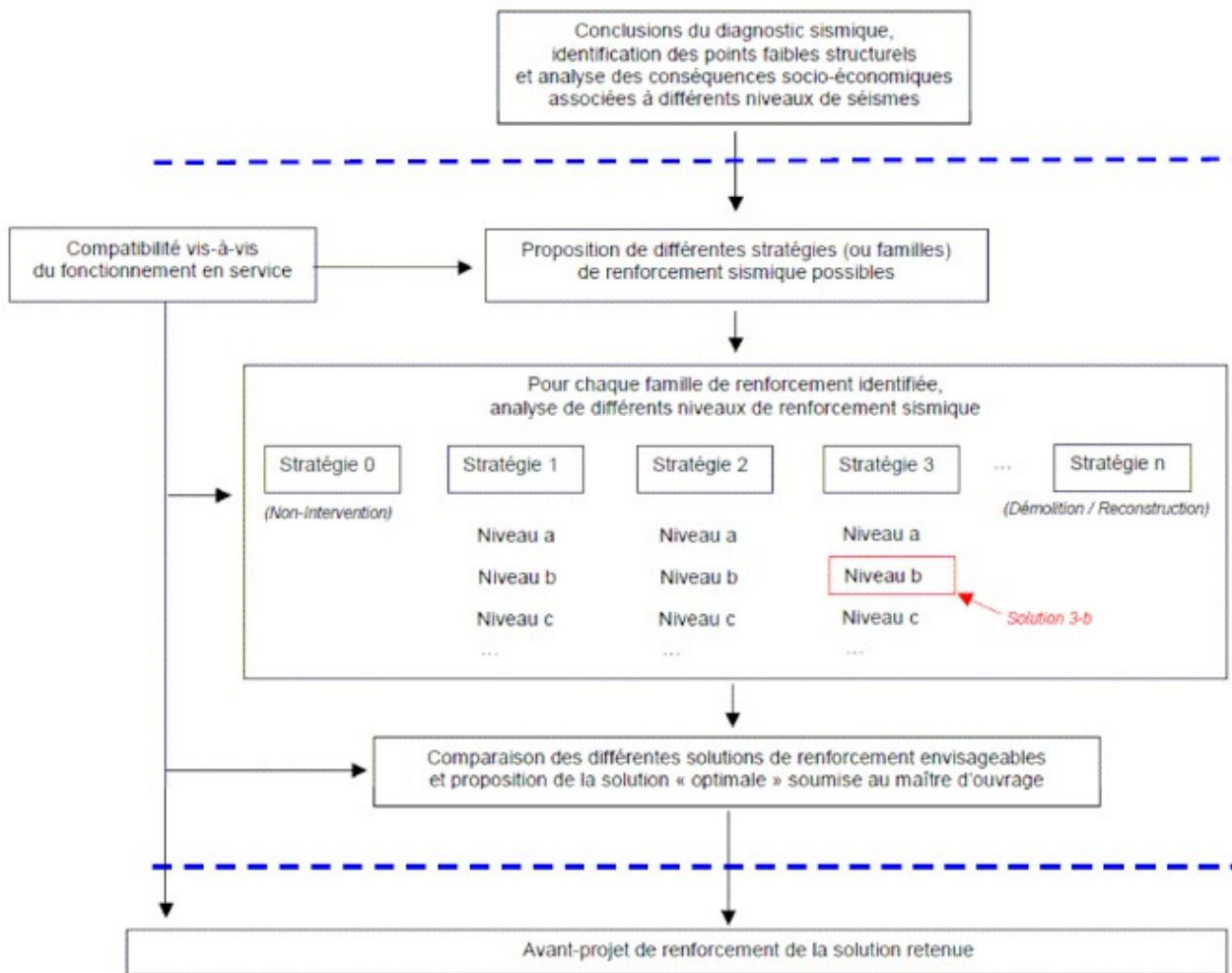


Figure 23 : Format général des « Études Préliminaires de Renforcement Sismique »

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 structurale 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 22) seront retenues. À 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 :

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

où :

- γ_{enjeu} est associé à la valeur socio-économique de l'ouvrage (cf. § 2.6.2.2) :
 - $\gamma_{\text{enjeu}} = 1,4$ 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. § 2.6.2.2)
- 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 21 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 24 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 $a_{max adm EL}$	...	...	...	...	...	...	...	...
Indice de conformité γ_{conf}	...	...	...	...	...	...	...	...	100%
Coût	0 € (sauf déclassement associé à un renforcement ou création d'une infra. Parallèle)	...	...	...	...	...	...	...	...
Faisabilité technique	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Niveau de confiance	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Compatibilité 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 24 : Exemple de tableau d'analyse multicritères pour la comparaison de solutions dans le cadre de l'étude préliminaire de renforcement sismique

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

3 Application de la démarche aux itinéraires de la région PACA (échelle d'un territoire étendu « multi-gestionnaires »)

3.1 Introduction de la démarche et définition du périmètre d'étude

La démarche de priorisation des itinéraires ou tronçons d'itinéraires routiers les uns par rapport aux autres à l'échelle d'un territoire étendu, telle que décrite au §2.4, est ici appliquée aux itinéraires de la région PACA.

Comme indiqué précédemment, cette phase d'analyse préalable (dite « analyse macro grande maille ») repose sur une approche très simplifiée croisant différents indices d'enjeu, d'exposition à l'aléa, et de vulnérabilité très sommaire. Cette vulnérabilité "très sommaire" est évaluée à l'échelle de l'itinéraire. Elle tient compte de critères « macros » tels que la date de construction des ouvrages, leur état de santé structural global, le nombre moyen d'ouvrages d'art par kilomètre, la proportion d'ouvrages non-courants, la proportion de passages inférieurs (hors cadres et portiques). Croisée avec des indices d'enjeu (matrice d'importance spécifiquement définie pour les itinéraires vis-à-vis du risque sismique) et avec des indices d'aléa (zonage réglementaire cumulé aux potentiels effets de site ou induits par zones ou tronçons), cette analyse permet de hiérarchiser les itinéraires entre eux.

Cette analyse ne pouvant être exhaustive sur tous les itinéraires de la Région (Autoroutes + réseau État + collectivités...), un premier filtre permettant de borner l'étude a donc été établi en partenariat avec l'Unité des Risques Naturels Majeurs (URNM) du Service de Prévention des Risques (SPR) de la DREAL PACA et en associant certains services en charge de la gestion de crise (sécurité civile, DDT, Préfectures...).

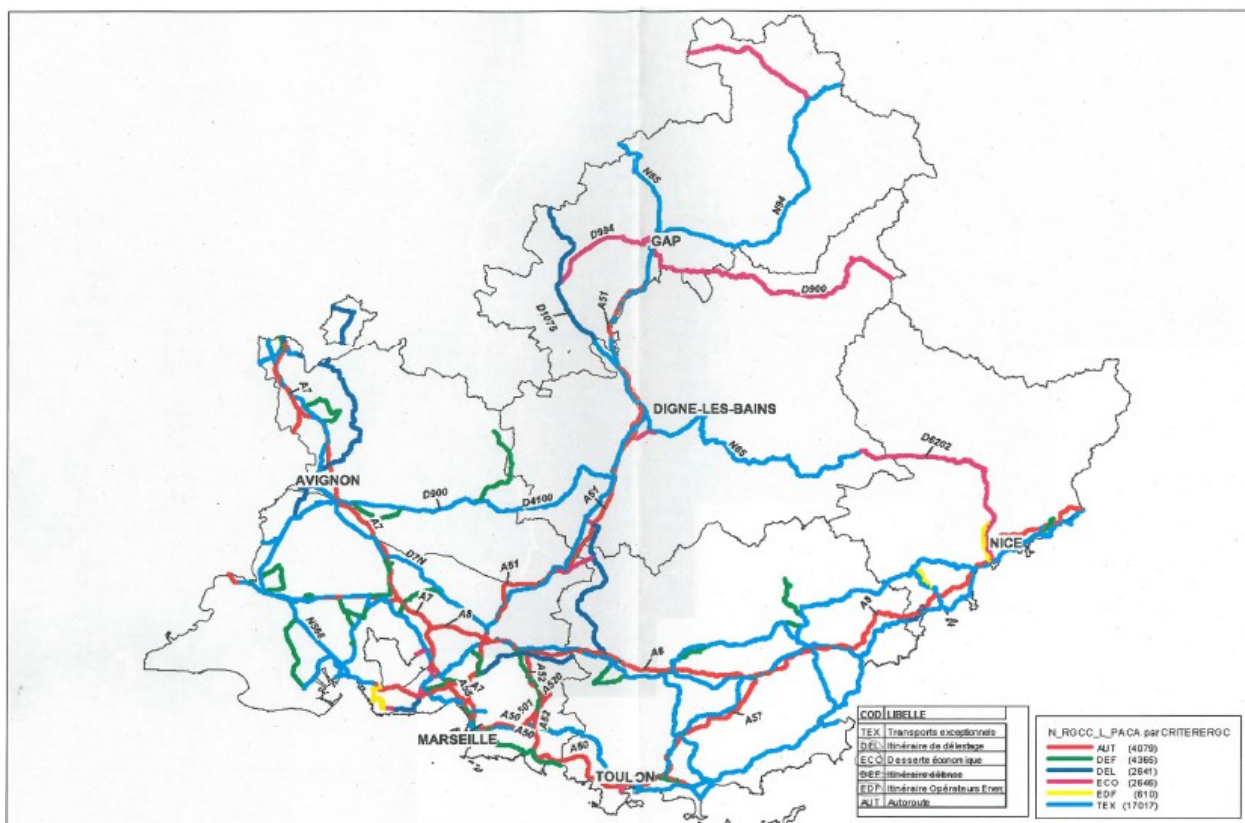


Figure 25 : Itinéraires structurants stratégiques de la région PACA retenus dans le cadre de l'étude

Ces itinéraires comprennent notamment :

- Les principaux axes autoroutiers structurants ;
- Les principales routes de desserte des zones reculées (RD6202, RN85, RN94...) ;
- Les itinéraires stratégiques référencés dans les bases de données routières régionales RGC à partir de certains critères d'exploitation (transports exceptionnels, itinéraires de délestage, dessertes économiques, itinéraires défense, itinéraires opérateurs d'énergie, autoroutes...) ;

ce qui représente un linéaire routier total de 3265,4 km, répartis de la manière suivante :

- Voiries communales : 3,64 %
- Routes départementales : 60,33 %
- Routes nationales : 12,02 %
- Autoroutes : 24,01 %

3.2 Implémentation de la démarche

L'implémentation de la démarche a consisté dans un premier temps à éditer une feuille de calcul entièrement paramétrée à partir du logiciel LibreOffice-Calc®.

Dans cette feuille de calcul, chaque tronçon d'itinéraire est représenté par une ligne. Des menus déroulants permettent par ailleurs de faciliter et d'automatiser la saisie pour chacun des critères associés au calcul respectif des niveaux d'aléas, de vulnérabilité et d'enjeu. Le croisement des différents indices intermédiaires permet in-fine l'évaluation des niveaux de risque et de priorité.

Dans cet outil, la matrice de croisement aléa-vulnérabilité (AxV) aboutissant à l'indice de risque (R) de même que la matrice de croisement risque-importance (RxI) aboutissant au niveau de priorité (P) sont également paramétrées, **permettant ainsi d'ajuster de manière dynamique et instantanée les résultats en fonction de certains critères de choix de l'utilisateur, portant notamment sur les poids respectifs accordés à chacun des indices A, V et I.**

Le format de cette feuille de saisie / analyse est par ailleurs conçu de manière à faciliter l'automatisation du transfert des données vers les outils de représentation cartographique SIG classiques. Dans le cas présent, l'outil de cartographie QGIS® a été utilisé.

Certains paramètres peuvent aussi être exportés directement de la carte vers la feuille de saisie (zonage sismique réglementaire, zones de relief marqué, distance entre un point donné d'un itinéraire et un équipement stratégique de santé ou de sécurité civile...). En pratique, quelques « allers-retours » entre la feuille de calcul et l'outil SIG sont donc nécessaires pour stabiliser les résultats d'analyse.

Dans le cas présent, le découpage automatique des tronçons de route à partir des différentes zones cartographiées a finalement abouti à la définition de 628 éléments, dont la longueur maximale atteint 37,5 km, pour une longueur moyenne de 5,2 km.

Itin	Gest.	PR début	PR fin	Dpt	Zone sismique	A_Totale	A	A (niveau)	V_Totale	V	V (niveau)	R	R (niveau)	I _{lin}	I	I (niveau)	P	P (niveau)
A7	DIR Med	280	280	13	2-Faible	-7	2	faible	4	4	moyen	3	modéré	57	4	moyenne	2	moyenne
A7	DIR Med	279	279	13	2-Faible	-7	2	faible	4	4	moyen	3	modéré	57	4	moyenne	2	moyenne
A7	DIR Med	275	278	13	2-Faible	-7	2	faible	7	4	fort	3	modéré	57	4	moyenne	2	moyenne
A7	DIR Med	274	274	13	2-Faible	-5	2	moyen	7	4	fort	3	modéré	57	4	moyenne	2	moyenne
A7	DIR Med	272	272	13	3-Moderée	-2	3	moyen	4	4	moyen	4	moyen	57	4	moyenne	1	élevée
A7	DIR Med	273	273	13	2-Faible	-5	2	moyen	4	4	moyen	3	modéré	57	4	moyenne	2	moyenne
A7	DIR Med	270	271	13	3-Moderée	-2	3	moyen	-8	1	faible	1	très faible	56	4	moyenne	3	faible
A7	DIR Med	267	268	13	3-Moderée	-4	2	moyen	4	4	moyen	3	modéré	56	4	moyenne	2	moyenne
A7	DIR Med	269	269	13	3-Moderée	-2	3	moyen	4	4	moyen	4	moyen	56	4	moyenne	1	élevée
A7	DIR Med	265	266	13	3-Moderée	-3	2	moyen	-8	1	faible	1	très faible	57	4	moyenne	3	faible
A7	DIR Med	261	264	13	3-Moderée	-3	2	moyen	4	4	moyen	3	modéré	56	4	moyenne	2	moyenne
A7	DIR Med	255	259	13	3-Moderée	3	4	moyen	4	4	moyen	5	fort	56	4	moyenne	1	élevée
A7	DIR Med	260	260	13	3-Moderée	-3	2	moyen	4	4	moyen	3	modéré	56	4	moyenne	2	moyenne
A7	DIR Med			13	3-Moderée	-3	2	moyen	4	4	moyen	3	modéré	56	4	moyenne	2	moyenne
A7	ASF	253	253	13	3-Moderée	2	3	moyen	10	5	fort	4	moyen	56,5	4	moyenne	1	élevée
A7	ASF	254	254	13	3-Moderée	-4	2	moyen	10	5	fort	3	modéré	56,5	4	moyenne	2	moyenne
A7	ASF	248	252	13	4-Moyenne	8	5	fort	10	5	fort	5	fort	56,5	4	moyenne	1	élevée
A7	ASF			13	4-Moyenne	8	5	fort	7	4	fort	5	fort	56,5	4	moyenne	1	élevée



11) Attribut Priorité + aéroports + hopitaux + zonage + fond plan

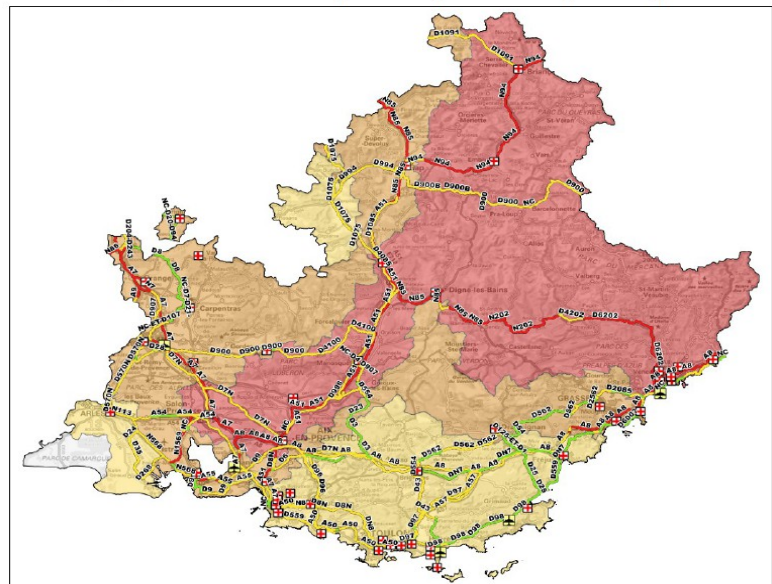


Figure 26 : Implémentation de la démarche par échanges de données réciproques entre la feuille de saisie/analyse automatisée et l'outil cartographique SIG

3.3.1.2 Effets de site géologiques (ou classes de sol rencontrées)

Par rapport au zonage réglementaire qui traduit le niveau d'accélération sismique attendu au niveau du substratum rocheux pour une période de retour donnée (de l'ordre de 475 ans), la prise en compte des effets de site géologiques (ou lithologiques) correspond aux amplifications locales de l'action sismique pouvant résulter de différentes natures et caractéristiques des sols de surface rencontrés sur les 20 à 50 premiers mètres.

Ce phénomène d'amplification, désormais bien identifié, est pris en compte au travers de la définition de 5 classes de sol (notées **A**, **B**, **C**, **D** et **E** du plus au moins défavorable) dans l'Eurocode 8 [4] et la nouvelle réglementation sismique nationale [3].

Dans le cas de la présente étude, les zones de la région PACA correspondant à ces différentes classes de sol sont directement cartographiées à partir de l'étude de macrozonage (échelle 1/50000 – 1/100000) produite par le service Risque Sismique du laboratoire de Nice du Cerema Méditerranée pour le compte de la DREAL PACA [28].

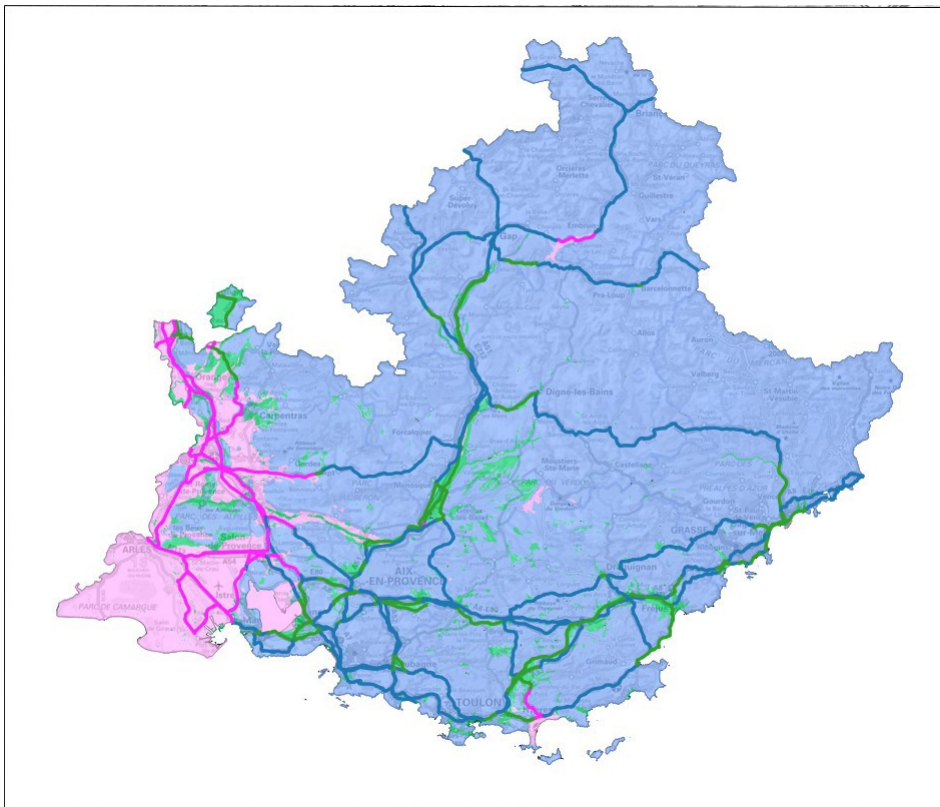


Figure 28 : Cartographie des effets de site géologiques à partir de l'étude de macrozonage produite par le laboratoire de Nice du Cerema Méditerranée [28]

3.3.1.3 Effets de site topographiques (amplifications liées au relief)

Comme les couches de sol de surface, les zones de relief plus ou moins accentuées sont susceptibles d'engendrer des amplifications locales de l'action sismique. Ce phénomène, communément appelé effet de site topographique, est ici intégré de manière relativement sommaire directement à partir des fonds de cartes topographiques disponibles pour la Région PACA (cf. figure ci-dessous).

Il en résulte que sur les 3265,4 km de route étudiés, 46,66 % sont considérés localisés dans des zones de relief défavorables et 6,18 % dans des zones de relief très défavorables.

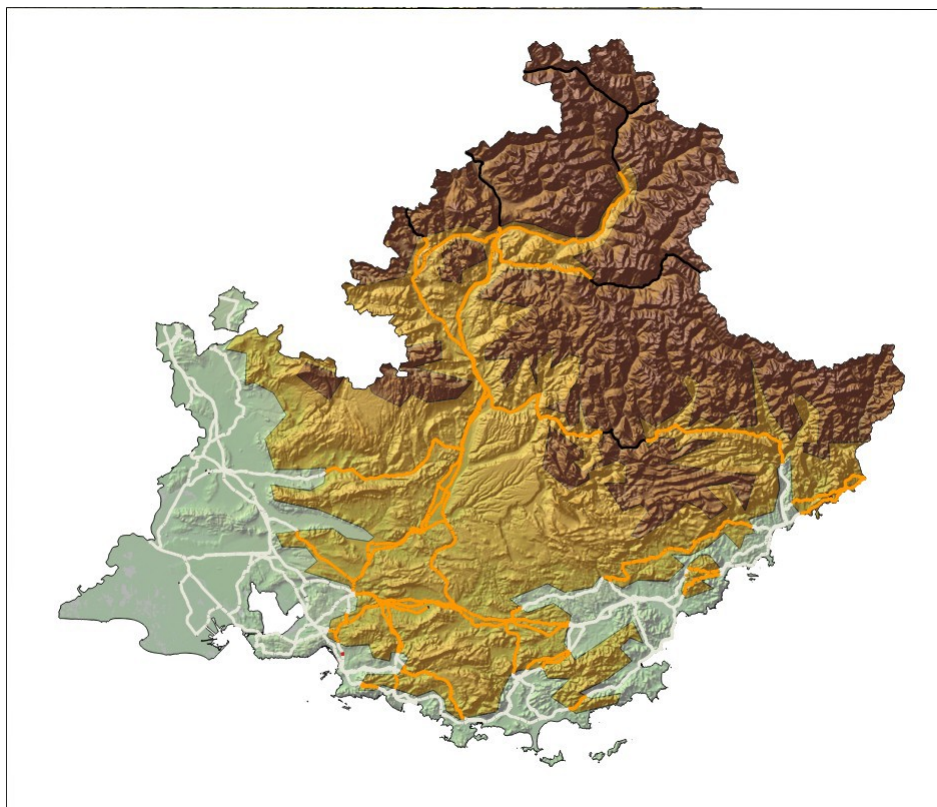


Figure 29 : Cartographie des effets de site topographiques le long des itinéraires d'étude

3.3.1.4 Effet induit relatif à la liquéfaction des sols

Dans le cadre de la présente étude, les zones de la région PACA potentiellement exposées à l'aléa liquéfaction des sols ont été définies à dire d'expert par l'équipe de recherche en dynamique et rhéologie des sol du laboratoire d'Aix-en-Provence du Cerema Méditerranée, particulièrement experte de ce phénomène et disposant par ailleurs d'une très bonne expérience opérationnelle du contexte régional.

Ces zones, représentées en bleu sur la carte ci-dessous, correspondent aux vallées des principaux cours d'eau présent dans la région, en particulier la basse vallée du Rhône et plus généralement la région Camargue, les embouchures du Var et de l'Argens, la vallée de la Durance, ainsi que le pourtour de l'étang de Berre...

Sur les 3265,4 km de route étudiés, 31,28 % sont estimés exposés à ce phénomène potentiellement induit. **A noter toutefois que conformément à la réglementation nationale [3], ce phénomène n'est pris en compte dans le post-traitement que pour les ouvrages ou tronçon d'itinéraires localisés en zone de sismicité 3 (dite « modérée ») ou plus.**

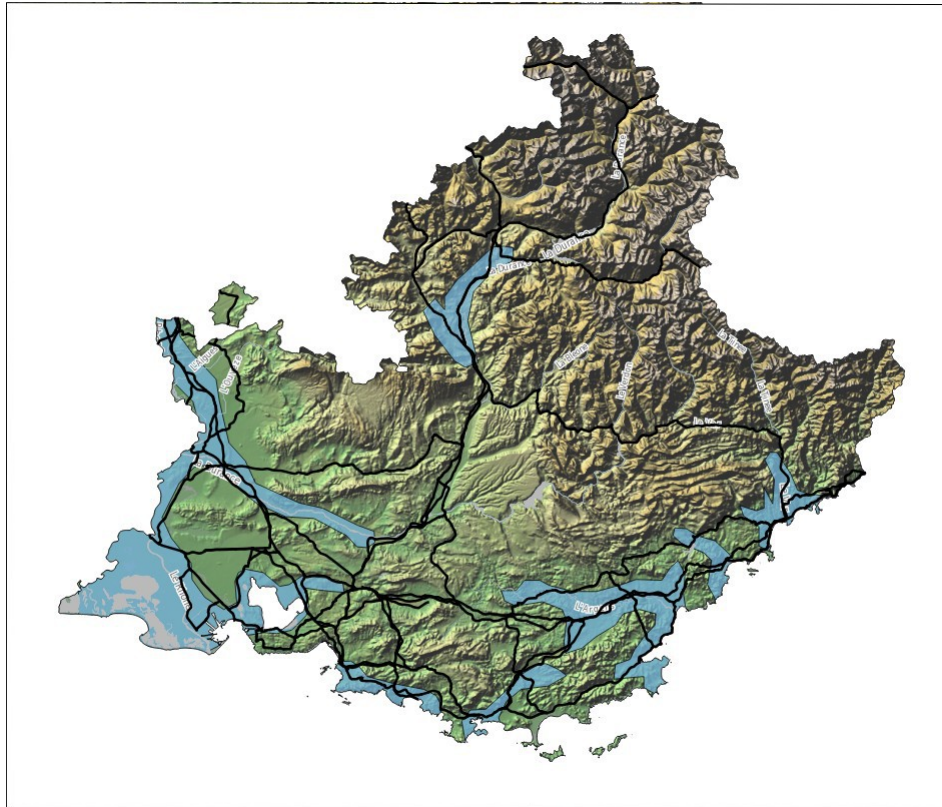


Figure 30 : Cartographie de l'effet induit potentiel relatif à la liquéfaction des sols

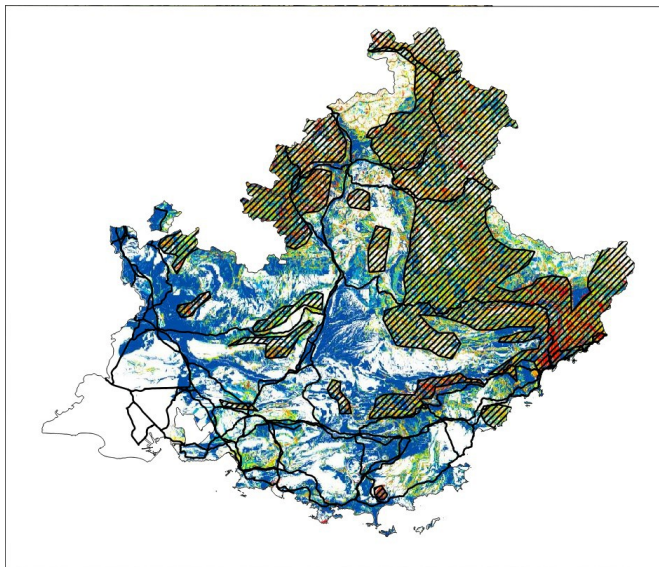
3.3.1.5 Effets induits relatifs aux instabilités de versants (chutes de blocs et glissements de terrains)

Outre la liquéfaction des sols, les vibrations sismiques provoquées par les tremblements de terres sont susceptibles d'induire des instabilités de versant, de type chutes de blocs rocheux ou glissements de terrain.

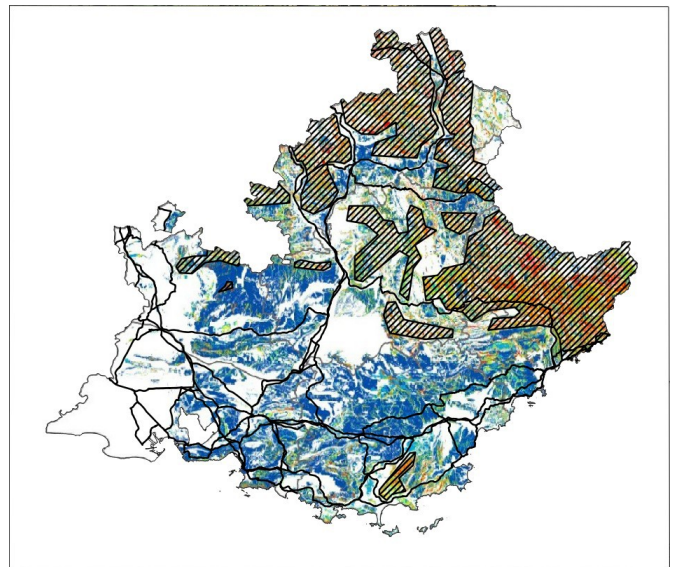
En pratique, il a toutefois été observé ce phénomène impactait essentiellement les zones déjà reconnues instable sous charges gravitaires, le séisme n'ayant ainsi qu'un effet « catalyseur », même si l'étendue et l'intensité des phénomènes se trouvent naturellement accentuées [19].

Dans le cadre de la présente étude, la définition des zones potentiellement exposées aux effets induits relatifs aux instabilités de versant repose sur le projet de recherche RYTHMME piloté par le laboratoire d'Aix-en-Provence du Cerema Méditerranée [29] [30]. Ce projet repose sur une exploitation statistique des événements observés en région PACA depuis 1900.

Sur les 3265,4 km de route étudiés, 17,49 % sont estimés exposés à ces phénomènes potentiellement induits.



Cartographie des glissements de terrain observés en région PACA depuis 1900



Cartographie des chutes de blocs observées en région PACA depuis 1900

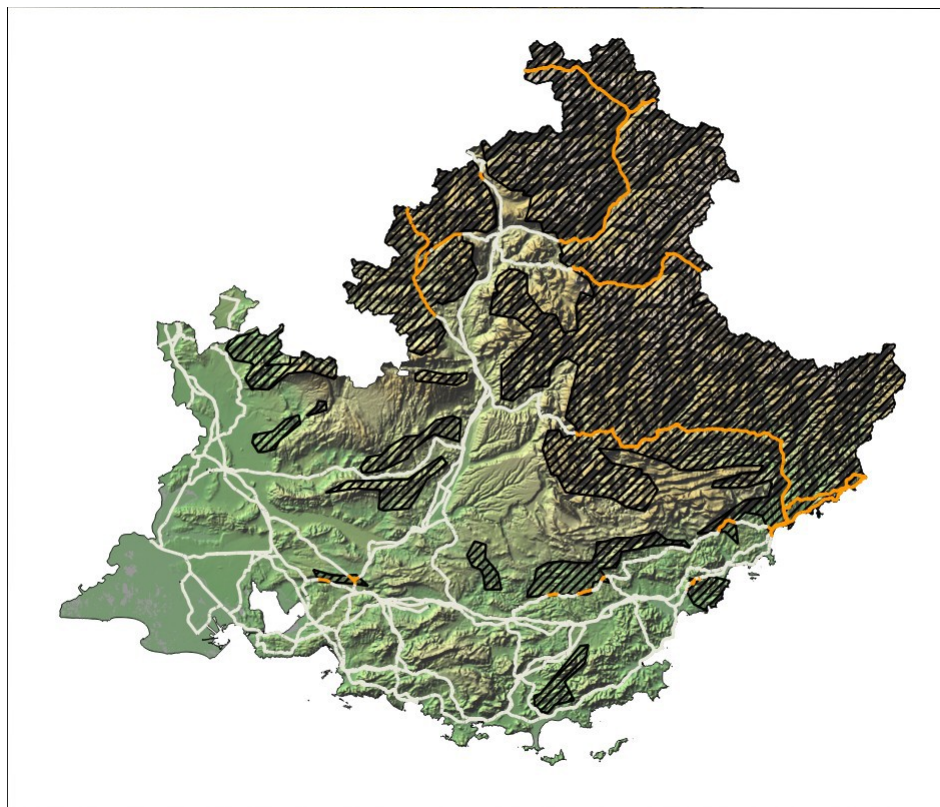


Figure 31 : Cartographie des effets induits potentiels relatif aux instabilités de versants (glissements de terrain et chutes de blocs) à partir des études menées dans le cadre du projet RYTHMME [29] [30]

3.3.1.6 Synthèse des niveaux d'aléa

L'ensemble des aléas, directs ou induits, présentés ci-dessus peuvent être synthétisés sur une même carte (cf. figure ci-dessous).

Le cumul des différents indices d'aléas conformément à la démarche décrite au §2.4.3 conduit in fine à la répartition suivante en terme de linéaire d'itinéraires :

- Niveau d'aléa considéré comme **très faible** : 10,97 %
- Niveau d'aléa considéré comme **faible** : 31,34 %
- Niveau d'aléa considéré comme **modérée** : 15,94 %
- Niveau d'aléa considéré comme **moyen** : 26,40 %
- Niveau d'aléa considéré comme **fort** : 15,36 %

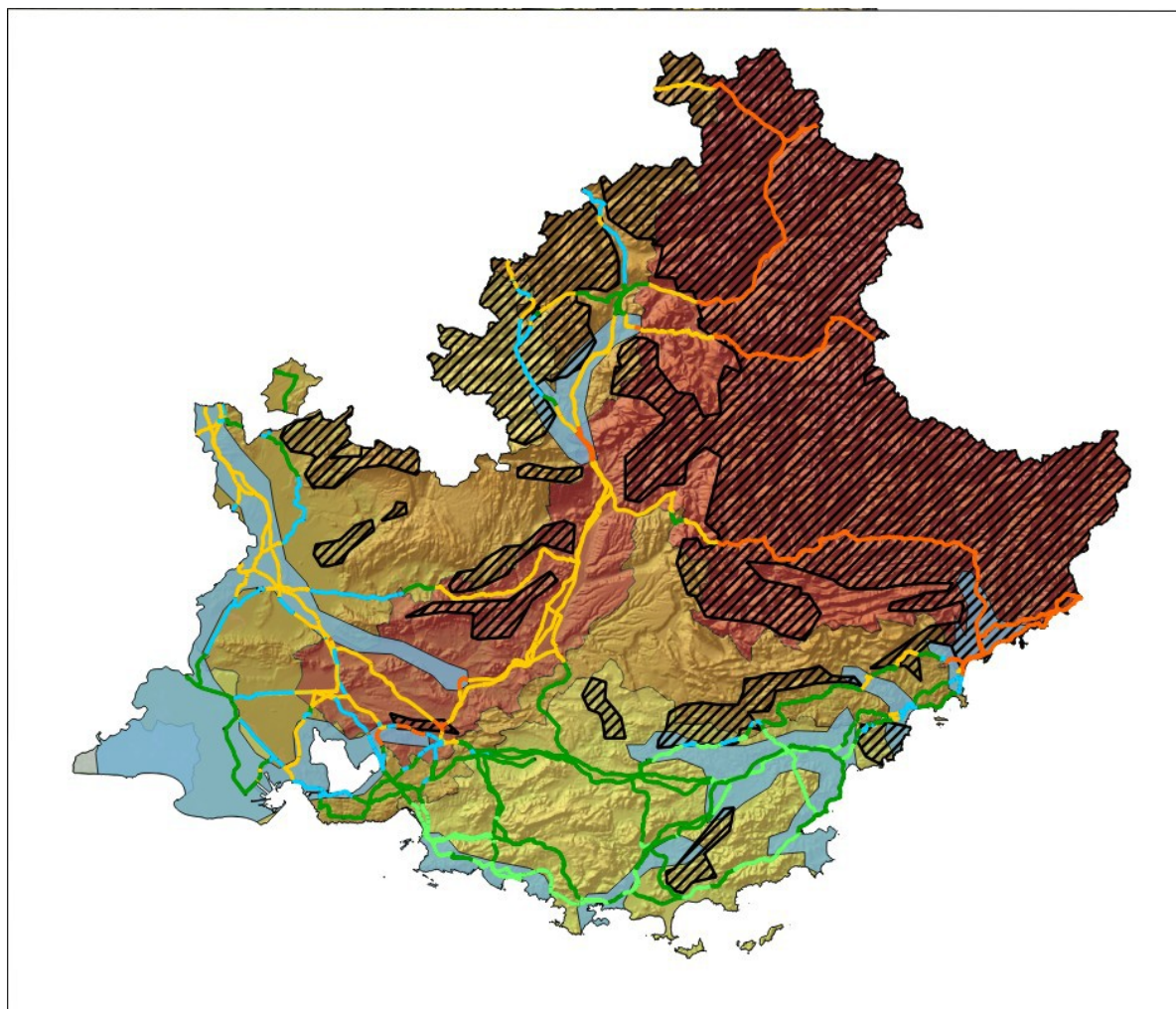


Figure 32 : Cartographie des niveaux d'aléa (synthèse)

3.3.2 Évaluation des vulnérabilités

Conformément à la démarche décrite au §2.4.4, les niveaux de vulnérabilité associés à chaque tronçon d'itinéraire sont ici évalués de manière très sommaire, essentiellement en fonction du nombre d'ouvrages, de la norme de calcul parasismique utilisée pour leur conception le cas échéant et de leur état pathologique, de la répartition entre ouvrages courants et ouvrages non-courants et du nombre de passages inférieurs.

La plupart de ces critères ont pu être renseignés directement à partir des données routières

régionales RGC ou des bases de données exploitées au sein du département Conception et Exploitation Durables des Infrastructures du Cerema Méditerranée.

Faute de données suffisamment détaillées, l'état pathologique de la très grande majorité des tronçons a été considéré par défaut comme moyen, à l'exception des **tronçons les plus récents des autoroutes A51 et A54**, qui correspondent par ailleurs aux tronçons ayant bénéficié de l'application de règles parasismiques récentes (PS92), soit 2,34 % du linéaire total, contre 18,21 % conçus aux PS69 et 79,44 % n'ayant fait l'objet d'aucun dimensionnement parasismique spécifique.

Le cumul des différents indices de vulnérabilité conduit in fine à la répartition suivante en terme de linéaire d'itinéraires :

- Niveau de vulnérabilité considéré comme **très faible** : 1,05 %
- Niveau de vulnérabilité considéré comme **faible** : 4,85 %
- Niveau de vulnérabilité considéré comme **modéré** : 0,96 %
- Niveau de vulnérabilité considéré comme **moyen** : 28,05 %
- Niveau de vulnérabilité considéré comme **fort** : 65,09 %

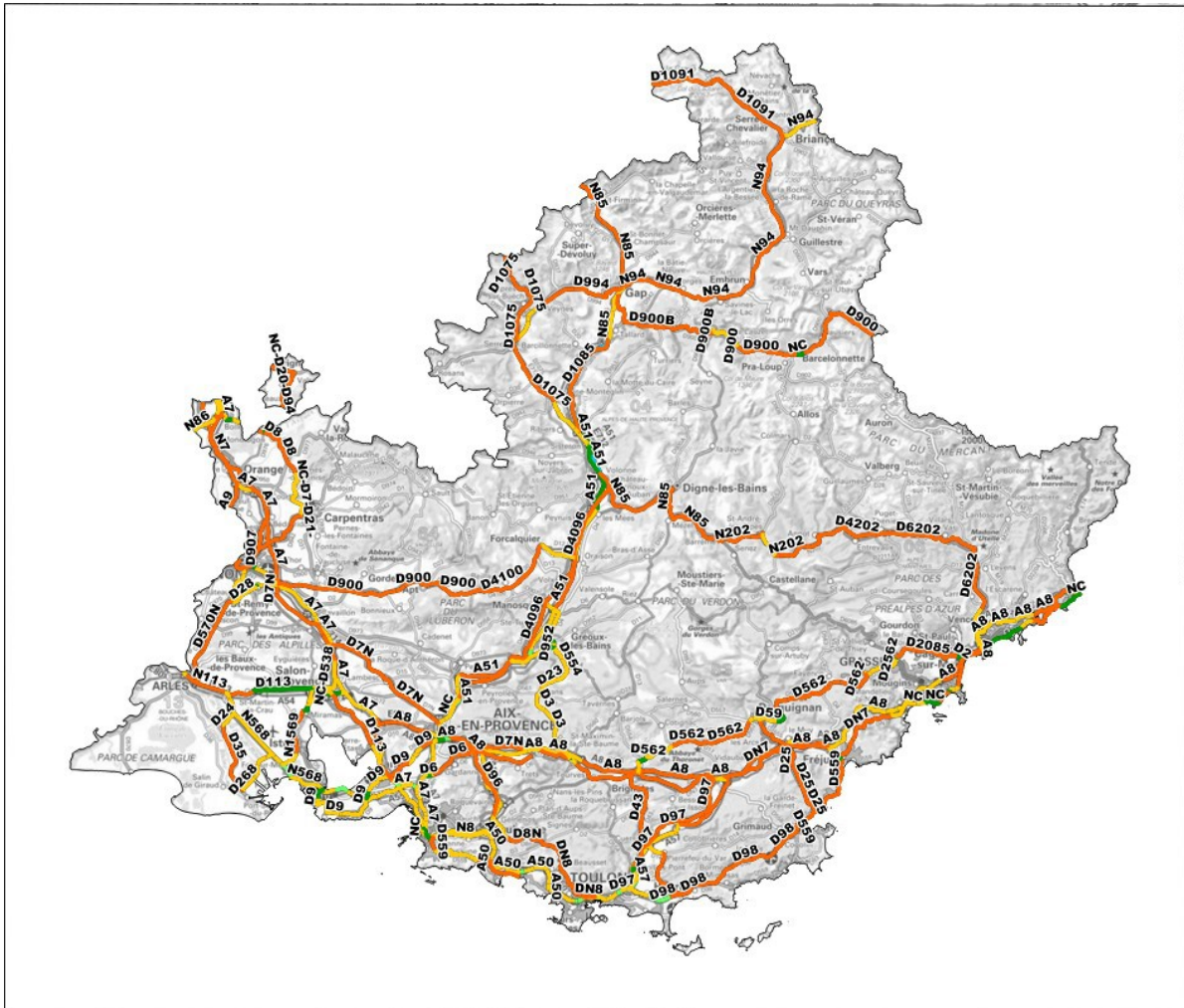


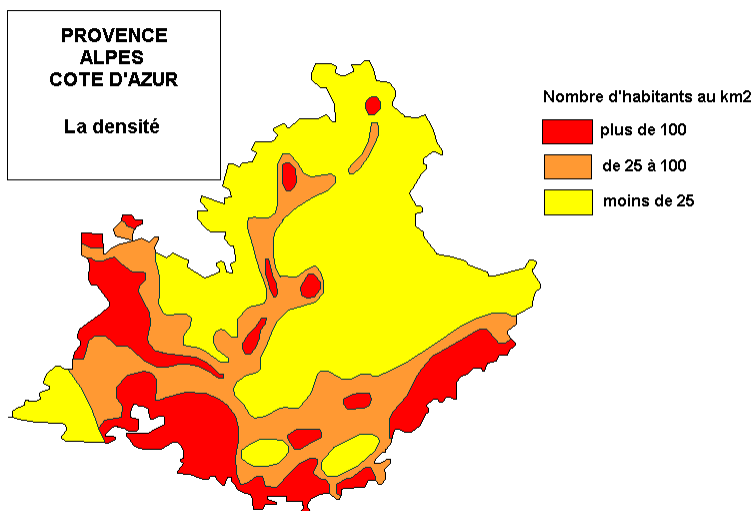
Figure 33 : Cartographie des niveaux de vulnérabilité

3.3.3 Évaluation des enjeux

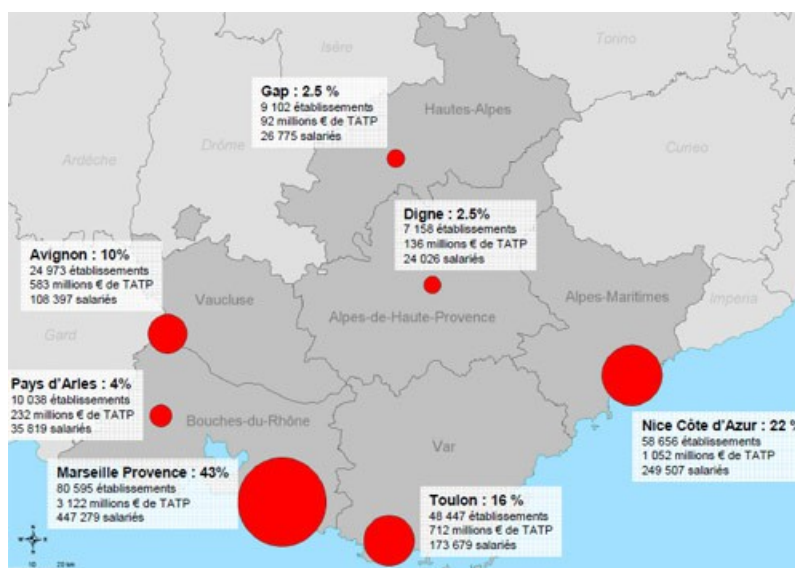
Les niveaux d'enjeu associés à chaque d'itinéraire conformément à la démarche décrite au §2.4.2 à partir de la matrice développée spécifiquement à cette fin.

Certains critères de cette matrice ont pu être renseignés directement à partir des données routières régionales RGC : type de voirie (classement administratif), enjeu internationaux (itinéraire européen), largeur de chaussée et nombre de voies, itinéraires identifiés pour des transports exceptionnels, itinéraires de délestage, rôle de dessertes économiques, itinéraires défense, présence de réseaux d'énergie...

Ces critères ont également été complétés à partir d'une analyse des enjeux de la zone d'étude (concentrations de population, localisation d'équipements stratégiques du point de vue de la gestion de crise et de l'organisation des secours : hôpitaux, casernes de pompiers, ports et aéroports...) et validés à partir des résultats d'études spécifiques plus approfondies déjà réalisées sur certains itinéraires stratégiques (cf. paragraphes suivants). Les critères faisant intervenir la distance de parcours jusqu'à ces équipements stratégiques ont d'ailleurs pu être renseignés automatiquement à partir d'une exploitation des données cartographiées.



Alain Houot *Densité de population en région PACA*



Principaux aéroports en région PACA

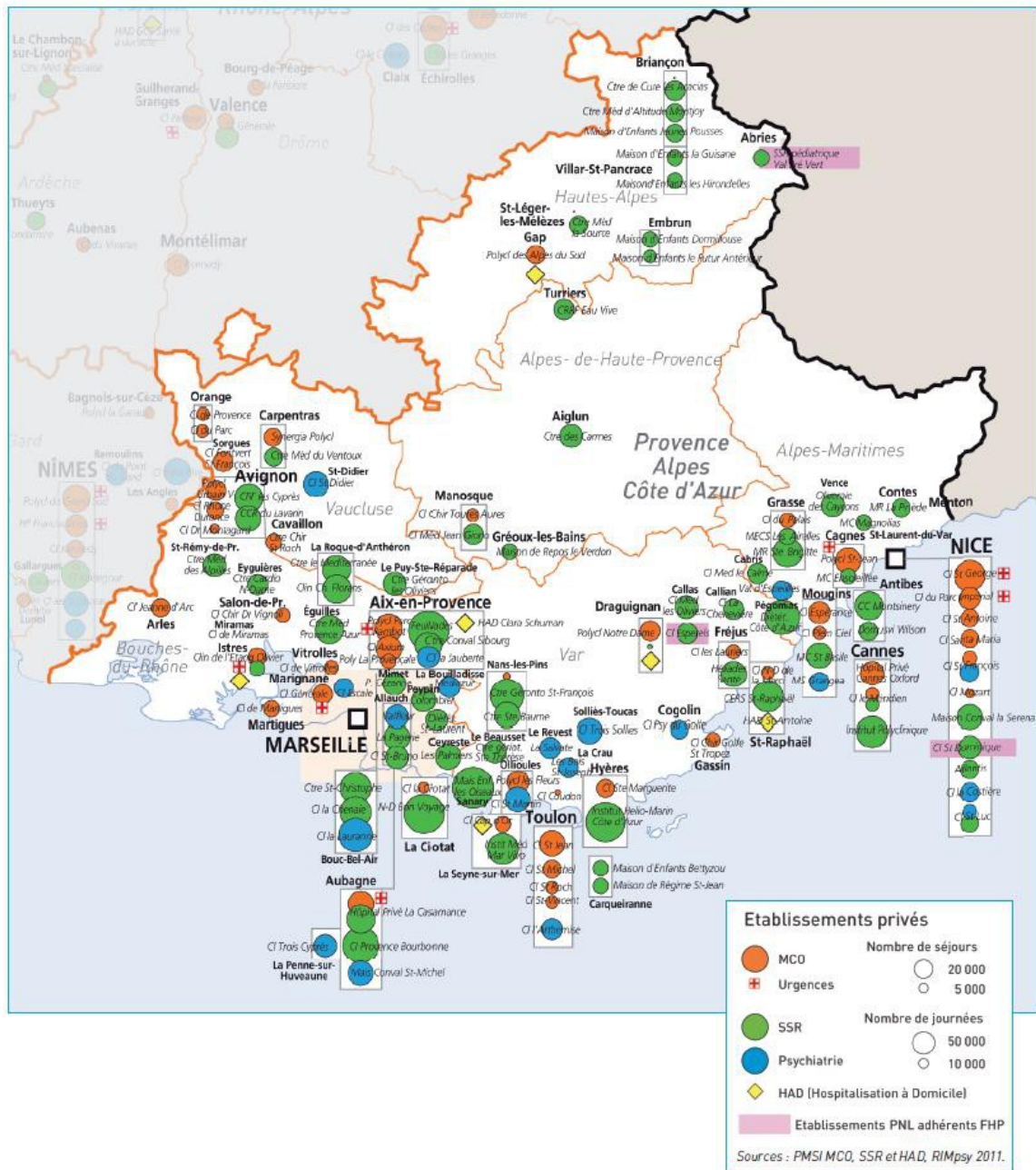


Figure 34 : Analyse de certains enjeux de la zone d'étude vis-à-vis de la gestion de crise (densité de population, aéroports et établissements de santé)

Le cumul des différents indices d'importance conduit in fine à la répartition suivante en terme de linéaire d'itinéraires :

- Niveau d'enjeu considéré comme **très faible** : 0 %
- Niveau d'enjeu considéré comme **faible** : 29,21 %
- Niveau d'enjeu considéré comme **modéré** : 35,94 %
- Niveau d'enjeu considéré comme **moyen** : 31,78 %
- Niveau d'enjeu considéré comme **fort** : 3,48 %

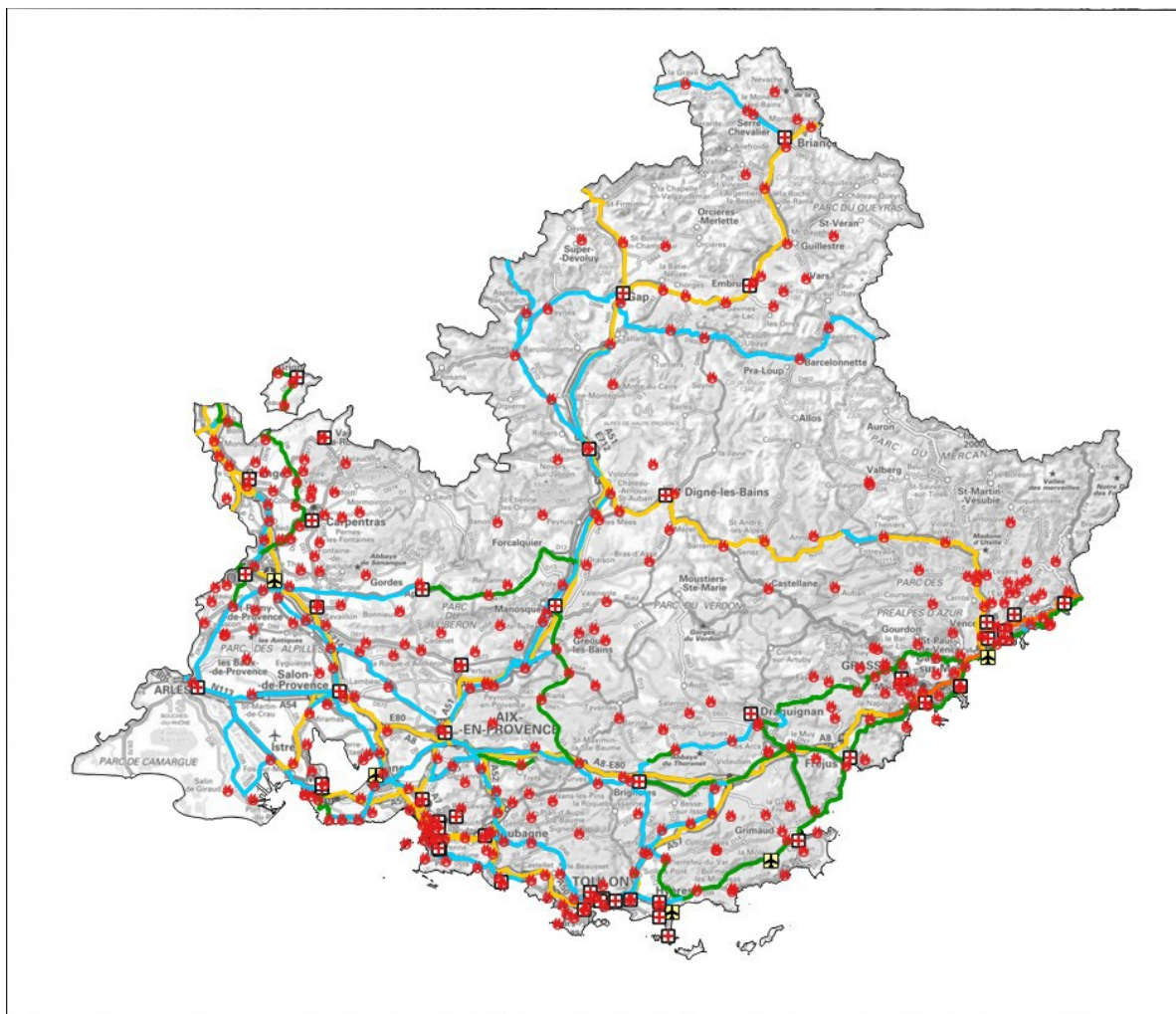


Figure 35 : Cartographie des niveaux d'enjeu

3.3.4 Évaluation des niveaux de risque

Le croisement automatisé des indices d'aléas et de vulnérabilité conformément à la démarche présentée au §2.4.1 aboutit à la définition d'indices de risques pour chacun des tronçons étudiés :

	V 1	V 2	V 3	V 4	V 5
A 1	R 1	R 1	R 1	R 2	R 2
A 2	R 1	R 1	R 2	R 3	R 3
A 3	R 1	R 2	R 3	R 4	R 4
A 4	R 2	R 3	R 4	R 5	R 5
A 5	R 3	R 4	R 5	R 5	R 5

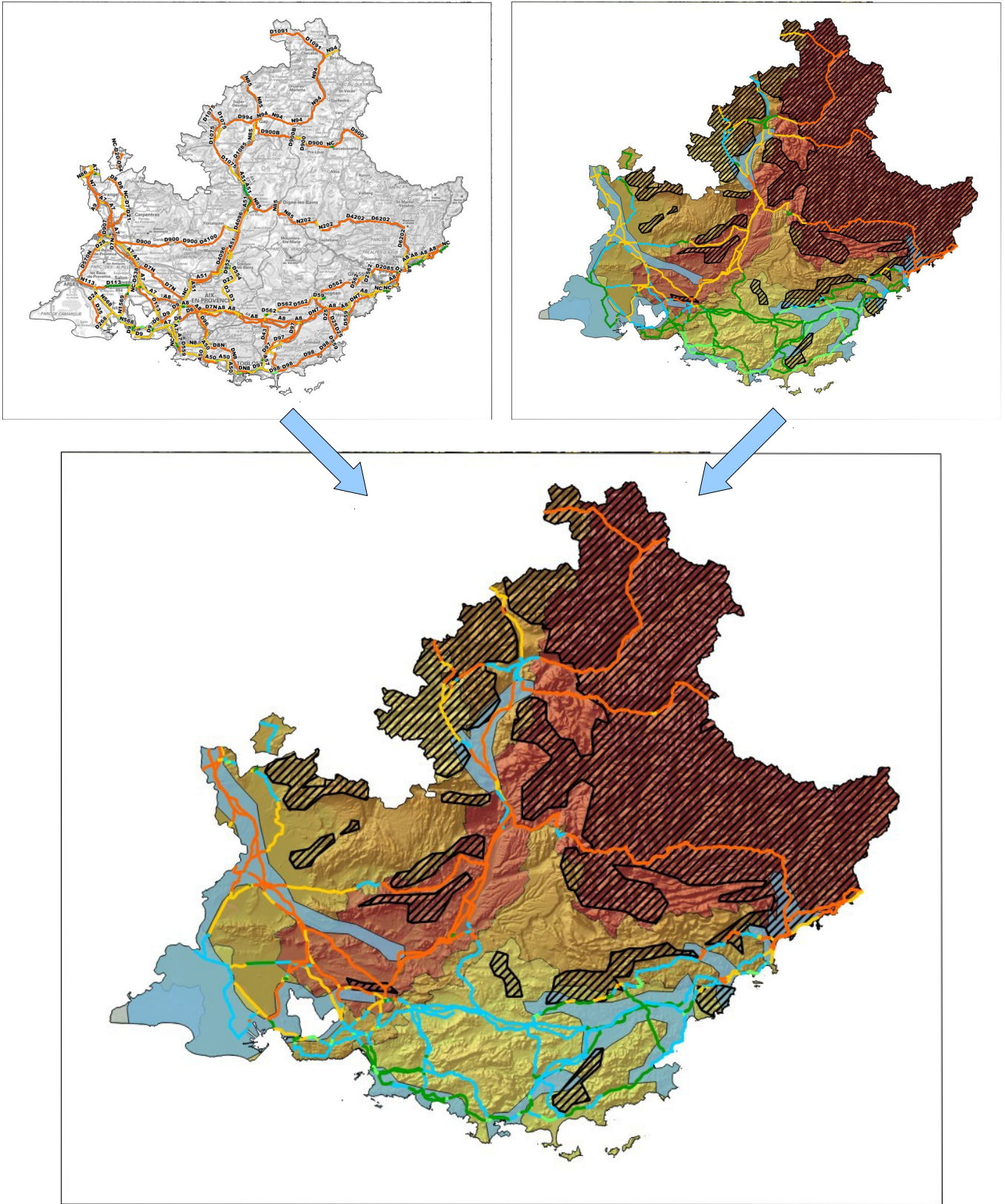


Figure 36 : Calcul automatisé et cartographie des niveaux de risque

Les 3265,4 km de route étudiés se répartissent ainsi de la manière suivante en terme de niveau de risque :

- Niveau de risque considéré comme **très faible** : 1,67 %
- Niveau de risque considéré comme **faible** : 11,68 %
- Niveau de risque considéré comme **modéré** : 31,70 %
- Niveau de risque considéré comme **moyen** : 17,54 %
- Niveau de risque considéré comme **fort** : 37,40 %

3.3.5 Évaluation des niveaux de priorités

Comme pour le calcul des niveaux de risque et conformément à la démarche présentée au §2.4.1, le croisement automatisé des indices de risque et d'importance aboutit à la définition de niveaux de priorité pour chacun des tronçons étudiés :

	I 1	I 2	I 3	I 4	I 5
R 1	P 3	P 3	P 3	P 3	P 2
R 2	P 3	P 3	P 3	P 2	P 2
R 3	P 3	P 3	P 2	P 2	P 1
R 4	P 3	P 3	P 2	P 1	P 1
R 5	P 3	P 2	P 2	P 1	P 1

Les 3265,4 km de route étudiés se répartissent ainsi de la manière suivante en terme de niveau de priorité :

- Niveau de **priorité 1** : 23,25 %
- Niveau de **priorité 2** : 48,83 %
- Niveau de **priorité 3** : 27,92 %

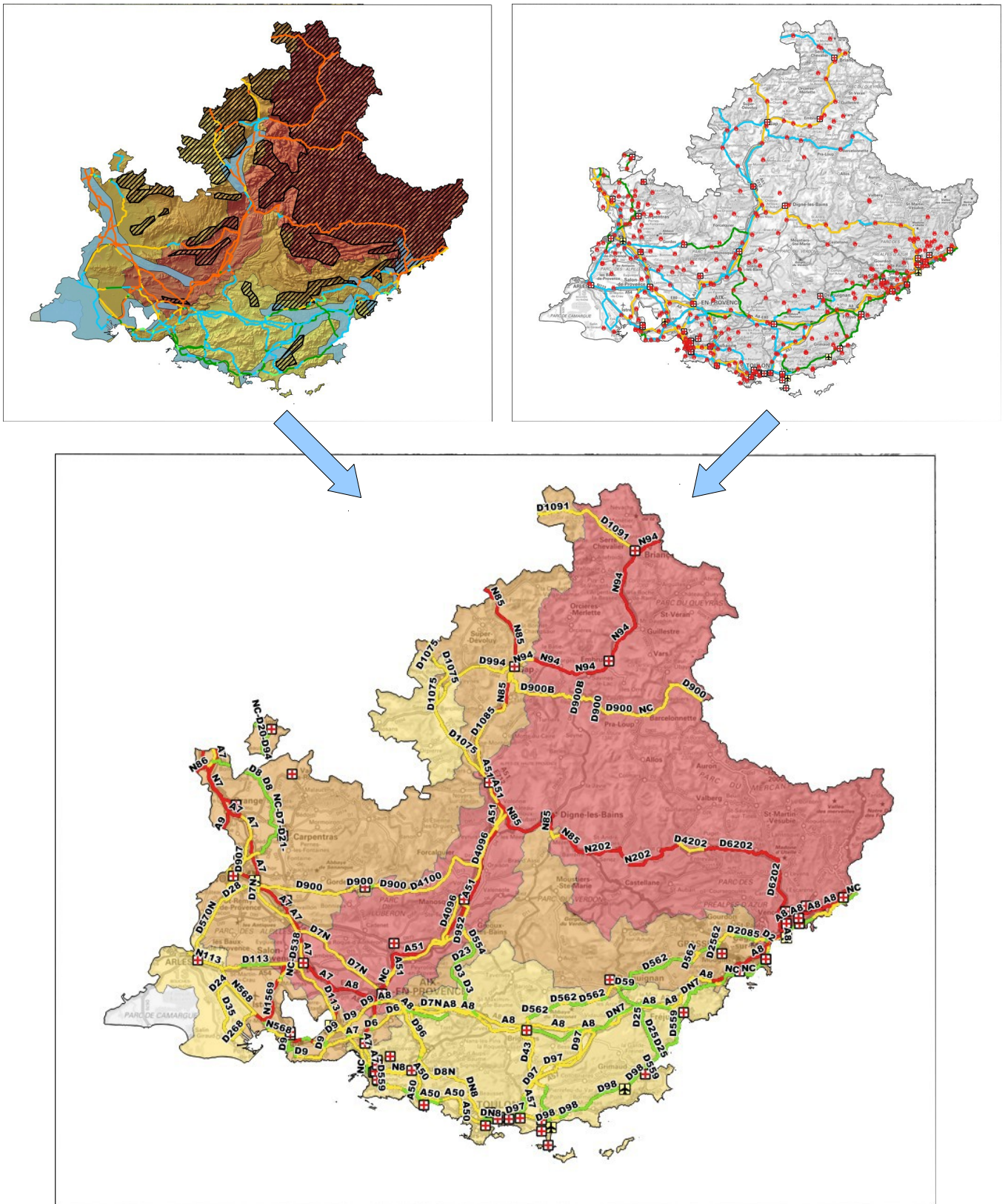


Figure 37 : Calcul automatisé et cartographie des niveaux de priorité

3.4 Conclusions et principaux enseignements de l'étude

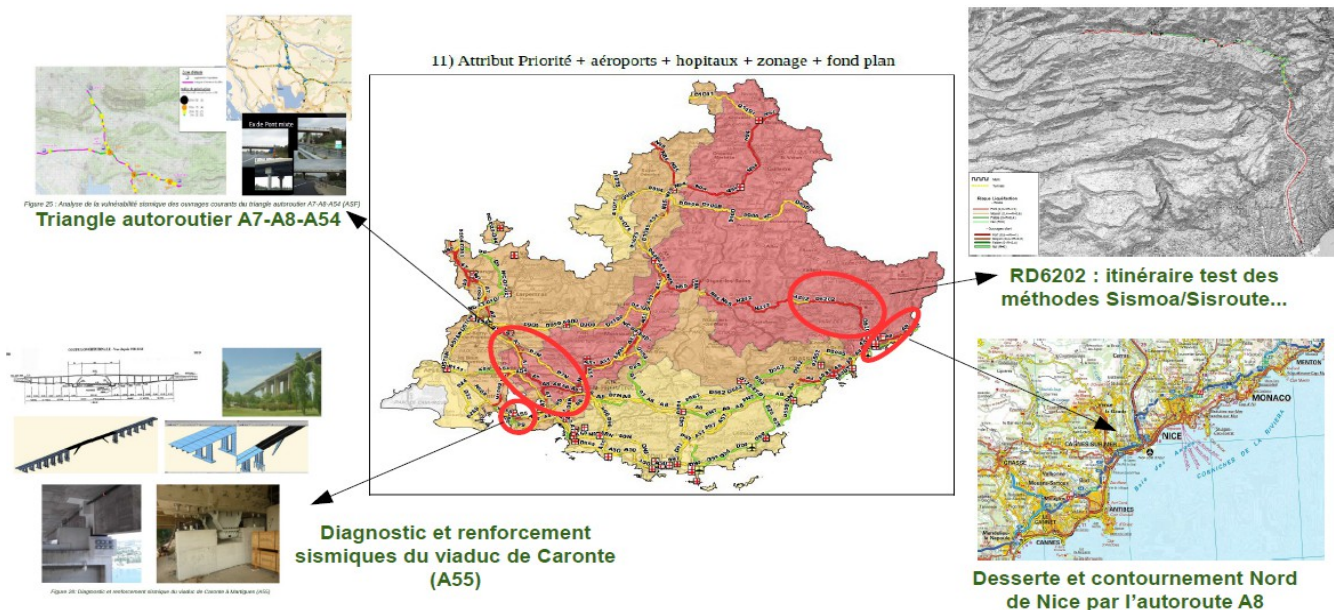
La démarche de priorisation des itinéraires à l'échelle d'un territoire étendu, telle que décrite au §2.4, a été appliquée aux principaux itinéraires structurants de la région PACA, dont la liste a été établie en partenariat avec l'Unité des Risques Naturels Majeurs (URNM) du Service de Prévention des Risques (SPR) de la DREAL PACA et en associant certains services en charge de la gestion de crise (sécurité civile, DDT, Préfectures...). Cette phase d'analyse préalable (dite « analyse macro grande maille ») repose sur une approche très simplifiée croisant différents indices d'enjeux, d'exposition à l'aléa, et de vulnérabilité très sommaire.

Il ressort de l'étude que la pondération objectivée des trois facteurs, en cohérence avec les niveaux de confiance associés à chacun à cette échelle d'analyse (Importance > Aléa > Vulnérabilité), conduit à un niveau de discrimination très satisfaisant des résultats, puisque sur les 3265,4 km de route étudiés 27,92 % ressortent en priorité 3, 48,83 % ressortent en priorité 2 et seulement 23,25 %, soit moins d'un quart, ressortent en priorité 1, et ceux pour une des régions identifiées parmi les plus exposées du territoire métropolitain.

Parmi les itinéraires identifiés comme prioritaires, on trouve notamment :

- le contournement et desserte de l'agglomération Niçoise par l'autoroute A8,
- le triangle autoroutier A7-A8-A54 délimité par les villes de Saint-Martin-de-Crau, Cavaillon, Aix-en-Provence et Rognac,
- les principaux itinéraires de dessertes des zones « reculées » (A51, RD62020, RN85, RN94),
- le franchissement de la passe de Caronte par l'A55 à Martignes...

Et il est ainsi intéressant de noter que ces priorités apparaissent tout-à-fait conformes à celles intuitées et anticipées dans le cadre d'études plus spécifiques déjà menées, dont la présentation et la description font l'objet des paragraphes suivants et des annexes du présent rapport.



4 Exemples d'études déjà menées à des échelles plus précises en région PACA

4.1 Études menées sur des itinéraires ou tronçons d'itinéraires

4.1.1 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 [31] – 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'ouvrages 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...

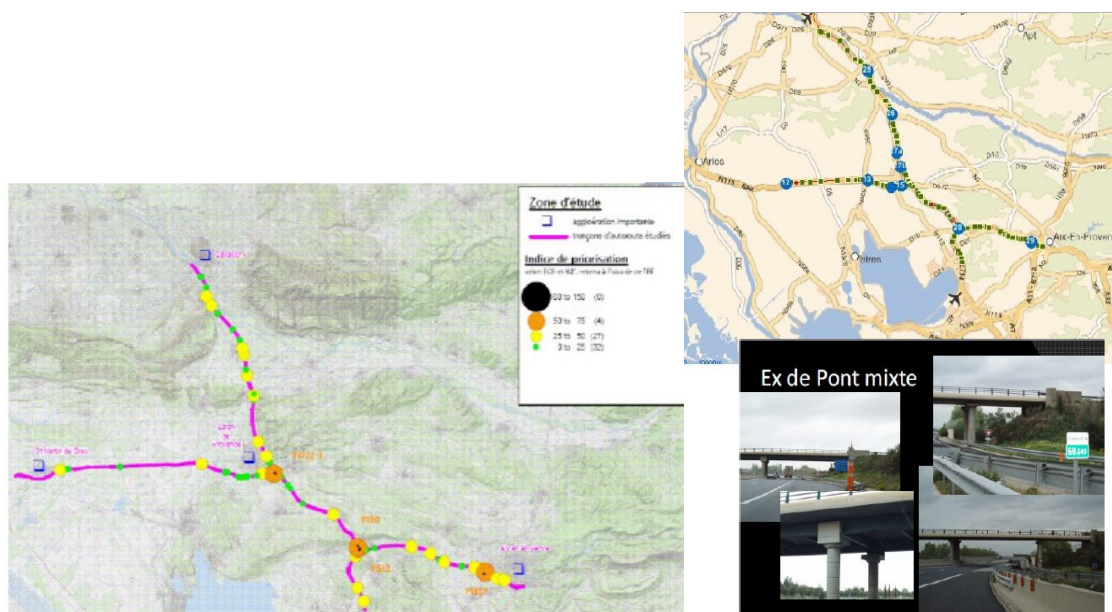


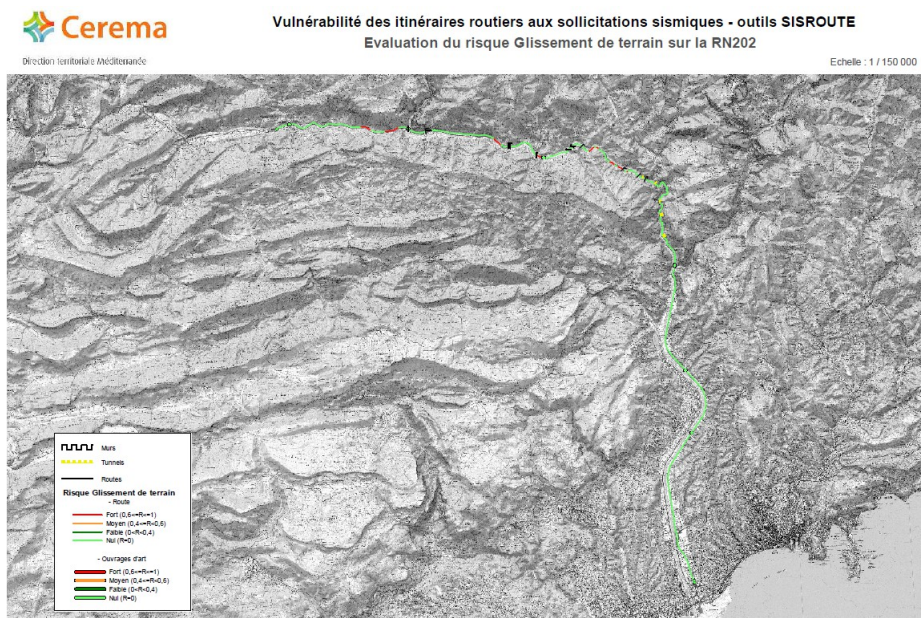
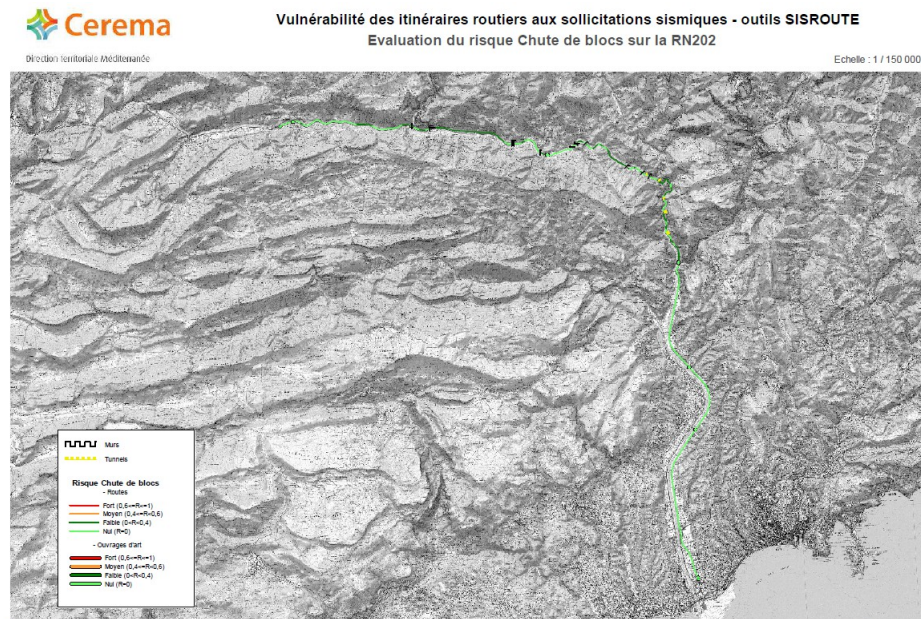
Figure 38 : Analyse de la vulnérabilité sismique des ouvrages courants du triangle autoroutier A7-A8-A54 (ASF)

Cette étude fait l'objet d'une description plus détaillée en Annexe 1 et d'une fiche de synthèse en Annexe 5-1.

4.1.2 Évaluation du risque sismique l'itinéraire de la RD6202 entre Nice et Digne

Dans le cadre d'une étude de validation de la méthodologie Sisroute développée par le Cerema pour l'évaluation préliminaire du risque sismique sur les itinéraires routiers (intégrant notamment l'évaluation du risque d'occurrence d'effets induits chutes de blocs, glissements de terrain et liquéfaction des sols), celle-ci a été mise en œuvre sur le linéaire de la RD6202 qui relie les villes de Nice dans les Alpes-Maritimes et Digne dans Alpes-de-Haute-Provence [32].

L'application de la méthodologie SISROUTE sur cet itinéraire a permis d'établir les cartes de risque présentées ci-dessous vis-à-vis des aléas environnementaux (liquéfaction, chutes de blocs et glissement) et de l'aléa vibratoire sur les ponts et les murs de soutènement. Les tunnels ne sont concernés que par la vulnérabilité des têtes, assimilées à des murs (outil Sismur).



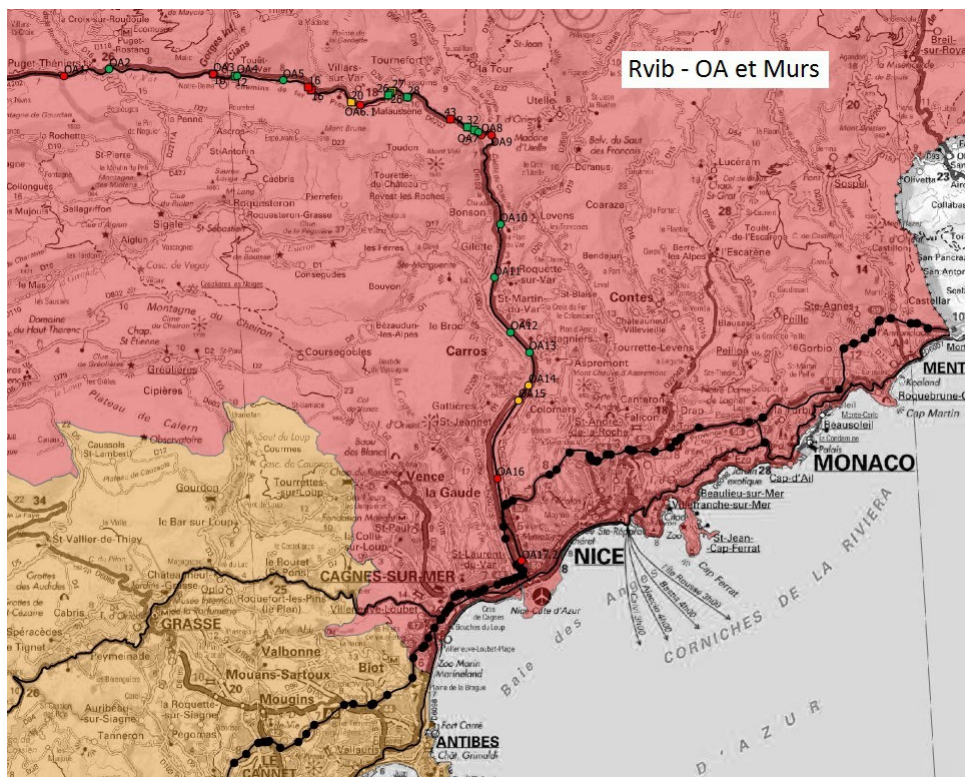
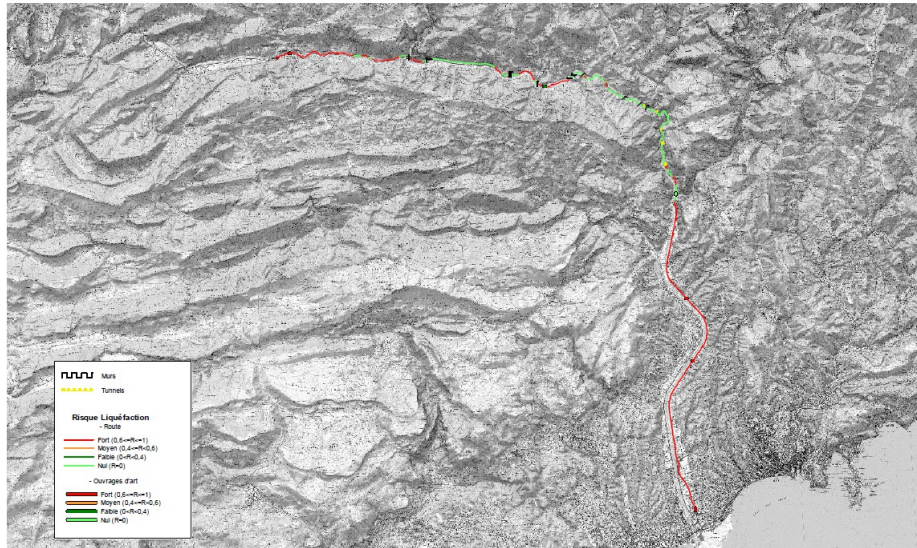


Figure 39 : Cartes présentant les résultats de l'application de la méthode Sisroute sur la RD6202 vis-à-vis des effets induits chutes de blocs, glissements de terrain et liquéfaction ainsi vis-à-vis de l'aléa vibratoire sur les ponts et les murs

Les résultats obtenus pour les niveaux de risque et d'aléa avec l'outil Sisroute relativement aux phénomènes de chute de blocs, glissement et de liquéfaction sont résumés ci-dessous, uniquement pour les routes, par confrontation avec le diagnostic qui aurait été formulé, en approche préliminaire, à « dires d'expert ». **Cette analyse a conduit à proposer plusieurs évolutions de la démarche Sisroute, en particulier vis-à-vis de l'évaluation du risque relatif à l'aléa induit chutes de blocs, qui apparaît à ce stade assez largement sous évalué.**

Vis-à-vis de l'effet induit chutes de blocs, il apparaît que la zone d'étude est affectée au maximum d'un risque faible pour les routes, les ouvrages d'art et les murs, même si la chute de blocs a été évaluée comme possible, que le seuil de déclenchement minimal du phénomène a été atteint (pour la mobilisation d'un volume unitaire $<1\text{dm}^3$) et qu'aucune parade n'est présente (la vulnérabilité est alors maximale). **Or le risque de chute de bloc, dans le cas de la RD6202, a été parfois qualifié de « majeur » ou de « grande ampleur » (GA), le long de l'itinéraire, dans les PPR existants (situation statique). A dire d'expert, le niveau d'aléa, et par conséquent de risque, est donc sous-évalué pour les chutes de blocs.** C'est le cas par exemple sur la Commune de Touët-sur-Var où la RN6202 traverse une zone classée inconstructible sur le plan réglementaire du PPR pour cause d'aléa majeur éboulement en statique, alors qu'il est de niveau « faible » d'après Sisroute en situation dynamique. **Il est par conséquent proposé de faire évoluer la démarche d'une part en corrélant le volume unitaire des blocs éboulés à l'énergie cinétique potentielle qu'il générerait (ce qui devrait augmenter l'intensité de l'aléa), d'autre part en prenant en compte le degré d'endommagement ou de charge des parades existantes le cas échéant (ce qui devrait augmenter le niveau de vulnérabilité).**

Vis-à-vis de l'effet induit glissements de terrain, les résultats obtenus par Sisroute correspondent soit à un risque fort ($R>0,6$), soit à un risque faible ($R<0$) sur l'itinéraire de la RD6202. Il en résulte que, pour la RD6202 étudiée, dès le glissement est considéré possible par l'utilisateur de Sisroute, l'aléa et le risque sont classés « fort », pour des accélérations seuil de déclenchement et des paramètres de sol variables. A dire d'expert, **les zones où le glissement a été considéré comme possible, correspondent bien à des zones de glissement avérées en situation statique ou à fort potentiel**, ce qui est cohérent avec le diagnostic proposé par Sisroute (risque fort). **L'étendue des zones de glissement est par ailleurs identique à celle évaluée en conditions statiques. Il est toutefois proposé de faire évoluer la méthode de manière d'une part à intégrer les conditions hydriques des terrains, d'autre part à mieux prendre en compte la position du glissement (amont ou aval) par rapport à la route en termes de gêne à l'exploitation (et durée de cette gêne) pour le gestionnaire.**

Vis-à-vis de l'effet induit liquéfaction des sols, la RD6202 longe le fleuve Var sur l'ensemble de son linéaire et repose par conséquent sur des matériaux alluvionnaires baignant dans la nappe en lien avec le cours d'eau. En se déplaçant vers le Nord, à partir de la zone du Plan du Var, l'infrastructure se situe soit sur formation alluvionnaire, soit localement sur un substratum à dominante calcaire ou dolomitique. En plus de l'accélération sismique de référence considérée sur la zone d'étude ($a_{\text{vib}}=1,6\text{m.s}^{-2}$), la présence de sols pulvérulents sous nappe, et la nature et l'âge des dépôts sédimentaires, détermine directement l'aléa de liquéfaction dans l'approche Sisroute. Par conséquent, les dépôts alluvionnaires (sablo-graveleux), baignés par la nappe alluviale du Var, constituent en évaluation préliminaire un terrain propice à l'occurrence de l'aléa liquéfaction. **Ces terrains sont par conséquent classés en risque fort par la méthodologie Sisroute. Pour les autres contextes de dépôts cités préalablement, le risque Sisroute est faible. A l'échelle de l'infrastructure et sur la base des connaissances acquises au stade d'évaluation préliminaire, le dire d'expert correspondrait aux conclusions de l'étude Sisroute. Les évolutions proposées de l'outil portent notamment sur une meilleure évaluation de la vulnérabilité des remblais et des structures de chaussée, ainsi que sur une meilleure exploitation des données de sol disponibles le cas échéant.**

Cette étude fait l'objet d'une description plus détaillée en Annexe 2.

4.1.3 Estimation et priorisation du diagnostic des vulnérabilités au séisme des Ouvrages d'Art du réseau ESCOTA

Le réseau autoroutier ESCOTA, long de 460 km, est fortement implanté en zone d'activité sismique identifiée. Pour une grande partie, les ouvrages d'art qui le composent ont été construits avant les années 90, à une époque où la conception parasismique était peu usitée pour les ponts.

Durant les années 2011-2012, le bureau d'études SETEC TPI a procédé selon la méthode SISMOA, à l'examen des vulnérabilités sismiques sur les 426 ponts (nombre auquel il faut retirer une cinquantaine de ponts dont la vulnérabilité n'a pas pu être définie faute de données d'entrée) des tronçons A8, A50, A51, A52, A57, A500, A510, A520 ([33] à [40]). Conformément aux principes décrits au §2.5, SETEC a pu établir la liste des ponts étudiés, avec pour chacun les 4 indices de risques d'endommagement (risque au phénomène vibratoire, risques vis-à-vis des chutes de blocs, de glissement de terrain et de liquéfaction [42] – cf. tableau récapitulatif ci-dessous).

Tronçon	Nombre total de ponts	Nombre de ponts sans données d'entrée	Nombre de Risque vibratoire fort	Nombre de Risque liquéfaction fort	Nombre de Risque glissement de terrain fort	Nombre de Risque chute de blocs fort
A8 "Nice - Menton" et A500	64	8	46 (+2 ⁽¹⁾)	13	38 (+2 ⁽¹⁾)	1
A8 "Mandelieu - St-Laurent du Var"	62	8	29 (+8 ⁽¹⁾)	20 (+2 ⁽¹⁾)	4	0
A8 "Brignoles - Fréjus"	54	5	2	0	8	0
A8 "Aix-en-Provence - Meyreuil"	15	5	7	0	4	0
A8 "St-Maximin - Châteauneuf (PI)"	14	0	0	1	1	0
A8 "St-Maximin - Châteauneuf (PS)"	20	3	1	0	1	0
A50	46	5	0 (+2 ⁽¹⁾)	0	2 (+2 ⁽¹⁾)	0
A51 "District de Meyrargues"	37	0	18	11	1	0
A51 "District de Peyrus"	52	7	9	12	5	2
A57	29	4	0	0	1	0
A501	7	0	0	0	0	0
A520	2	0	0	0	0	0
A52	25	4	2	0	1	0

(1) : ouvrage cantilever, en arc, en console ou à béquille non étudiable selon la méthode SISMOA mais laissant à penser que le risque est fort

Figure 40 : Tableau récapitulatif des nombres d'ouvrages exposés aux différents risques sismiques sur chacun des tronçons Escota [42]

Il ressort de ces analyses [42] que :

- Sur le tronçon A8 « Nice - Menton » et A500 : tous les ponts du tronçon A8 « Nice-Menton » qui ont pu être étudiés présentent des faiblesses vis-à-vis du risque sismique. Sur le tronçon A500, l'unique pont (sur les trois au total du tronçon) qui a pu être étudié ne présente pas de faiblesse au risque sismique ;
- Sur le tronçon A8 « Mandelieu – St Laurent du Var » : tous les ponts du tronçon (à l'exception de trois d'entre eux) qui ont pu être étudiés présentent des faiblesses vis-à-vis du risque sismique ;
- Sur le tronçon A8 « Brignoles - Fréjus » : tous les ponts du tronçon (à l'exception de deux d'entre eux) qui ont pu être étudiés ne présentent aucune faiblesse majeure vis-à-vis du risque sismique. A noter que deux ponts pour lesquels les données d'entrée ne sont pas disponibles sont relativement comparables à l'un des deux ponts du tronçon présentant des faiblesses face au risque sismique. Il est donc vraisemblable que ces deux ponts présentent également des risques forts vis-à-vis du phénomène sismique ;

- Sur le tronçon A8 « Aix-en-Provence - Meyreuil » : tous les ponts du tronçon (à l'exception de deux d'entre eux) qui ont pu être étudiés présentent des faiblesses vis-à-vis du risque sismique. A noter qu'il existe une forte probabilité que tous les ponts de ce tronçon qui n'ont pas pu être étudiés, comportent un risque vibratoire fort, au vu des résultats des ponts limitrophes ;
- Sur le tronçon A8 « Saint Maximin - Châteauneuf-le-rouge (PI) » : les ponts PI du tronçon ne présentent aucune faiblesse majeure vis-à-vis du risque sismique, excepté pour deux d'entre eux pour lesquels des investigations complémentaires pourraient faire lever les réserves ;
- Sur le tronçon A8 « Saint Maximin - Châteauneuf-le-rouge (PS) » : les ponts PS du tronçon ne présentent aucune faiblesse majeure vis-à-vis du risque sismique, excepté pour deux d'entre eux pour lesquels des investigations complémentaires pourraient faire lever les réserves ;
- Sur le tronçon A50 : tous les ponts du tronçon (à l'exception de deux d'entre eux) qui ont pu être étudiés ne présentent aucune faiblesse majeure vis-à-vis du risque sismique ;
- Sur le tronçon A51 « District de Meyrargues » : tous les ponts du tronçon (à l'exception de quatre d'entre eux) qui ont pu être étudiés présentent des faiblesses vis-à-vis du risque sismique ;
- Sur le tronçon AS1 « District de Peyruis » : tous les ponts du tronçon (à l'exception de huit d'entre eux) qui ont pu être étudiés présentent des faiblesses vis-à-vis du risque sismique ;
- Sur le tronçon A57 : les ponts du tronçon ne présentent aucune faiblesse majeure vis-à-vis du risque sismique, excepté pour l'un d'entre eux pour lesquels des investigations complémentaires pourraient faire lever les réserves ;
- Sur les tronçons A501 et A520 : les ponts des tronçons ne présentent aucune faiblesse majeure vis-à-vis du risque sismique ;
- Sur le tronçon A52 : les ponts du tronçon ne présentent aucune faiblesse majeure vis-à-vis du risque sismique, excepté pour trois d'entre eux.

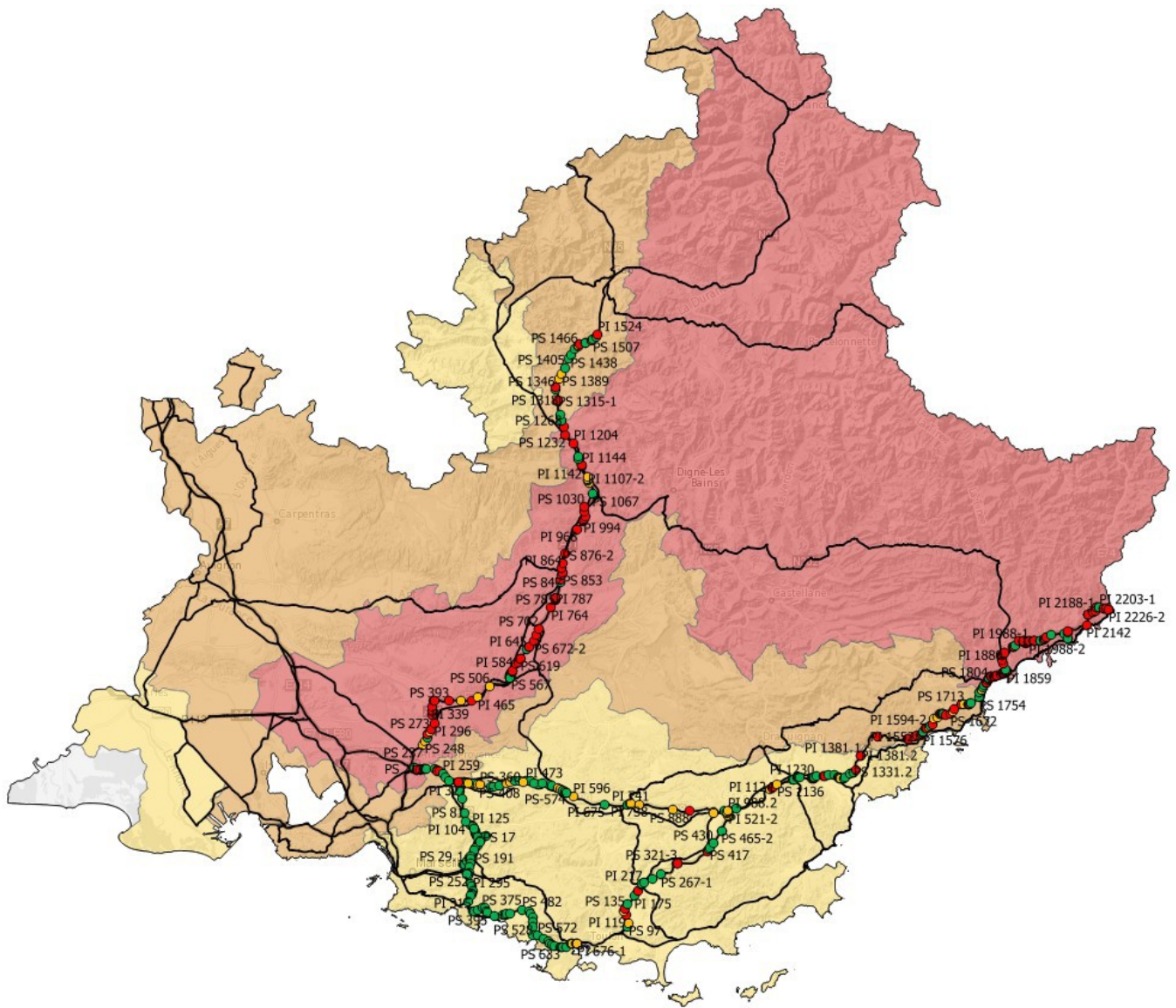


Figure 41 : Représentation des niveaux de risque sur l'ensemble du réseau Escota

SETEC s'est concentré dans un deuxième temps sur la zone « Alpes Maritimes », à savoir les sections d'autoroutes A500, A8 « Nice - Menton » et A8 « Mandelieu – St Laurent du Var », [41]. L'objectif de cette approche est de proposer une hiérarchie entre les ouvrages devant subir des diagnostics permettant d'aboutir à une réduction du risque identifié par l'analyse SISMOA, mais aussi la qualification et l'évaluation financière de ces diagnostics.

La hiérarchie de ces ouvrages est abordée selon deux axes différents :

- 1) Par importance des ouvrages, conformément aux matrices d'importance décrites ci-avant ;
- 2) Par exploitation des indicateurs de vulnérabilité définis par la méthode SISMOA croisée avec les risques identifiés, afin de hiérarchiser directement les préconisations de diagnostic par vulnérabilités dans l'objectif de tracer l'amélioration des risques sur les ouvrages au fil du temps en intégrant régulièrement les risques levés par les diagnostics issus des investigations et travaux de renforcement effectués.

Autoroute	N° de l'ouvrage	Objet du Franchissement	Risque Vibratoire	Risque liquéfaction	Risque glissement de terrain	Risque chute de blocs
A8	PS 1858	Ech. de la promenade des Anglais	0.74	1	0	0
A8	PI 1859	RN 202A	0.99	1	0	0
A8	PI 1864	Accès nouvelle Cité Administrative	0.45	1	0	0
A8	PS 1866 *	Echangeur NICE-OUEST	*	*	*	*
A8	PI 1880	Balastière DETRAGACHE	0.61	1	0	0
A8	PI 1889	Balastière SPADA	0.61	0	0	0
A8	PI 1900	RN 202	1	1	0	0
A8	PI 1901	Echangeur ST. ISIDORE	0.8	1	0	0
A8	PI 1905	Chemin des baraques CR II	0.8	1	0	0
A8	PI 1907-1	VIADUC-NORD de St. ISIDORE	1	1	1	0
A8	PI 1907-2	VIADUC-SUD de St. ISIDORE	1	1	1	0
A8	PI 1937-1	VIADUC du MAGNAN NORD	1	0	0.9	0
A8	PI 1937-2	VIADUC du MAGNAN SUD	1	0	0.9	0
A8	PS 1943	Chemin de la COSTIERE (CR 20)	0.82	0	1	0
A8	PI 1947 *	VALLON de SABATIER	*	*	*	*
A8	PI 1960	Chemin du Col de BATS	0.61	0	1	0
A8	PI 1974-1	Ech. NICE-NORD (Tablier OUEST)	1	0	0	0
A8	PI 1974-2	Ech. NICE-NORD (Tablier NORD)	1	0	0	0
A8	PI 1974-3	Ech. NICE-NORD (Tablier EST)	1	0	0	0
A8	PI 1975	Bretelle accès NORD	0.72	0	0	0
A8	PS 1976	RD 14 (Bretelle NORD)	0.72	0	0	0
A8	PI 1977	RD 14	0.8	0	0	0
A8	PS 1979	CR N° 66	0.88	0	1	0.2
A8	PI 1987	Chemin VALLON DES FLEURS	1	0	1	0.1
A8	PI 1988-1	VIADUC VALLON DES FLEURS NORD	1	0	0.8	0
A8	PI 1988-2	VIADUC VALLON DES FLEURS SUD	0.75	0	0.8	0
A8	PI 2000-1	VIADUC de BANQUIERE NORD	1	1	1	0
A8	PI 2000-2	VIADUC de BANQUIERE SUD	1	1	1	0
A8	PI 2003-1	VIADUC du PAILLON NORD	0.96	1	1	0
A8	PI 2003-2	VIADUC du PAILLON SUD	0.87	1	1	0
A8	PS 2004	RD 119	0.57	0	1	0.2
A8	PI 2016-1 **	VIADUC de TOLI NORD	1**	0**	1**	0**
A8	PI 2016-2 **	VIADUC de TOLI SUD	1**	0**	1**	0**
A8	PI 2025-1	VIADUC de la NUBEC NORD	1	0	0.9	0
A8	PI 2025-2	VIADUC de la NUBEC SUD	0.88	0	1	0

Figure 42 : Tableau des indices de risques calculés par ouvrage sur la section A8 « Nice - Menton » (extrait) [41]

Par cette approche, il s'avère que très peu de ponts (9 sur les 126 étudiés) ont un produit R_{xl} inférieur à 50 leur permettant d'être dispensés de diagnostic détaillé.

A noter toutefois que le CETE Méditerranée a procédé à une vérification et une optimisation des paramètres géologiques et géotechniques retenus dans le rapport SETEC [43]. Cette analyse a concerné uniquement une partie du tronçon A8 « Nice - Menton », à savoir les ponts situés entre « le Paillon » et « Menton ».

La comparaison entre les résultats de SETEC et du CETE Méditerranée aboutit aux constats suivants :

- Sur le risque vibratoire R_{vib} : 8 ponts ont été déclassés à un niveau de risque inférieur (risque fort à risque modéré, ou risque modéré à risque faible) par le CETE par rapport aux résultats SETEC, jugés trop défavorables en raison d'une prise en compte de paramètres de sol plus conservateurs que le CETE et d'un coefficient d'importance, non nécessaire pour le calcul des indices de risque R selon la démarche développée par le Cerema. Ces deux choix aboutissent dans l'étude SETEC à augmenter l'accélération de sol qu'aurait à subir les ponts lors d'un séisme. 1 pont a été surclassé à un niveau de risque supérieur par le CETE, avec la prise en compte de paramètres de sol plus défavorables ;
- Sur le risque à la liquéfaction R_{liq} : les résultats obtenus par SETEC et le CETE sont similaires ;

- Sur le risque de glissement de terrain R_{gliss} : 13 ponts ont été déclassés (du risque fort à risque nul) par le CETE, sur la base de leur connaissance acquise sur la région ;
- Sur le risque de chute de blocs R_{blocs} : 1 pont a été déclassé (du risque fort à risque nul) par le CETE. De ce fait, l'ensemble des ponts étudiés par le CETE sont en risque faible (nul ou quasi-nul).

On constate ainsi que pour les 28 ouvrages pour lesquels les indices ont été comparés, le rapport du CETE est globalement plus favorable et ce, principalement en raison de la prise en compte (erronée par rapport à la démarche générale proposée) par SETEC du coefficient d'importance γ_i pour le calcul de l'accélération sollicitante.

Au final, on constate que le CETE classe 9 des ouvrages dans une catégorie plus favorable que ne le fait SETEC, avec toutefois un contre-exemple dû à une correction de coefficient de site.

Cette étude fait l'objet d'une description plus détaillée en Annexe 3 et d'une fiche de synthèse en Annexe 5-2.

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

Cette troisième application, également à portée opérationnelle, a été menée par la division ouvrages d'art du 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.

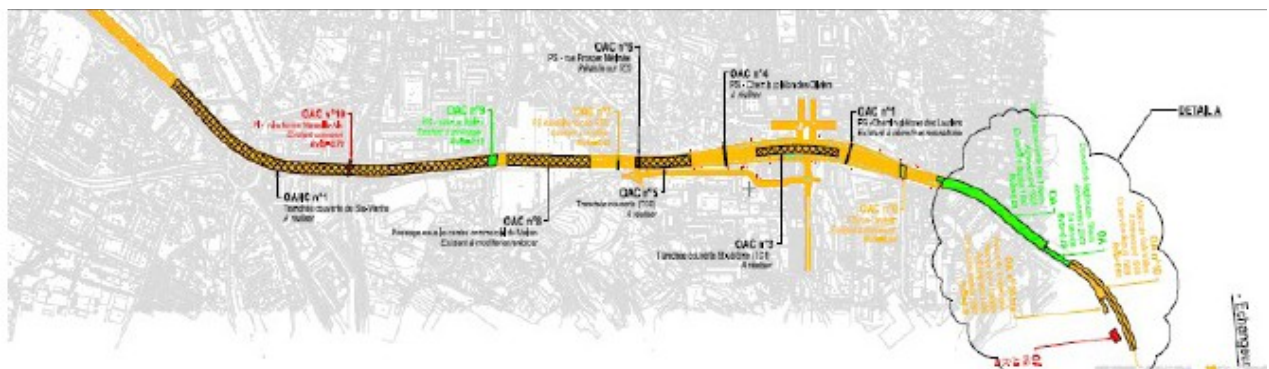


Figure 43 : Évaluation de la vulnérabilité au séisme des ouvrages d'art existants du projet de rocade L2 à Marseille (DREAL PACA)

Cette étude fait l'objet d'une description plus détaillée en Annexe 4.

4.2 Études menées sur des ouvrages « isolés »

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

Ouvrage emblématique de la ville de Martigues, le viaduc de Caronte permet le franchissement par l'autoroute A55 de la passe reliant l'étang de Berre à la mer Méditerranée. Il se compose d'un ouvrage métallique principal et de quatre viaducs d'accès en béton. Construit entre 1970 et 1972 selon les prescriptions des anciennes règles parasismiques PS69, son dimensionnement d'origine vis-à-vis des sollicitations sismiques s'avère largement inférieur à ce qu'exigerait l'application des règles actuelles. En outre, les ancrages des bloqueurs dynamiques parasismiques disposés à l'époque entre les viaducs d'accès et l'ouvrage métallique ont été arrachés au bout de quelques mois de service sous l'effet du passage de convois, rendant ces dispositifs hors d'usage et donc obsolètes.

Dans le cadre d'une opération de réparation plus large imposée par l'état de pathologie avancée de l'ouvrage, il a donc logiquement été décidé d'inclure dans l'avant-projet de réparation des mesures de réduction de sa vulnérabilité sismique. Les études de diagnostic/renforcement sismiques ont conduit, après comparaison de différentes stratégies possibles, à retenir une solution consistant à remplacer et à assouplir le système d'appuis 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 « ressorts amortisseurs précontraints » de forte capacité au droit de chacune des quatre culées des viaducs d'accès, permettant ainsi de réduire à la fois les efforts et les déplacements sismiques à des niveaux acceptables par la structure [44]. Des essais spécifiques (piézocône sur site et tri-axial cyclique en laboratoire) ont par ailleurs permis d'écarter le risque de liquéfaction sur cette zone très sensible.

Au final, la solution proposée permet de justifier, sur la base du nouveau corpus normatif et méthodologique national relatif à la prise en compte du risque sismique, un niveau de performance de l'ordre de 70% par rapport au niveau de séisme réglementaire des ouvrages neufs, pour un coût évalué à 15% environ du montant global de l'opération de réparation, soit un peu plus de 1% de coût évalué de démolition/reconstruction.

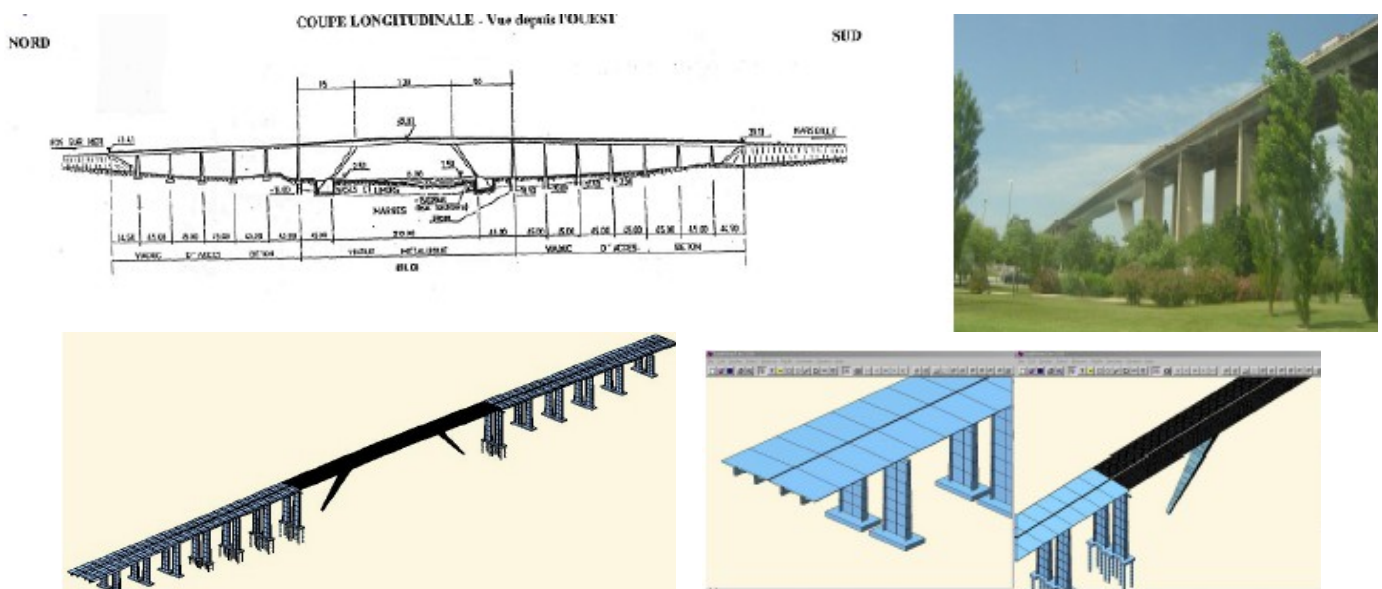


Figure 44: Présentation et modèle numérique du viaduc de Caronte à Martigues (A55) [44]



Figure 45: Techniques de renforcement sismique mises en œuvre sur le viaduc de Caronte à Martigues (A55)

Cette étude fait l'objet d'une fiche de synthèse en Annexe 5-3.

4.2.2 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.

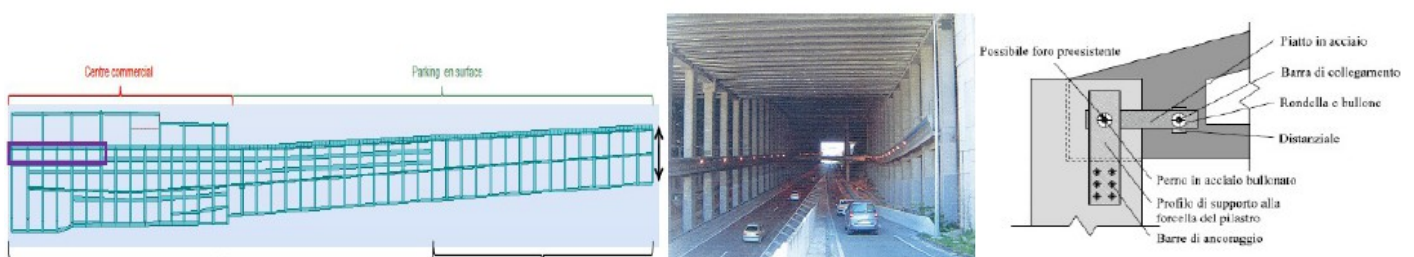


Figure 46 : Centre Commercial du Merlan (L2 – Marseille)
Diagnostic et projet de renforcement sismique par liaisonnement des ossatures poteaux-poutres

Cette étude fait l'objet d'une fiche de synthèse en Annexe 5-4.

5 Conclusions

Dans le cadre de la déclinaison régionale du Cadre d'Action national pour la Prévention du Risque Sismique (CAPRiS), la DREAL PACA (SPR/URNM) a passé commande au Cerema Méditerranée d'une étude relative à l'évaluation préliminaire de la sensibilité des itinéraires stratégiques du territoire régional à l'aléa sismique. L'objectif de cette étude, qui s'inscrit dans le cadre de la priorité n°4 du CAPRiS : « Amélioration de la connaissance de l'aléa, de la vulnérabilité et du risque sismique », consistait à dresser un état des lieux de la connaissance en matière de vulnérabilité des itinéraires et des ouvrages d'art stratégiques sur l'ensemble de la région PACA, en intégrant les différents gestionnaires (État/DIR Méditerranée, sociétés concessionnaires d'autoroute, collectivités territoriales...).

Cette étude s'appuie très largement sur les démarches développées par le Cerema depuis plusieurs années pour la prise en compte du risque sismique sur le patrimoine d'ouvrages d'art existants, qui consistent pour un volume très conséquent d'ouvrages à traiter, à procéder en plusieurs phases d'analyse successives, de niveau de raffinement croissant.

L'application de la première étape de cette démarche (analyse macro « grande maille » à l'échelle d'un territoire étendu) a porté sur les principaux itinéraires structurants de la région PACA, définis en partenariat avec l'Unité des Risques Naturels Majeurs (URNM) du Service de Prévention des Risques (SPR) de la DREAL PACA et en associant certains services en charge de la gestion de crise (sécurité civile, DDT, Préfectures...). Ces itinéraires comprennent notamment les principaux axes autoroutiers structurants, les principales routes de desserte des zones reculées (RD6202, RN85, RN94...), ainsi que les itinéraires stratégiques référencés dans les bases de données routières régionales RGC à partir de certains critères d'exploitation (transports exceptionnels, itinéraires de délestage, dessertes économiques, itinéraires défense, itinéraires opérateurs d'énergie, autoroutes...). Au final, 628 tronçons, qui correspondent à un linéaire total d'environ 3265 km, ont ainsi été hiérarchisés par niveaux de sensibilité et d'exposition aux aléas sismiques. Sur ces 3265 km de routes étudiées, 37,4 % ressortent comme présentant un risque fort, 49,2 % ressortent comme présentant un risque modéré à moyen et 13,4 % ressortent comme présentant un risque faible ou très faible vis-à-vis du phénomène sismique. Couplés avec des considérations d'importance (enjeux stratégique pour la gestion de crise et la reprise de l'activité socio-économique), ces niveaux de risque conduisent à classer 23,25 % du linéaire en priorité 1, 48,83 % du linéaire en priorité 2 et 27,92 % du linéaire en priorité 3. Parmi les itinéraires identifiés comme prioritaires, on trouve notamment le contournement et la desserte de l'agglomération Niçoise par l'autoroute A8, le triangle autoroutier A7-A8-A54 délimité par les villes de Saint-Martin-de-Crau, Cavaillon, Aix-en-Provence et Rognac, les principaux itinéraires de dessertes des zones « reculées » (A51, RD6202, RN85, RN94) ou encore le franchissement de la passe de Caronte par l'A55 à Martigues... Un tel niveau de discrimination apparaît tout-à-fait satisfaisant pour une des régions identifiées parmi les plus exposées du territoire métropolitain et il est par ailleurs intéressant de noter que ces priorités apparaissent conformes à celles intuitées et anticipées dans le cadre d'études plus spécifiques déjà menées.

Le rapport capitalise ainsi également un certain nombre d'analyses déjà réalisées dans la Région PACA sur certains itinéraires spécifiques (triangle autoroutier A7-A8-A54 en Provence ; RD6202 Nice-Digne ; L2 Marseille ; réseau autoroutier géré par la société Escota) ainsi que des opérations ou études de renforcement menées sur certains ouvrages spécifiques ou emblématiques (dalle du centre commercial du Merlan sur la liaison L2 à

Marseille ; viaduc de Caronte - autoroute A55 - Martigues), contribuant ainsi à dresser un premier état des lieux plus complet sur la connaissance de la vulnérabilité des infrastructures routières de la région.

Le présent rapport s'accompagne d'un certain nombre de fichiers numériques (tableurs et fichiers de données cartographiques) permettant ré-exploiter les principales données et résultats de l'étude. L'ensemble de ces documents a vocation à alimenter le répertoire de l'Observatoire des Risques Majeurs (ORRM) en PACA, et pourra par la suite être complétés au fur et à mesure des études spécifiques qui seront menées sur certains itinéraires ou ouvrages de la région en vue d'incrémenter la base de données.

Références

- [1] Décret n° 2010-1254 du 22 octobre 2010 relatif à la prévention du risque sismique
- [2] Décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010 (révisé janvier 2015) portant délimitation des zones de sismicité du territoire français
- [3] 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 »
- [4] 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
- [5] NF EN 1998-2 et NF EN 1998-2-NA : Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 2 : Ponts
- [6] 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
- [7] 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
- [8] NF EN 15129 : Dispositifs antisismiques
- [9] Guide Cerema « Ponts en zone sismique – Conception et dimensionnement selon l’Eurocode 8 » - sept. 2015
- [10] Cahier Technique AFPS/Cerema « Recommandations sur l’emploi des dispositifs parasismiques pour les ponts » – mai 2014
- [11] Guide Sétra « Maîtrise des risques - Application aux ouvrages d’art » - 2013
- [12] Guide Cerema « Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants » (*à paraître*)
- [13] Méthode SISMOA pour l’évaluation préliminaire du risque sismique sur les ouvrages d’art existants (Sétra, Nov. 2010)
http://www.infra-transport-materiaux.cerema.fr/IMG/pdf/1039w_SISMOA-1.pdf
- [14] Prise en compte du risque sismique sur le patrimoine OA existant – Proposition de critères décisionnels pour une stratégie de renforcement (Rapport CETE Méditerranée, juillet 2013)
- [15] Note de synthèse sur l’analyse des coûts des renforcements sismiques des ouvrages d’art (CETE Méditerranée, oct. 2013)
- [16] 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
- [17] SIMUR, 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
- [18] 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

[19] Mission post-sismique CETE Méditerranée/Sétra suite au séisme de l'Aquila du 6 avril 2009 – Analyse du comportement des ouvrages d'art – Bulletin Ouvrage d'Art du Sétra n°63, mars 2010

[20] Guide AFPS/CFMS « Procédés d'amélioration et de renforcement de sol sous actions sismiques » - 2012

[21] Priestley, Seible, Calvi : Seismic design and Retrofit of Bridges – New York : Wiley 1996

[22] Applied Technology Council (ATC), 1983, "Seismic Retrofitting Guidelines for Highway Bridges," FHWA/RD83/007

[23] Applied Technology Council, 1996, "Improved Seismic design Criteria for California Bridges : provisional Recommendations," ATC-32

[24] 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

[25] 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"

[26] Évaluation parasismique des ponts-routes existants – Office Fédéral Suisse des Routes (OFROU), 2005

[27] Seismic Vulnerability and Retrofit of Bridges (Vulnérabilité et confortement sismique des ponts), fév. 2001 – F. Légeron, Sétra

[28] Méthodologie pour un macrozonage sismique en région PACA - Echelle 1/50000 – 1/100000 – Cerema Méditerranée (Août 2015-V3)

[29] Prévion de l'aléa chute de blocs, analyse statistique des facteurs de prédisposition et des critères de déclenchement sur la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) – D. Batista, P. Azémard, A.C. Rougé, M. Dumalin, C. Rault

[30] Projet RHYTMME : Prévion de l'aléa glissement de terrain et analyse statistique des facteurs de prédisposition par l'outil SIG, sur la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) - D. Batista, P. Azemard, M. Boutry

[31] Gastaud C., juin 2008 : Diagnostic et renforcement sismique des ponts existants – Travail de Fin d'Etudes – ENTPE, Promotion 53, VA Génie Civil

[32] Méthode SISROUTE : Retours d'expériences et exploitation des tests menés sur différents itinéraires des Alpes-Maritimes (Cerema Méditerranée, juillet 2015)

[33] ESCOTA/Setec-TPI – Analyse de vulnérabilité sismique des ouvrages de l'A52 (Document n°003-28234-ST-003-B1 du 21/03/2012)

[34] ESCOTA/Setec-TPI – Analyse de vulnérabilité sismique des ouvrages de l'A8 – Section entre Brignole et Fréjus (Document n°003-28234-ST-004-A1 du 23/01/2012)

- [35] ESCOTA/Setec-TPI – Analyse de vulnérabilité sismique des ouvrages de l’A57 (Document n°003-28234-ST-005-A1 du 06/02/2012)
- [36] ESCOTA/Setec-TPI – Analyse de vulnérabilité sismique des ouvrages de l’A50 (Document n°003-28234-ST-006-A1 du 10/02/2012)
- [37] ESCOTA/Setec-TPI – Analyse de vulnérabilité sismique des ouvrages de l’A501 et A520 (Document n°003-28234-ST-007-A1 du 13/02/2012)
- [38] ESCOTA/Setec-TPI – Analyse de vulnérabilité sismique des ouvrages de l’A51 – District de Meyrargue entre Aix en Provence et Manosque (Document n°003-28234-ST-010-A1 du 21/03/2012)
- [39] ESCOTA/Setec-TPI – Analyse de vulnérabilité sismique des ouvrages de l’A8 et de l’A500 – Section entre Nice et Menton (Document n°003-28234-ST-012-A1 du 02/04/2012)
- [40] ESCOTA/Setec-TPI – Analyse de vulnérabilité sismique des ouvrages du réseau autoroutier Escota (Document n°003-28234-ST-013-A1 du 02/04/2012)
- [41] ESCOTA/Setec-TPI - Estimation et priorisation du diagnostic des vulnérabilités au séisme des ouvrages d’art – Département des Alpes-Maritimes (Document n°003-28234-ST-014-C1 du 11/07/2012)
- [42] ESCOTA/Tractebel Engineering – Analyse des études de vulnérabilité sismique des ouvrages d’art de l’A8 et estimation des coûts de renforcements sismiques – Tronçon Nice/frontière Italienne (Document n°P.007362.0001 RP 02 ind. 04 du 02/02/2016)
- [43] Avis sur l’analyse Sismoa réalisée par Setec sur le tronçon Nice/frontière italienne – CETE Méditerranée/Laboratoire de Nice (janvier 2013)
- [44] Diagnostic et renforcement sismiques du viaduc de Caronte – Bulletin Ouvrage d’Art du Sétra n°61, juillet 2009

Liste des annexes

Annexe 1 : Exemple d'application de la méthode de hiérarchisation des ouvrages à des portions d'itinéraires autoroutiers (triangle A7-A8-A54 entre Cavaillon, Aix-en-Provence et St-Martin-de-Crau)

Annexe 2 : Évaluation du risque sismique sur l'itinéraire de la RD6202 entre Nice et Digne

Annexe 3 : Estimation et Priorisation du Diagnostic des Vulnérabilités au séisme des Ouvrages d'Art du réseau ESCOTA

Annexe 4 : Évaluation préliminaire de la vulnérabilité sismique des ouvrages de la L2 à Marseille

Annexe 5 : Fiches synthétiques d'études de cas et d'analyse de coûts d'investigations et/ou renforcements

- **Annexe 5-1 : Sections autoroutières ASF – A7 / A8 / A54**
- **Annexe 5-2 : Sections autoroutières ESCOTA – A8 / A500**
- **Annexe 5-3 : Section autoroutière DIR Med - Viaduc de Caronte à Martigues (A55)**
- **Annexe 5-4 : Déviation urbaine liaison L2 (Marseille – 13) – Dalle du Merlan**
- **Annexe 5-5 : Reconnaissances géotechniques en sites sismiques (Pont du Jai et viaduc de Caronte)**
- **Annexe 5-6 : Tableau récapitulatif**

